

ANTECEDENTES RECOPIADOS POR EL MMA**1. ANTECEDENTES SOBRE BIODIVERSIDAD**

- Contaminación Lumínica, impacto sobre las poblaciones de aves costeras de la región de Tarapacá (Malinarich, Vinko)
- Estudio del estado de las poblaciones de golondrina de mar en la Región de Tarapacá (Malinarich, Vinko, et. al, SAG Tarapacá)
- Minuta Contaminación Lumínica y efectos sobre la biodiversidad (Charif Tala, MMA)
- Reproducción de la golondrina de mar negra (*Oceanodroma markhami*) en el desierto del norte de Chile (Juan C. Torres-Mura & Marina L. Lemus)

2. ANTECEDENTES SOBRE OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA

- The World Atlas of Light Pollution (Falchi et. Al).

3. ANTECEDENTES SOBRE SALUD DE LAS PERSONAS

- Ambient Light Exposure and Changes in Obesity Parameters A Longitudinal Study of the HEIJO-KYO Cohort (Obayashi, Kenji, et. al).
- Circadian and Metabolic effects of Light implications in weight Homeostasis and Health Plano, Santiago, et. al.
- Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance (Cajochen, C. et. al).
- Why artificial light at night should be a focus for global change research in the 21st century (Davies & Smyth).

4. OTROS ANTECEDENTES

- Informe final Programa de Recambio de Alumbrado Público, Ministerio de Energía, Subsecretaría de Energía.
- Informe Final BID Apoyo a la eficiencia energética en el sector residencial y municipal consultoría técnica – Alumbrado Público.
- Ley N° 21162_Modifica la Ley N° 19.300.

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
PROGRAMA DE ORDENAMIENTO Y GESTIÓN AMBIENTAL (PROGOA)
MAGISTER EN MEDIO AMBIENTE
CURSO ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE
PROF. NELSON MORAGA BENAVIDES

“Contaminación Lumínica, impacto sobre las poblaciones de aves
costeras de la región de Tarapacá”



Alumno:
Vinko Malinarich Torrico.

12 Junio 2010

Resumen

Este trabajo identifica y define los problemas asociados a la contaminación lumínica desproporcional e irracionalmente utilizada que impacta directa e indirectamente sobre la flora y fauna del ecosistema relacionado a dicha contaminación, específicamente sobre las poblaciones de aves costeras de la región de Tarapacá. Este aspecto se encuentra poco estudiado en nuestro país, dado que carecemos de una normativa que legisle e imponga un control y manejo de la contaminación lumínica emitida por los distintos tipos de proyectos. Además, este trabajo da a conocer mecanismos de manejo asociados a la aplicación de equipos de mejor tecnología, ahorro energético y disminución de impactos sobre la biodiversidad presente.

Abstract

This study identifies and defines the problems associated with disproportionate and unreasonable illuminated contamination used to direct and indirect impacts on flora and fauna of the ecosystem related to this contamination, specifically it on populations of shorebirds of the region of Tarapaca. This aspect is poorly studied in our country, given that lack of legislation to legislate and impose a control and management of illuminated contamination emitted by different types of projects. In addition, this work presents management mechanisms associated with the implement best technology equipment, saving reduction energtic and impacts on the biodiversity.

1. Introducción

La acción del hombre y su cultura sobre el medio ambiente está, en la actualidad, generando una seria alteración en ambos ciclos cósmicos. La actividad industrial y las formas de vida propias de las sociedades consumistas no se pueden sostener, de mantenerse el actual modelo de economía capitalista, sino es mediante un creciente consumo energético. La generación de energía eléctrica, causa unos efectos nocivos para la humanidad, sobre todo teniendo en cuenta que el 86% de la energía primaria utilizada, proviene del uso de combustibles sólidos, que causan grandes problemas ambientales asociados a su extracción, transporte y consumo. Las centrales termoeléctricas generan energía eléctrica a partir del empleo de combustibles fósiles o no, produciendo gases como el CO₂, que contribuye al efecto invernadero. (Assaf, Dutt, & Tanides, 2002)

El uso excesivo e irresponsable de la energía eléctrica en el alumbrado de exteriores es la causa de una nueva agresión medioambiental que amenaza ni más ni menos que con eliminar la noche, la contaminación lumínica se llama a la emisión directa o indirecta hacia la atmósfera de luz procedente de fuentes artificiales, en distintos rangos espectrales. Sus efectos manifiestos son: la dispersión hacia el cielo (skyglow), la intrusión lumínica, el deslumbramiento y el sobreconsumo de electricidad.

La dispersión hacia el cielo se origina por el hecho de que la luz interactúa con las partículas del aire, desviándose en todas direcciones. El proceso se hace más intenso si existen partículas contaminantes en la atmósfera (humos, partículas sólidas) o, simplemente, humedad ambiental. La expresión más evidente de esto es el característico halo luminoso que recubre las ciudades, visible a centenares de kilómetros según los casos, y las nubes refulgentes como fluorescentes.

La contaminación lumínica tiene efectos comprobados sobre la flora y fauna nocturna. La actividad biológica a pleno sol es mínima comparada con la que podemos encontrar desde el crepúsculo hasta el amanecer, es decir, que la fauna nocturna es más numerosa y precisa de la oscuridad para mantener su equilibrio.

Una iluminación indiscriminada de las playas supone una agresión para la vida marina; entre otros, la luz artificial altera los ciclos de ascenso y descenso del plancton marino (base de la cadena alimenticia). El deslumbramiento y desorientación en aves es otro de los efectos de la luz artificial. Algunas especies pierden el rumbo y otras salen a procurarse alimento más tarde de lo habitual y terminan con el estómago vacío.

El equilibrio de las diferentes poblaciones también es susceptible de romperse, puesto que la luz puede perjudicar a unas especies, ciegas para esa longitud de onda, facilitando que sean depredadas. Más del 90% de los insectos son de costumbres nocturnas y ven alterados sus hábitos nocturnos (reproducción, migración, etc.) por la presencia de potentes focos que rompen el ciclo natural del día y la noche. Cabe resaltar también otro problema añadido: la agresión que provocan las luces públicas de mercurio a esta especie. La radiación ultravioleta que desprenden estas lámparas es imperceptible para el ojo humano pero no para los insectos nocturnos. La naturaleza se sustenta mediante complejas relaciones, por lo que si los insectos se ven afectados también lo harán tanto sus depredadores naturales (pájaros, murciélagos, anfibios, etc.) como las especies vegetales que se abren por la noche, por la disminución de la polinización. (Herranz 2002)

2. Objetivo general

Determinar los efectos nocivos que puede causar la contaminación lumínica sobre la población de aves costeras de la primera región y proponer posibles soluciones.

2.1 Objetivos Específicos

- Determinar las especies de aves que se ven afectadas por la contaminación lumínica en la región de Tarapacá.
- Definir los efectos que produce la contaminación lumínica en el ciclo natural de la población de aves costeras de la región de Tarapacá.
- Determinar acciones de mejora para disminuir el impacto sobre las poblaciones de aves de la región de Tarapacá.
- Definir acciones para el desarrollo de una gestión de manejo eficiente de la energía en iluminación.

3. Antecedentes y/o Problemática

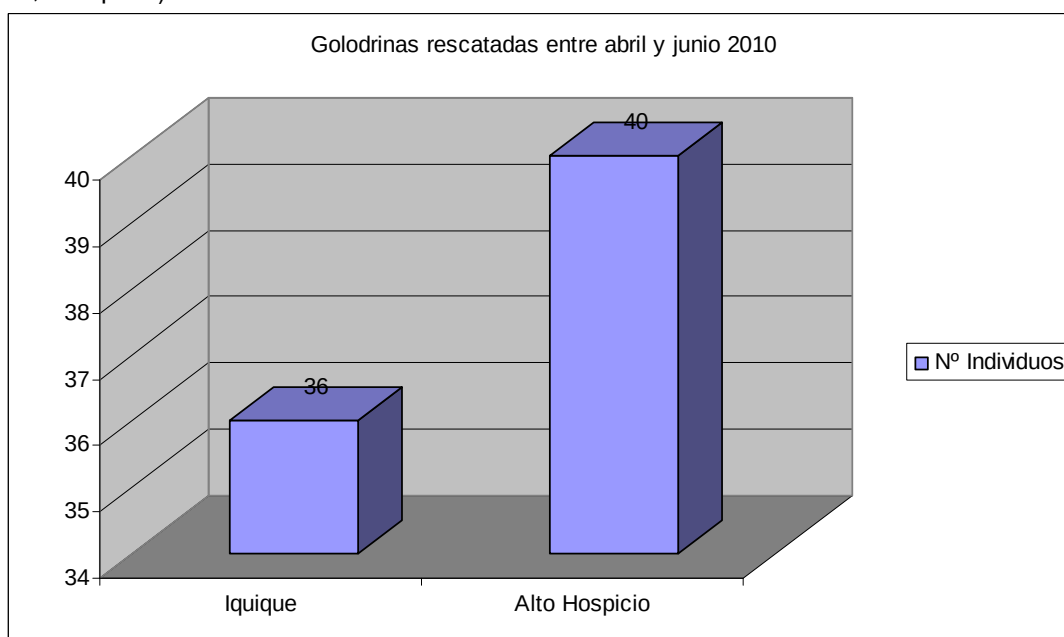
La contaminación lumínica tiene efectos comprobados sobre la flora y fauna nocturna. La actividad biológica a pleno sol es mínima comparada con la que podemos encontrar desde el crepúsculo hasta el amanecer, es decir, que la fauna nocturna es más numerosa y precisa de la oscuridad para mantener su equilibrio.

De acuerdo con el Programa de Concientización Fatal Luz (FLAP), por lo menos 100 millones de aves mueren anualmente por estructuras artificiales. Estas muertes son una combinación de desorientación debido a la iluminación artificial, luces brillantes y las torres con el parpadeo de advertencia. La gran mayoría de las muertes son causadas por las colisiones estructuras tales como edificios, torres, postes y otras estructuras hechas por el hombre debido a la confusión de las luces de demasiada potencia o demasiado brillantes. Un par de asesinatos en masa significativa de las aves se han producido en los Estados Unidos durante los últimos cincuenta años. El 07 de octubre 1954, un cantidad de 50.000 aves siguieron un haz de luz brillante iluminado por la Warner Robins Air Force Base en Georgia. Más recientemente, en 1998, cerca de 10.000 aves se estrellaron contra las torres de transmisión de radio en Kansas. Aunque estos pueden haber sido accidentes extraños, que sólo demuestra la teoría de que el uso de las luces está matando a muchas aves. En Chile, no se tiene mayor información sobre los efectos que provoca la contaminación lumínica sobre las poblaciones de aves, sin embargo se conocen muchos casos aislados, como la gran cantidad de águilas y halcones (*Geranoaetus sp.* y *Falco sp.*) que caen bajo las torres de tendido eléctrico y torres de iluminación de la segunda región, así como la gran cantidad de aves costeras (*Oceanodroma sp.* y *Phalaropus sp.*) que caen cercanas a las torres de iluminación de los proyectos portuarios de la zona de Mejillones (Sag, Región de Antofagasta).

En la región de Tarapacá, el SAG tienen registros de la caída de las mismas especies costeras víctimas en la región de Antofagasta. A modo de ejemplo, entre los meses de Marzo y Mayo de 2010 se retiró un total de 76 individuos de la especie Golondrina de mar negra *Oceanodroma*

markhami, encontradas en diferentes puntos de la ciudad de Iquique y Alto hospicio (Grafico 1), producto de alguna colisión relacionada con estructuras que emiten luz. Por otro lado, de acuerdo al plan de mitigación de rescate de especies costeras implementado entre el SAG Tarapacá y una de las empresas que explotan el Salar Grande ubicado a 89 kilómetros al sur de la ciudad de Iquique sobre la cordillera de la costa, a la fecha se han entregado reportes entre los meses de febrero y mayo de 2010 de un total cercano a los 1.200 individuos rescatados de la misma especie, todos ellos habían impactado con equipos de iluminación, tanto en el borde costero como en lugares por sobre la cordillera de la costa donde existen faenas mineras de explotación del Salar Grande (Foto 4 y 5).

Grafico 1: Golondrinas rescatadas por el SAG entre los meses de abril y junio de 2010. (Fuente SAG, Tarapacá)



Actualmente no existe una normativa que regule las emisiones lumínicas en zonas de importancia en biodiversidad para el territorio nacional, lo único que existe es el Decreto N°686/1999 del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, que protege la calidad de los cielos astronómicos de la región de Antofagasta hasta la región de Coquimbo, sin embargo esta normativa está referida a la protección desde el punto de vista astronómico y no en términos de protección de la biodiversidad.

4. Metodología

Para establecer una metodología de trabajo, se deben definir primeramente que es lo que estamos midiendo, desde las definiciones técnicas hasta las características de las especies de aves costeras; para finalmente y definir cuáles son los criterios de solución al problema de manera de poder realizar un plan de manejo de contaminación lumínica que genere el menor impacto posible sobre las poblaciones de aves costeras.

4.1 Definiciones Técnicas

Podemos definir la luz, como la energía visible o una radiación luminosa emitida por la excitación de un cuerpo. Cuando esta radiación se produce dentro de la zona visible nos permite ver objetos y colores.

Existen dos grandes familias de fuentes luminosas: la incandescencia y la luminiscencia. La primera de origen térmico como el sol y la segunda la emitida por las luciérnagas.

Las lámparas modernas son fuentes luminosas de origen eléctrico. Las lámparas con filamento convencional o las halógenas producen luz por incandescencia. Las de descarga como los rayos, aprovechan la luminiscencia, mientras que un diodo como las luciérnagas, utilizan la fotoluminiscencia. Además existen lámparas de luz mezcla (incandescencia/luminiscencia) y lámparas fluorescentes, cuya característica es la de aprovechar tanto la incandescencia como la fotoluminiscencia.

La iluminancia (E), expresada en Lux, es el flujo luminoso que recibe una superficie determinada situada a una cierta distancia de la fuente. Se determina por la relación entre la intensidad luminosa y la distancia al cuadrado ($\text{intensidad} \times \text{distancia al cuadrado} = id^2$). Se mide con la ayuda de un luxómetro.

La intensidad luminosa (i), se expresa en candelas (cd) y es la intensidad del flujo proyectado en una dirección determinada. Un día soleado de verano proporciona 100.000 lux a pleno sol y 10.000 a la sombra. Una noche de luna llena, 0.2 lux.

Luminancia (L), es la intensidad luminosa producida o reflejada por una superficie dada. Con ella se puede evaluar el deslumbramiento. Se mide en candelas por metro o centímetro cuadrado (cd/m^2). El flujo luminoso es la cantidad de luz emitida por una fuente, medida en lúmenes (lm) en la tensión normal de funcionamiento.

El espectro visible por el ojo humano es el situado en la franja del ultravioleta al infrarrojo, comprendiendo el campo de 400 nm a 700 nm de longitud de onda, pasando por el azul, verde, amarillo y el rojo. Cada fuente luminosa tiene un espectro distinto que le confiere unas características y cualidades específicas concretas.

Las lámparas de descarga emiten un espectro de rayas discontinuas. Las incandescentes de rayas continuas y el sol emiten todos los rayos en un espectro continuo y completo.

El tono y la temperatura de color: El tono de la luz se determina por su temperatura de color expresada en grados Kelvin (K). La escala Kelvin empieza en el punto cero absoluto ($0^\circ \text{Kelvin} = -273^\circ \text{C}$). La temperatura de color de una fuente de luz es la correspondiente a la temperatura del cuerpo negro que presenta el mismo color que la fuente.

A mayor temperatura del cuerpo negro, el color de la luz se vuelve más blanca. Una bombilla incandescente tiene p.ej. una temperatura de color de 2800°K, un tubo fluorescente luz día más de 5000°K.

Se establecen tres grupos para el color de las fuentes de luz: Blanco luz día, Blanco neutral y Blanco cálido. Dos fuentes de luz pueden tener la misma temperatura de color y poseer a causa de su composición espectral unas propiedades de reproducción de los colores muy diferentes.

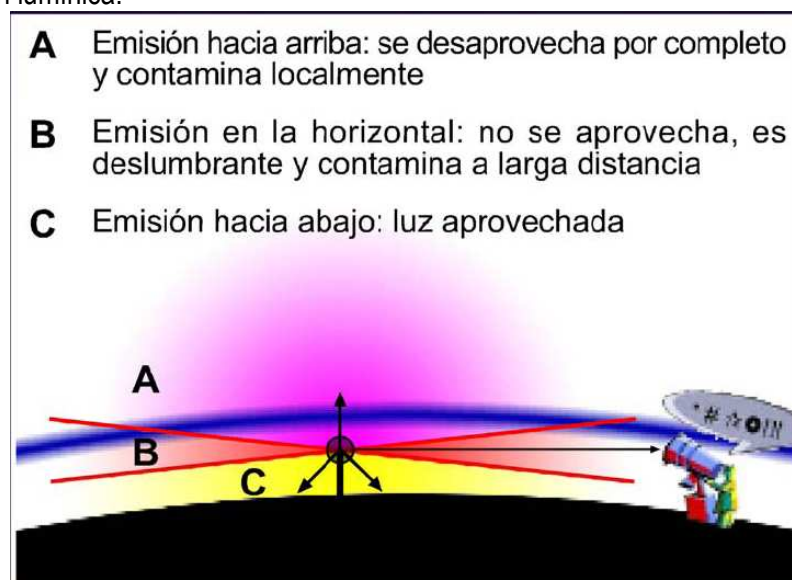
Las luces cálidas emiten una coloración que tiende al amarillo y rojo. La luz fría, por contra, tira hacia el azul y violeta, y la luz natural blanca es aquella que emite el sol con cielo despejado.

La distribución espacial de la intensidad luminosa de una lámpara reflectora o una luminaria se define como "superficie de la distribución luminosa". Este aspecto es muy importante a tener en cuenta y se representa por diferentes planos secantes en diagramas polares (curvas de la distribución luminosa). Para facilitar la comparación se relaciona la intensidad luminosa de la lámpara en la luminaria con 1000 lúmenes (lm) y con la unidad de cd/klm (Candela por kilolumen).

Por la forma que tenga la curva de la distribución luminosa se puede reconocer si se trata de una luminaria (o lámpara reflectora) de haz estrecho, ancho, simétrico o asimétrico. La luz difundida por la atmósfera causa también otros perjuicios al medio pues ilumina el suelo de modo no despreciable en la vecindad de áreas urbanas, provocando un efecto importante en la luminosidad ambiental percibida por los animales en sus hábitats naturales, dado que el cielo ocupa una fracción apreciable del campo de visión de un animal. Esto tiene efectos muy diversos según las longitudes de onda predominantes y las especies de que se traten.

No es fácil caracterizar la cantidad de contaminación lumínica de un proyecto o actividad, debido a la diferencia de sus características, a su estacionalidad, a su smog entre otros por lo que para obtener una correcta caracterización se debe establecer que entendemos por contaminación lumínica, y cual es la luz que debemos aprovechar, Figura 1:

Figura 1: Esquema general de las distintas direcciones de emisión en la generación de contaminación lumínica.



4.2 Características de especies de aves costeras.

De acuerdo a los antecedentes obtenidos del SAG, según las especies de aves que impactan con mayor frecuencia en los postes e instalaciones de alumbrado, éstas pertenecen principalmente a dos familias:

- *Oceanitidae* (Golondrinas de mar)
- *Scolopacidae* (Playeros, becacinas, pitotoy, pollitos de mar)

La familia *Oceanitidae*, son aves pelágicas cuya longitud varía entre los 16 y 25 cm. Vuelan rápida y erráticamente a poca distancia del agua. Se alimentan de pequeños organismos planctónicos que capturan de una manera característica, poniendo las patas en contacto con el agua, dando la impresión de caminar sobre ella. Ponen un solo huevo blanco, relativamente grande para el tamaño del ave.

A esta familia pertenecen las Golondrinas de Mar, las especies Chilenas son:

- Golondrina de mar, *Oceanites oceanicus*.
- Golondrina de mar chica, *Oceanites gracilis*
- Golondrina de mar subantártica, *Garrodia nereis*
- Golondrina de mar de vientre blanco, *Fregetta grallaria*
- Golondrina de mar de vientre negro, *Fregetta tropica*
- Golondrina de mar de garganta blanca, *Nesofregetta albigularis*
- Golondrina de mar peruana, *Oceanodroma tethys*
- Golondrina de mar negra, *Oceanodroma markhami*
- Golondrina de mar de collar, *Oceanodroma hornbyi*

De las especies mencionadas anteriormente, la especie que frecuentemente se encuentra en las cercanías del proyecto ubicado al sur de la ciudad de Iquique, y que es rescatada producto de colisiones con luminarias es la Golondrina de Mar negra *Oceanodroma markhami* (Foto 3), especies de la cual no se tiene mayor información sobre su ciclo reproductivo ni zonas de nidificación en nuestra región.

Por otro lado la familia *Scolopacidae*, consta de dos subfamilias:

- *Scolopacinae* (playeros, pitotoy, becacinas)
- *Phalaropodinae* (pollitos de mar)

De éstas dos subfamilias sólo se tiene registros de colisiones de la Subfamilia *Phalaropodinae*; la cual presenta características de aves pequeñas de 19 a 25 cm. de longitud. Las alas son largas y terminadas en punta, la cola es de tamaño moderado y los tarsos moderadamente largos. Los dedos están unidos por una membrana sólo en la parte basal y están provistos de lóbulos. Durante la época de reproducción las hembras tienen un plumaje más vistoso que los machos. Anidan en el suelo, poniendo 4, raramente 3 o 5 huevos de coloración café verdosa clara con manchas café y negras.

A esta subfamilia pertenecen los Pollitos de Mar, las especies chilenas son:

- Pollito de mar rojizo, *Phalaropus fulicaria*
- Pollito de mar boreal, *Phalaropus lobatus*
- Pollito de mar tricolor, *Phalaropus tricolor*

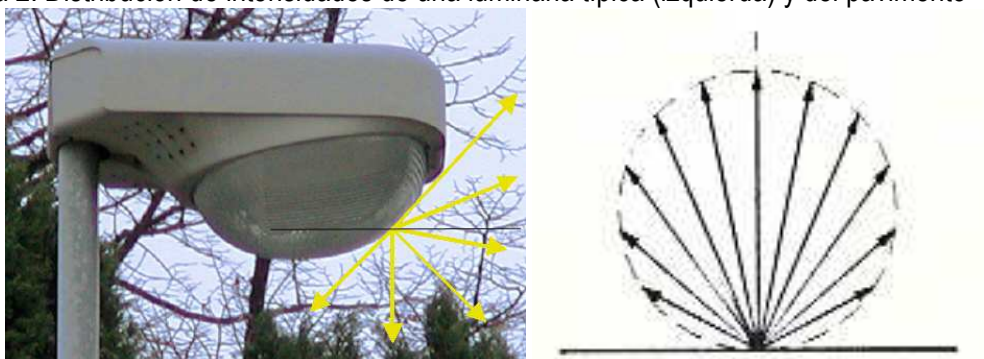
Las colisiones de este tipo de aves pertenecientes a éstas dos familias; no tiene aún una explicación cierta, sin embargo se conoce que mientras mayor sea la intensidad de luz emitida y reflejada, mayor es el grado de desorientación de las aves de paso. En la oscuridad, y, sobre todo cuando hay niebla o lluvia, cuando las aves vuelan a altitudes más bajas, la combinación de cristales y luz se vuelve mortal. Confundidas por las luces artificiales o simplemente agotadas de volar alrededor de las luces (como las polillas, cerca de una llama) las aves pueden resultar heridas o muertas. (Fatal Light Awareness Program, FLAP).

4.3 Criterios de evaluación.

El primer criterio fundamental es utilizar luminarias que eviten por completo la emisión de luz sobre el horizonte. El límite adoptado en las mejores normativas de estados y regiones europeas es de 0 cd/klm a 90° o más sobre el plano horizontal (con una tolerancia de 0,5 cd/klm) para cualquier luminaria pública o privada.

Para comprender la efectividad de este criterio frente a lo engañoso de los distintos límites emitidos al FHS (Flujo Hemisférico Superior), considérese que, en promedio, la fracción de flujo devuelta por el suelo es aproximadamente el 10% del flujo total emitido por una luminaria. Por tanto, por cada 100 lm emitidos desde una luminaria, 10 lm son reflejados irremediabilmente hacia arriba. Si permitimos, por ejemplo, que otros 3 lm sean emitidos directamente hacia el cielo desde la luminaria (FHS=3%), el flujo hemisférico superior del conjunto sería unos 13 lm, lo que supone un aumento de contaminación lumínica debida al FHS de aproximadamente el 30% sobre lo ya inevitable por la reflexión del suelo (Figura 2). En efecto, las luminarias eficientes tienden a tener un FHS pequeño (menos del 5% del total del flujo emitido), un exceso que, por construcción, tienden a emitir precisamente en ángulos pequeños en torno a la horizontal, donde se concentra gran parte de su emisión.

Figura 2: Distribución de intensidades de una luminaria típica (izquierda) y del pavimento



Debido a que el espesor de la atmósfera densa está limitado a unas pocas decenas de kilómetros, por razones geométricas fáciles de entender la emisión en pequeños ángulos sobre

la horizontal se propaga más lejos que la luz emitida en ángulos elevados y se suma a la luz procedente de otras fuentes lejanas, creando un efecto de adición muy eficiente a la hora de producir niveles importantes de luminosidad artificial del cielo. Por el contrario, la luz emitida a grandes ángulos o directamente hacia arriba ilumina la atmósfera sobre la fuente, escapa en su mayor parte al espacio y no se propaga demasiado ni produce adición.

Es por tanto un hecho que, aunque la emisión luminosa procedente de las luminarias pueda parecer despreciable con respecto a la devuelta por las superficies iluminadas, en realidad constituye la parte fundamental del flujo contaminante a distancias crecientes de la fuente. Debido a que la contaminación lumínica, en ausencia de obstáculos, se propaga libremente por la atmósfera hasta más de 200 km de distancia (en realidad, hasta que la propia curvatura terrestre la oculta), en la mayor parte del territorio el brillo artificial del cielo está producido por la suma de los efectos de fuentes situadas a grandes distancias.

Dicho lo anterior, se hace complejo establecer un modelo matemático propio que tenga en cuenta coeficientes de dispersión y absorción de la atmósfera según la estación, la reflexión y dispersión de pisos, fachadas y follajes, y el tipo y la cantidad de luminarias existentes de alumbrado.

Por ello, lo principal es establecer el tipo de fuentes lumínicas en un proyecto o actividad, en este caso se trataría de la actividad minera y portuaria de la Empresa SPL, ubicada a 89 kilómetros al sur de la ciudad de Iquique (Mapa 1).

Mapa 1: Ubicación de empresa SPL, Región de Tarapacá.



Para poder aplicar este primer criterio, se realizó un levantamiento de información de todo el equipo utilizado en iluminación, tanto en la faena minera como en la zona portuaria, incluyendo:

1. Iluminación privada de exteriores (letreros, anuncios, cañones de luz, edificios, etc).
2. Iluminación ornamental de lugares emblemáticos (edificios, monumentos, fuentes, árboles).
3. Vías de comunicación de gran capacidad, áreas de servicios, estacionamientos y peajes.
4. Zonas industriales y comerciales (oficinas, salas y galpones).
5. Faena minera, zona de extracción de mineral, iluminación de seguridad, etc.
6. Puertos, zonas de embarque, faros.
7. Iluminación de obras en construcción.
8. Iluminación de interiores que escapan al exterior.

Ahora bien, de los tipos de lámparas que actualmente existen en el mercado, atendiendo a sus espectros, se pueden clasificar de la siguiente forma:

Poco contaminantes:

- Vapor de sodio a baja presión: emite prácticamente sólo en una estrecha zona del espectro, dejando limpio el resto. Su luz es amarillenta y monocromática. Es recomendable para alumbrados de seguridad y carreteras fuera de núcleos urbanos. Son las más eficientes del mercado y carece de residuos tóxicos y peligrosos.
- Vapor de sodio a alta presión: emiten sólo dentro del espectro visible. Su luz es amarillenta con rendimientos de color entre 20% y 80%, dependiendo del modelo. Es recomendable para todo tipo de alumbrado exterior. Son las más eficientes del mercado después de las de baja presión.

Medianamente contaminantes:

- Lámparas incandescentes: No emiten en el ultravioleta pero si en el infrarrojo cercano. Su espectro es continuo. Su luz es amarillenta con un rendimiento de color del 100%. No es recomendable para alumbrado exterior, excepto para iluminar detalles ornamentales. Son las más ineficaces del mercado.
- Lámparas incandescentes halógenas: Son iguales que las incandescentes pero emiten algo más en el ultravioleta si no va provista de un cristal difusor (son peligrosas sin este cristal por emitir en el ultravioleta duro). Son algo más eficaces que las incandescentes.
- Lámparas fluorescentes en tubos y compactas (vapor de mercurio a baja presión): Emiten en el Ultravioleta. Su luz es blanca con rendimientos cromáticos entre el 40% y el 90%. Es recomendable para alumbrados peatonales y de jardines. Tienen una alta eficiencia. Estas lámparas son medianamente contaminantes si no se usan en grandes instalaciones y convenientemente apantalladas evitando emisión de luz sobre el horizonte.

Muy contaminantes:

- Lámparas de vapor de mercurio a alta presión: Tienen una elevada emisión en el ultravioleta. Su luz es blanca con rendimientos de color inferiores al 60%. Es recomendable para zonas peatonales y de jardines. Son las menos eficientes del mercado en lámparas de descarga.
- Lámparas de halogenuros metálicos: Tienen una fortísima emisión en el ultravioleta. Su luz es blanca azulada con rendimientos de color entre el 60% y el 90%. Es recomendable para eventos deportivos importantes y grandes zonas donde se requiera un elevado rendimiento cromático. Son muy eficaces, parecidas al sodio de alta presión, pero de corta vida.

Para este proyecto, se reemplazaron sólo las luminarias consideradas como las más contaminantes.

La nueva tecnología de instalación ecoeficiente disponible en el mercado, muestra múltiples alternativas para poder reemplazar la típica luminaria poco eficiente instalada en el proyecto en cuestión. Figura 3.

Figura 3: Múltiples ejemplos de luminarias sin emisión al hemisferio superior, tanto con cierre plano como curvo (derecha)



El segundo criterio fundamental para un control efectivo de la contaminación lumínica es no sobreiluminar, es decir, no aplicar niveles de iluminación superiores a las recomendaciones internacionales de seguridad para cada uso, y disminuir estos niveles de forma homogénea a las horas de la noche en que la disminución del tráfico no justifica su mantenimiento. Esta es la única manera práctica y universal de no aumentar la contribución de la contaminación lumínica procedente de la reflexión del pavimento.

Un tercer criterio fundamental es usar lámparas cuya distribución espectral tenga la máxima intensidad en las longitudes de onda a las que el ojo tiene la máxima sensibilidad en las condiciones típicas de las áreas a iluminar (normalmente visión fotópica), evitando al máximo las

lámparas de amplio espectro (de luz «blanca»). De este modo, además de favorecer el máximo aprovechamiento de la luz para la función visual, se evita en parte invadir la región del espectro correspondiente a la visión escotópica, que es la predominante cuando se observa el cielo oscuro natural lejos de la zona donde están situadas las luminarias. En la práctica, este criterio consiste en identificar el tipo de lámpara entre las disponibles por la técnica actual, siendo estas limitadas en número y de características conocidas. Evitar la luz blanca beneficia también a la biodiversidad nocturna en general, además de producir menor difusión atmosférica que la amarilla. La lámpara elegida debe ser, por tanto, aquella que a igual flujo luminoso ocasione el menor impacto ambiental (Tabla 1).

Tabla 1: Tipo de lámpara y su respectiva eficiencia lumínica.

Tipo de Lámpara	Eficiencia (lm/W)
Incandescente	12 -18
Luz de mixta	19 -28
Fluorescentes	38 -91
Mercurio a alta presión	40 -63
Lámpara LYSL	55 -65
Inducción Magnética	70-90
Halurometálico	75 -110
Sodio a alta presión	75-130
Sodio a baja presión	100 -183

Sobre estos tres criterios de evaluación de impacto de la contaminación lumínica sobre la población de aves costeras, se realiza además un ahorro eficiente en el reemplazo de equipo utilizado en iluminar pequeñas y grandes áreas del proyecto en cuestión.

5. Resultados

Al realizar un catastro del tipo de iluminación utilizado en el proyecto se observa que la gran mayoría de la luminaria está compuesta por lámparas muy contaminantes (Fotos 1 y 2), por lo que se realizó una propuesta de cambio de tipo de lámparas conservando la intensidad lumínica entregada y el número de luminarias (Tabla 2), por lo cual se obtuvo lo siguiente:

Tabla 2: Resultado del catastro de luminaria presente en el proyecto y reemplazo de sistema de iluminación. (Fuente valorizada según tabla de precios ELIQSA SA.)

Tipo de luminaria y potencia nominal	Composición de Proyecto SPL base	Reemplazo de Luminaria Eficiente
Vapor de Mercurio 125	77	0
Vapor de Mercurio 160	500	0
Vapor de Mercurio 250	380	0
Vapor de Mercurio 400	0	0

Filamento Incandescente 100	216	0
Filamento Incandescente 200	0	0
Vapor de Sodio 70	680	982
Vapor de Sodio 100	112	612
Vapor de Sodio 125	43	43
Vapor de Sodio 150	974	1354
Vapor de Sodio 160	0	0
Vapor de Sodio 250	3237	3237
Vapor de Sodio 400	643	643
Vapor de Sodio 1000	7	7
Haluros Metálicos 250	74	74
Haluros Metálicos 400	69	69
Alógenos 300	157	157
Alógenos 500	35	35
Alógenos 1000	20	20
Luz Mixta 160	9	0
Total luminarias	7233	7233
Costo total por consumo (\$/año)	\$ 160.296.693	\$ 153.233.931
Costo total por mantención (\$/año)	\$ 91.548.081	\$ 91.548.081
Costo anualizado de recambio (\$/año)	\$ 30.085.053	\$ 27.329.168
Costo anual total por iluminación (\$/año)	\$ 281.929.827	\$ 272.111.181
Ahorro producto de la norma (\$/año)		\$ 9.818.646

El sector minero/portuario es claramente un gran consumidor de energía utilizada en iluminación, por lo cual posee un potencial impacto en términos de contaminación superior a cualquier otro tipo de proyecto de la región. El número de luminarias es similar a una localidad como Pozo Almonte, y con un porcentaje de ellas no aceptadas por la norma. El ahorro generado por el cambio en las luminarias es de casi diez millones de pesos anuales como máximo, reduciendo el consumo de \$281 millones a \$272 millones y los costos por menor tasa de recambio de \$20 a \$27 millones al año. En este costo está incluido el cambio del tipo de lámparas, de manera de ajustar la superficie de la distribución luminosa de manera de aprovechar al máximo la luz emitida y no generar destellos horizontales que puedan afectar a las poblaciones de aves costeras.

Además de generar un gran ahorro de energía en términos económicos, este cambio de luminaria involucra un cambio en el equipamiento para lograr la disposición hacia el hemisferio inferior de todas las luminarias, tratando de provocar la menor cantidad de emisiones de luz horizontales deslumbrante y logrando una mejor y dirección y aprovechamiento.

Este tipo de luminaria, permite un menor impacto sobre los ciclos biológicos naturales de las diferentes especies de aves costeras que habitan el litoral costero de la región de Tarapacá.

6. Discusión

Visto los resultados, no se entiende cual es la razón para no haber realizado este proyecto con una gestión en eficiencia lumínica desde un principio, previa a la instalación del proyecto, ya que este cambio genera ahorros para la empresa.

Es necesario evitar la emisión de luz por encima de la horizontal, sobre todo en el alumbrado de vías y calles de tránsito, debido al alto impacto que genera la dispersión horizontal de la luz.

Para poder evaluar la disminución del impacto de la contaminación lumínica sobre la población de aves costeras, se debe realizar necesariamente una comparación del proyecto con manejo eficiente de la capacidad de iluminación y con el proyecto original.

Se necesitan mayores estudios científicos para poder determinar cual son los ciclos ecológicos reales de cada especie que se ve afectada por la contaminación lumínica.

7. Conclusiones

El valor del total de luminarias y lámparas que deben ser sustituidas en el proyecto en cuestión alcanza casi los \$10 millones. Este valor supone que al pasar de una lámpara de mercurio a una de sodio no se cambia la luminaria, y sólo se hace al pasar de incandescente a sodio.

Desde un punto de vista financiero, al cambiar una lámpara de mercurio por una de sodio que está funcionando, conlleva poseer la capacidad financiera para asumir este desembolso no planificado. Esta inversión “no planificada” se compensa en los 6 años siguientes por la mayor vida útil de la misma y el ahorro de energía y por ende menor contaminación.

En relación a los desechos tóxicos producidos por los elementos retirados de los sistemas de iluminación, se deben evitar los más nocivos para el medio ambiente, principalmente las bombillas de mercurio, remplazándolas por otras menos contaminantes como las de sodio.

Las conclusiones desde el punto de vista técnico y operativo en aras de la eficiencia energética, son las siguientes:

- Las lámparas de vapor de sodio consumen casi la mitad que las de vapor de mercurio y lumínicamente contaminan menos.
- Disponer que los cierres de las luminarias sean planos y el material utilizado tenga gran calidad de transmisión y resista los efectos de la intemperie y el paso del tiempo.
- No utilizar luminarias tipo globo sin reflector en la parte superior ya que proyectan una gran emisión de luz por encima de la horizontal.
- Un mejor aprovechamiento de la superficie de distribución luminosa, puede generar efectos directos en la disminución de los impactos que provoca la desorientación de aves costeras.

Por otro lado, si bien el brillo del cielo nocturno se debe a diferentes factores, el factor humano está identificado como la polución lumínica debido a la cantidad y mal diseño de la iluminación artificial, lo que nos queda es contribuir a controlar y minimizar este factor, para lo cual, aparte de las medidas anotadas anteriormente, se debe sensibilizar a los profesionales de la iluminación

para que sus diseños tengan en cuenta la problemática de dicha contaminación, y que sus proyectos sean técnica, ambiental y económicamente correctos, con alternativas eficientes y ahorrativas, y creen y difundan estándares para lograr una correcta iluminación.

Dicho lo anterior, algo aún más importante es crear conciencia hacia el futuro entre niños y jóvenes haciendo campañas en colegios, instituciones y medios de comunicación, sobre los perjuicios para la salud, los ecosistemas, la ciencia, la cultura, etc., debido al incremento de esta contaminación, que aparentemente pasa desapercibida para la mayoría de los ciudadanos.

Esta divulgación debe lograr a mediano plazo, una opinión ciudadana favorable a minimizar la contaminación lumínica, un freno al crecimiento de esta, y una mejora general de la conciencia de sostenibilidad y respeto a la naturaleza. Un manejo eficiente de las luminarias tanto públicas como privadas, permiten una pronta recuperación de la inversión y un ahorro de energía y dinero, y ayuda a preservar el Patrimonio natural.

Una iluminación correcta no significa disminución de esta, significa optimización, ya que debe cumplir con los requisitos del sitio a iluminar pero a la vez elimina la cantidad de luz y por ende de energía desperdiciada al estar dirigida hacia otros sitios, por lo que solo contribuiría a la contaminación lumínica con la luz reflejada por la superficie.

Finalmente, como se a argumentado anteriormente, se debe llegar a incorporar en las legislaciones ambientales de cada país, el tema de la emisión inadecuada del flujo luminoso ya que perjudica la calidad ambiental, perturba la biodiversidad, malgasta la energía eléctrica y obstruye la visión del firmamento, sin que esto implique la disminución de los niveles recomendados de iluminación.

Referencias Bibliograficas

Assaf, Leonardo., Dutt, Gautam. y Tanides, Carlos. (2002). Impacto Ambiental de los Sistemas de Iluminación. 118.

Cabello, Alberto J. y Kirschbaum, Carlos F.. (2001). Polución Lumínica UrbanaLibro: Manual AADL "Iluminación: Luz – Visión – Comunicación". Tomo 2 Cap 14. 297306.

Decreto N°686/1999 del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción

Gortazar, Luís (2007, May.). El cielo nocturno, un nuevo valor ambiental para la conservación de las especies y de la calidad de vida: conferencia internacional en defensa de la calidad del cielo nocturno y el derecho a observar las estrellas. Ambients: la revista del ministerio del medio ambiente (66), 4046

Herranz Dorremocha, Carlos. (2002). El Impacto Ambiental de la Iluminación nocturna artificial. 2744. Recuperado el 1 de Febrero de 2008.

Unidad de recursos Naturales, Servicio Agrícola y Ganadero de la región de Tarapacá.

Unidad de recursos Naturales, Servicio Agrícola y Ganadero de la región de Antofagasta.

Apéndices

Apéndice A (Imágenes)

Foto 1: Disposición de focos en proyecto SPL, zona portuaria.



Foto 2: Disposición de focos de vapor de mercurio en proyecto SPL, zona portuaria.



Foto 3: Fotografía de una Golondrina de mar negra, *Oceanodroma markhami*, rescatada en Punta Patillos.



Foto 4: Restos de Golondrina de mar negra, *Oceanodroma markhami*, encontrados en las inmediaciones de la zona portuaria de Punta Patillos.



Foto 5: Restos de Golondrina de mar negra, *Oceanodroma markhami*, encontrados en las inmediaciones de la zona portuaria de Punta Patillos.





ESTUDIO DEL ESTADO DE LAS POBLACIONES DE GOLONDRINA DE MAR EN LA REGIÓN DE TARAPACÁ



Vinko Malinarich Torrico; Paola Araneda Cid; Antulemu Vallverdú Zavala

SAG, Unidad de Recursos Naturales Renovables

Región de Tarapacá

Diciembre, 2018

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	5
2. OBJETIVOS	6
3. ANTECEDENTES	7
3.1 Estado actual del conocimiento de las especies	7
3.2 Acciones de sensibilización y difusión para la protección de las especies.....	10
3.3 La Brigada Canina como una herramienta para la detección de sitios de nidificación.....	12
4. MÉTODO	13
4.1 Área de estudio	13
4.2 Obtención de datos	16
4.2.1 Detección de presencia/ausencia	18
4.2.2 Características morfológicas y hábitos reproductivos	19
5. RESULTADOS	20
5.1 Reportes de incidentes en la Región de Tarapacá	20
5.1.1 Incidentes con instalaciones lumínicas	20
5.2 Prospecciones e identificación de sitios de nidificación	25
5.2.1 Caracterización de los sitios prospectados	25
5.3 Características morfológicas y hábitos reproductivos	35
5.3.1 Biometría	35
5.3.2 Actividad diaria.....	36
5.3.3 Características microclimáticas del nido	37
5.3.4 Ciclo reproductivo <i>O.markhami</i>	37
5.4 Amenazas	41
6. DISCUSIÓN	40
6.1 Reportes de incidentes en la Región de Tarapacá	42

6.2 Sitios de nidificación y densidad	43
6.3 Características morfológicas y hábitos reproductivos	45
7. CONCLUSIONES	47
8. LITERATURA CITADA.....	49
9. ANEXOS	52

AGRADECIMIENTOS.

Este estudio es posible gracias al trabajo coordinado y sistemático realizado por funcionarios de la Unidad de Recursos Naturales Renovables del Servicio Agrícola y Ganadero de la Región de Tarapacá.

Adicionalmente se agradece a todos los funcionarios y funcionarias del Servicio Agrícola y Ganadero de la Región de Tarapacá, que han participado en este Estudio, principalmente en los terrenos realizados durante estos últimos años: Mario Cáceres Pino (Encargado Regional de Controles Fronterizos) Leonardo Turra Corrales (Encargado Sectorial de la Unidad de Protección Pecuaria), Maricela Bustamante, Victor Quiroz y Diego Macagnan (Guía Brigada Canina Sector Iquique). También se agradece a los funcionarios del Departamento de Vida Silvestre que participaron en la revisión del documento final, Srta. Paola Rossi Muñoz, Rafael Asenjo y Claudio Julio Lepe.

Así como también este estudio cuenta con el apoyo constante de los Inspectores Ad honorem del SAG Regional; Elena Alarcón Astudillo y Verónica González Encinas, ambas también forman parte de la Red de Voluntarios de Rescate de Golondrinas de Mar en la Región.

1. INTRODUCCIÓN

El orden Procellariiformes (Furbringer 1888) agrupa a 103 especies clasificadas en cuatro familias, Diomedidae (Albatros), Procellariidae (Petreles, fardelas y Yuncos), Hydrobatidae (Golondrinas de mar) y Pelecanoididae (Petreles buceadores) (Warham 1990). En la costa chilena este orden se encuentra representado por 68 especies distribuidas en Diomedidae con 14 especies, Procellariidae con 42 especies e Hidrobatidae con 8 especies en la subfamilia Oceanitinae y 3 en Hydrobatinae.

Entre las especies de la subfamilia Oceanitinae se encuentran la golondrina de mar chica (*Oceanites gracilis*) y la golondrina de mar *Oceanites oceanicus*, mientras que en la subfamilia Hydrobatinae destacan la golondrina de mar negra (*Oceanodroma markhami*) y la golondrina de mar de collar (*Oceanodroma hornbyi*).

Debido a que las golondrinas de mar o petrel de la tormenta están estrictamente confinados al océano abierto y vuelven a tierra solo para reproducirse, han estado envueltos durante mucho tiempo en el misterio y el mito. Éstos eran conocidos por los marineros norteamericanos como "pollos de la madre Carey" (*Mother Carey's chickens*), en referencia a la bruja que poseía la llave donde se decía que los marineros ahogados reposaban (Spear & Ainley 2007).

Oceanodroma markhami, o también conocida como golondrina de mar negra, petrel de la tormenta o golondrina de tempestad, debe sus nombres a su reconocido comportamiento utilizando sus patas anchas y palmeadas para moverse en la superficie del mar y, quizás, su tendencia a recogerse a sotavento de los barcos durante las tormentas, los marineros consideraron la palabra "petrel", una referencia a San Pedro, de quien se decía que había caminado sobre el agua (Spear & Ainley 2007).

Aunque se han observado y estudiado en el mar durante cientos de años, la información sobre el comportamiento y la ecología de estas aves se ha acumulado muy lentamente, principalmente porque su hábitat es muy inhóspito para la mayoría de los humanos. Además, un conjunto de estrategias para protegerse de los depredadores también oscurece su ciclo de vida: llegan a tierra (principalmente islas o sitios sin suelo ni cobertura vegetal) sólo para anidar en horario nocturno, y residiendo en grietas estrechas o cavidades (Ainley 2005).

Este comportamiento estratégico y críptico ha invisibilizado su presencia en muchas zonas de la costa del pacífico sur oriental, haciendo difícil de estimar su tamaño o tendencias poblacionales. Por otro lado, la expansión urbana y la instalación de actividades industriales en áreas que se piensan

improductivas para la biodiversidad han degradado o transformado su territorio reproductivo, perjudicando a una cantidad indefinida de golondrinas de mar.

En la Región de Tarapacá, desde el año 2010 se han registrado especies de golondrinas de mar que son rescatadas mediante la atención de denuncia ingresada en las oficinas de OIRS, éstas acciones se realizan en la vía pública a primera hora del día o bien en áreas industriales cercanas a posibles sitios de nidificación. La Unidad de Recursos Naturales Renovables (RENARE) del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) ha coordinado instancias locales para la atención de denuncia, evaluación y posterior liberación de los individuos. El presente estudio consolida la información recabada en estos ocho años y las complementa con las iniciativas realizadas en terreno con el fin de mejorar el conocimiento de estas aves, en especial de la golondrina de mar negra (*O. markhami*).

2. OBJETIVOS

General

- Evaluar el estado, distribución y ciclo biológico de las poblaciones de Golondrinas de Mar en la Región de Tarapacá.

Específicos

- Analizar la situación actual de los individuos de golondrinas de mar involucradas en incidentes en la Región de Tarapacá.
- Caracterizar los sitios de nidificación existentes en la región de Tarapacá e identificar potenciales sitios aún no descritos.
- Evaluar la aplicación del uso de perros detectores y *playback* como métodos efectivos para la detección de nuevos sitios de nidificación.
- Analizar espacial y temporalmente el comportamiento reproductivo de las poblaciones nidificantes de *O. markhami* en la Región.
- Determinar los factores y la preferencia de hábitat de utilización de sectores para establecer colonias reproductivas.
- Determinar amenazas a los sitios de nidificación y al ciclo biológico de las poblaciones de golondrina de mar existente en la Región de Tarapacá.

3. ANTECEDENTES

3.1 Estado actual del conocimiento de las especies

La golondrina de mar negra (*Oceanodroma markhami*) es una especie endémica a la Corriente de Humboldt de Sudamérica (Spear & Ainley 2007). Entre julio y septiembre se encuentran en aguas cálidas ecuatoriales, mientras que entre enero y julio se concentran en las aguas frías de la Corriente de Humboldt (Pyle 1993). Se distribuye principalmente entre el norte de Perú y el desierto de Atacama del norte de Chile (Jahncke 1994). Su densidad aumenta con la salinidad y disminuye con la temperatura de la superficie del mar, la velocidad del viento por encima de 25 km/h y la distancia desde tierra firme. Prefiriendo aguas de aproximadamente 12°C y 32-33.5 ppt de salinidad (Spear & Ainley 2007). A pesar de que su dieta varía interanualmente debido a fenómenos oceanográficos como “El Niño” y “La Niña”, la base la compone, peces (54%), cefalópodos (36%) y crustáceos (10%). Teniendo a la anchoveta (*Engraulis ringens*) como el principal ítem presa, aunque se sabe que esta especie es de tipo oportunista (García-godos et al. 2002).

Durante la época reproductiva (invierno austral) prefieren grietas con depósitos de salitre donde nidifica anualmente. En Perú, específicamente en el sector de Paracas, las aves nidifican en pequeñas colonias dispersas, hasta 5 km del mar, en terrenos con pendientes, usualmente donde depósitos de nitratos ofrecen fisuras y hoyos (Tobias et al. 2006). En el norte de Chile, existen escasos registros de sitios de nidificación, ejemplo de ello es uno en la Región de Arica y Parinacota, ubicado a unos 12 km de la costa y entre 500-800 msnm (Torres-Mura & Lemus 2013; Schmitt et al. 2009).

Las amenazas para la conservación de esta especie son variadas, la actividad minera no metálica puede destruir los sitios de reproducción, las luminarias atraen a miles de volantones desorientándolos y dejándolos vulnerables para el ataque de carroñeros (*Cathartes aura*) y perros (*Canis lupus familiaris*) (BirdLife International 2017).

Durante el año 2018, la golondrina de Mar Negra fue propuesta en el 14°vo proceso de Clasificación de especies del Ministerio de Medio Ambiente. El resultado de este proceso queda refrendado mediante el Decreto Supremo N°79 del Ministerio de Medio Ambiente publicado el 19 de diciembre de 2018, cambiando su estado de Conservación a especie “En Peligro”, esto último debido principalmente a afectación de la especie provocada por la contaminación lumínica, seguido de la explotación de sal en los sitios de nidificación (Ficha 14°vo proceso de clasificación RCE Ministerio

de Medio Ambiente). Adicional a lo anterior, durante el año 2018 profesionales de la Red de Observadores de Aves y Vida Silvestre ROC, publican documento sobre el efecto que provoca la contaminación lumínica a las Golondrinas de Mar de la Zona Norte del país, cuantificando el impacto al menos a unas 20.000 golondrinas de mar negra que son impactadas cada temporada en la colonia de Salar Grande de la Región de Tarapacá, convirtiendo a esta especie de petrel, en la más afectada por impactos lumínicos en el mundo (Barros et. al en prensa).

Otras amenazas la constituyen la construcción de caminos, actividades militares y la colisión con estructuras eléctricas (Schmitt et al. 2009). A nivel internacional, la especie está calificada como “Datos insuficientes” (BirdLife International 2017). Mientras que, en Chile la especie se encuentra clasificada como Inadecuadamente Conocida, según el Reglamento de la Ley de Caza (D.S. N° 5/1998 MINAGRI).

La golondrina de mar de collar (*Oceanodroma hornbyi*), especie endémica a la Corriente de Humboldt de Sudamérica. Su población y distribución es escasamente conocida, sin embargo, ha sido observada entre los 3°S a 27°S en las costas de Ecuador, Perú y Chile (Spear & Ainley 2007). Durante el verano austral, se estima que se desplazan hacia el sur para nidificar entre los 20°S y 25°S en el norte de Chile y sur de Perú (Brooke 2004). Aunque los sitios de nidificación son inciertos, los registros de carcasas indican que podrían nidificar en zonas desérticas con suelos de nitratos (Murillo et al. 2013). Sin embargo, existen registros de esta especie en zonas montañosas donde fue encontradas a 2.225 msnm y a 3.800msnm en la provincia de Ancach, Perú (Drucker & Jaramillo 2013).

A nivel mundial el ciclo reproductivo, sigue siendo desconocido en su totalidad. Volantones de esta especie se registran entre Arica y Antofagasta, lo que sugiere que esta especie debe reproducirse en esta área. En 2017 la Red de Observadores de Aves y Vida Silvestre de Chile (ROC) descubrió el primer sitio de nidificación en el país, registrada a más de 70 km de la costa, en las proximidades de Diego de Almagro, Región de Atacama.

La falta de información sobre los sitios de reproducción de esta especie hace que sea casi imposible evaluar el tamaño de la población total, las tendencias poblacionales o identificar amenazas potenciales para la especie. No obstante, se estima que la actividad minera no metálica y la contaminación lumínica afectan los sitios de reproducción de la especie (Drucker & Jaramillo 2013; Brooke 2004). Situando su estado de conservación como Datos insuficientes (BirdLife International

2016a) y como Insuficientemente conocida según el Reglamento de la Ley de Caza (D.S. N° 5/1998 MINAGRI).

La golondrina de Wilson (*Oceanites oceanicus*), es la especie más cosmopolita de los Procellariiformes y, aunque nidifica en el Pacífico sur, se le puede encontrar desde la Antártica hasta el Ártico por las aguas del Océano Atlántico. Brooke (2004), estimó la población reproductora mundial entre 4 y 10 millones de parejas. Esta especie se reproduce en islotes rocosos, en acantilados y entre pedregales. Prefiere alimentarse principalmente en aguas y posee una dieta compuesta principalmente de crustáceos planctónicos (especialmente krill) y peces (Hoyo et al. 1992). Su dieta cambia principalmente de crustáceos durante la formación de huevos a una mayor proporción de peces durante la crianza de pollos y la muda (Quillfeldt et al. 2005).

Aunque la población de la golondrina de Wilson es estable, los depredadores introducidos en los sitios de nidificación, como las ratas y los gatos, todavía presentan un problema en algunos sitios de latitudes más bajas (BirdLife International 2016c). Los metales pesados y los organoclorados representan un riesgo adicional que puede acumularse en los tejidos de las aves. La ingestión de plástico es una preocupación importante, ya que se ha reportado que una gran proporción de adultos y polluelos tienen plástico en el estómago. También ocurren incidentes en los pies de las aves que se enredan en la malla de pesca o líneas de nylon (Moser & Lee 1992).

Quillfeldt (2001), informa un menor éxito reproductivo después de inviernos con bajo nivel de hielo marino, lo que refleja los efectos del cambio climático en esta especie. La especie es considerada internacionalmente como de Menor riesgo (BirdLife International 2016c), mientras que en Chile no ha sido clasificada.

Por su parte, la golondrina de mar chica (*Oceanites gracilis*), se distribuye principalmente en las aguas tropicales de Pacífico sur oriental (Spear & Ainley 2007). Aunque esta especie es numerosa y se encuentra fácilmente, solo se conoce un sitio de reproducción en la Isla Chungungo (provincia de Elqui, Chile). Todos los registros de reproducción conocidos provienen de esta misma pequeña isla (Hertel & Torres-Mura 2003), que se cree que es improbable que albergue muchas parejas adicionales no descubiertas. Esto significa que el paradero de miles, y posiblemente cientos de miles, de parejas nidificantes es un misterio (Tobias et al. 2006).

Sin información sobre sitios de reproducción, amenazas y tendencias en la población, el estado de conservación de la especie es imposible de determinar. Sin embargo, especies exóticas invasoras y disturbios antrópicos (incendios), pueden poner en riesgo a las colonias nidificantes. Al igual que

con las otras golondrinas de mar descritas, las luces provenientes de las ciudades e industrias puede causar atracción y desorientación, provocando colisiones o dejándolas vulnerables a depredadores (BirdLife International 2016b). Esta situación cataloga a la especie con Datos insuficientes (BirdLife International 2016b) y en Chile como Insuficientemente conocida según el Reglamento de la Ley de Caza (D.S. N° 5/1998 MINAGRI).

3.2 Acciones de sensibilización y difusión

Desde el 2010 que la Unidad de Recursos Naturales de la dirección regional del SAG realiza la atención de denuncia rescatando y liberando las cuatro especies involucradas (Anexo 1 y 2). Periódicamente, se generaron campañas de difusión y educación en conjunto con organizaciones comunitarias de la región (Figura 1, 2 y 3). En noviembre del 2016, la Unidad de Recursos Naturales de la dirección regional realizó la primera capacitación para la red de Coordinación de Rescate y Manejo de Fauna Silvestre, donde se invitó a las ONGs, profesionales de área, servicios públicos y público general a conocer la problemática de las especies y coordinar acciones de rescate para la temporada reproductiva. En dicha actividad participaron nueve personas y las ONGs Kaitieki y Desierto de Atacama (Anexo 3). Actualmente, 10 personas y dos ONGs son las que participan reportando individuos y coordinando los rescates de las aves en coordinación con el SAG.





Figura 1 y 2. Acciones de atención de denuncia y liberación de Golondrina de mar.

"Salvemos las Golondrinas de Mar Negra"



La Golondrina de Mar Negra (*Oceanodroma markhami*) es un ave marina que nidifica en cavidades subterráneas de diferentes salares de la región de Tarapacá. Durante los meses de marzo a mayo de cada año los juveniles vuelan desde sus nidos en dirección a la costa, perdiendo su rumbo producto de la desorientación que les provoca la luz de las ciudades.

La Golondrina de Mar de Collar (*Oceanodroma hornbyi*) y la Golondrina de Mar Chica (*Oceanites gracilis*), son dos especies que también se ven afectadas por la atracción luminica. Estas aves caen en diferentes puntos de la región entre los meses de julio a septiembre de cada año.

¿Cómo ayudar en caso de encontrar una Golondrina de Mar en la vía pública?

- Tómeela delicadamente y guárdela en una caja oscura con ventilación.
- No le de agua ni alimentos.
- Aléjela de animales domésticos y ruidos.
- Contactarse con las oficinas del SAG.

www.sag.cl
 Email: contacto.tarapaca@sag.gob.cl
 Teléfonos: 572- 505480/ 572- 505481.

Stíganos en:

 @sagchile
  sagminagri
  SAGChile
  @sagchile
  sag-chile
  SAG Chile

Servicio Agrícola y Ganadero
Región de Tarapacá

Cuidemos Nuestra Fauna Silvestre




CHILE LO HACEMOS TODOS

Figura 3. Díptico de la Unidad de Recursos Naturales Renovables entregado a la comunidad.

En Chile, la Red de Observadores de Aves y Vida Silvestre de Chile (ROC) ha sido un importante impulsor de la divulgación y generación de nuevo conocimiento de las golondrinas de mar. A través de su proyecto “Golondrinas del Desierto”, la ROC se propuso el desafío de encontrar colonias de nidificación de estas golondrinas de mar en el norte del país, abarcando las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta. De esta manera, esperan encontrar nuevas colonias, generar conocimiento sobre su biología reproductiva y aportar en la evaluación del impacto de proyectos industriales que puedan afectar a las especies. Asimismo, el SAG de la región de Tarapacá, tiene dentro de sus compromisos la generación de un estudio que entregue antecedentes sobre la distribución y características de las poblaciones de golondrinas de mar en la región, con el fin de contar con un estudio actualizado para los procesos de evaluación de proyectos que ingresan al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental SEIA.

3.3 La Brigada Canina como una herramienta para la detección de sitios de nidificación

La discriminación de olor en perros ha sido bien documentada y los canes se usan todos los días para detectar e identificar objetos específicos o elementos traza incluyendo personas vivas, restos humanos, aceleradores, narcóticos y plagas (Beebe et al. 2016). El olfato es claramente un sistema sensorial clave para todos los perros detectores de olores, independientemente del contexto. Se ha verificado la importancia del olfato en un ambiente controlado cuando demostraron que los perros no variaban sus métodos de búsqueda ni su éxito de detección de explosivos, independientemente de si las condiciones de luz lo hacían obvio o no (Gazit & Terkel 2003).

Desde el año 2005, el SAG utiliza exitosamente a la Brigada Canina (BRICAN) como parte de su estrategia integrada en los controles fronterizos de mayor riesgo de ingreso de plagas de los vegetales y enfermedades de los animales. En promedio, los equipos de trabajo tienen un abanico de aromas de más de 20 diferentes productos de interés para el SAG, entre los que se encuentran: pomáceas (manzanas), cítricos (limones, naranjas), mango, chirimoyas, carnes (vacuno y pollo), cecinas y quesos. Los canes también tienen la capacidad de detectar aromas asociados a animales que puedan estar siendo ingresando clandestinamente como, tortugas, quirquinchos, monos y loros. Un perro puede llegar a detectar más de 70 aromas y puede trabajar hasta dos horas y media sin descanso con una leve baja del rendimiento y motivación (Kurrer 2009).

El uso de perros en la detección para la conservación surgió por primera vez en la década de 1890, cuando los perros se utilizaron con éxito para localizar el kiwi de Nueva Zelanda (*Apteryx spp.*) y el kakapo (*Strigops habroptilus*). Y hasta principios de la década de 1990, los perros de detección para la conservación o *conservation detection dogs* (CDD) fueron utilizados principalmente en la detección de aves vivas (Robert & Laporte 1994). Sin embargo, este método es actualmente utilizado para detectar fecas, carcasas y nidos (Beebe et al. 2016).

Varios trabajos indican que, en muchos casos, las CDD son más eficientes que muchos otros métodos de muestreo para detectar la presencia/ausencia y abundancia relativa de plantas y fauna silvestre (Beebe et al. 2016; Reed et al. 2011; Nussear et al. 2008). Utilizándose incluso bajo condiciones de extrema aridez y localizando especies de hábitos subterráneos (Cablk et al. 2006). Dada las características de esta especie y las condiciones en las cuales realiza su nidificación, se solicitó a la División de Asuntos Internacionales del SAG Central la posibilidad de que los canes detectores de la Brigada Canina Regional pudiesen participar de las campañas de búsqueda de nidos, con la finalidad de realizar un trabajo innovador e inédito en Chile.

4. MÉTODO

4.1 Área de estudio

Durante el año 2018, se visitaron los mismos sitios de años anteriores, ver Tabla 1 (Salar Caleta Buena, Salar del Carmen, Salar Soronal y Salar Grande) y se agregaron nuevos sitios de prospección, los cuales fueron los siguientes: Quebrada Chiza, Quebrada Tiliviche, Quebrada Tana, Quiuña, Pisagua y Quebrada El Loa (Fig 4). Estos sitios se encuentran ubicados entre los cuatro y veinticinco kilómetros del borde costero y entre los 400 y 900 msnm. Estos lugares corresponden en su mayoría a depósitos de sales, que se encuentran tanto en cuencas y depresiones de la cordillera de la Costa, como en el sector occidental de la depresión Central. En la cordillera de la Costa, conforman salares desprovistos de vegetación, con extensiones de distinta magnitud, caracterizados por un clima hiperárido, con casi nulas precipitaciones y nubosidad abundante que en el sector occidental de la cordillera de la Costa se presenta frecuentemente como densas nieblas, denominadas localmente “camanchaca” (Luebert & Plischoff 2006).

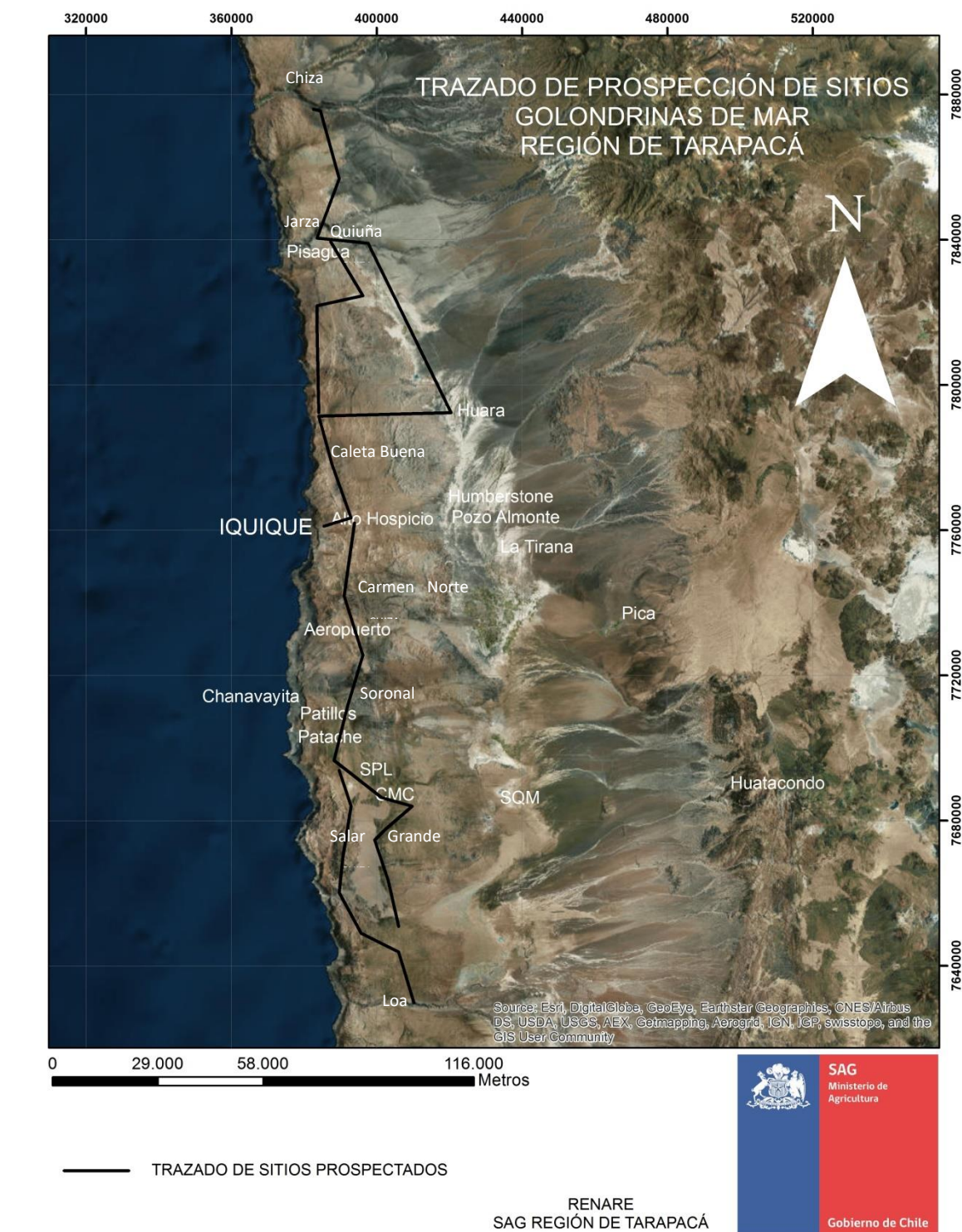


Figura 4. Sitios y transectos prospectados en el periodo del estudio.

A unos 90 kilómetros al norte de Iquique, se ubica el sector de la Quebrada de Tana se ubica al norte de la localidad de Huara, tiene una longitud de 140 kilómetros aproximadamente, desde su inicio en los alrededores del cerro Pumire en la Cordillera hasta la confluencia con la quebrada de Tiliviche. Una vez que se junta con Tiliviche adopta el nombre de esta última en la localidad de Quiuña, para luego dirigirse en dirección a la localidad de Pisagua ubicada a unos 16 kilómetros más abajo.

Esta quebrada se caracteriza por un clima templado y generalmente poco lluvioso durante el año, a excepción de los meses de verano o temporada estival, en donde se producen las lluvias del invierno altiplánico, comúnmente conocido como invierno boliviano llenando la quebrada de agua superficial que escurre hasta el mar.

A 15,6 km al noreste de la ciudad de Iquique, en el km 15 de la ruta A-514 que una la comuna de Alto Hospicio con Caleta Buena se encuentra un depósito salino de pequeño tamaño (ca. 0.36 km²), el cual, será designado como salar caleta buena, en el presente informe. El salar se ubica a 6 km de la costa y a 570 msnm. Litográficamente, se caracteriza porque sus halitas son onduladas y se encuentran altamente entremezcladas con formaciones clásticas lenticulares probablemente asociado a depósitos aluvionales provenientes desde el este (Sepúlveda et al. 2014). Este Salar fue descubierto como sitio de nidificación de golondrinas de Mar por profesionales de la ROC y posteriormente monitoreado por el SAG Tarapacá.

El Salar del Carmen Norte se encuentra a unos 23 km al sureste de la ciudad de Iquique y a 12 km de la costa. Es una formación salina compuesta principalmente por haluros y sulfatos subordinados dispuestos a 830 msnm. El salar Soronal (ca. 10 km²) se ubica a 43 km lineales de Iquique y 21 km de la costa. Corresponde a un depósito salino que se encuentra a 746 msnm y que ha sido anteriormente explotado por la Oficina Gloria, donde aún permanecen sus ruinas. Su litofacies se presenta como una costra potente, de más de 1 m de espesor, y de superficie relativamente regular; a su vez distingue una costra central con gruesas resquebrajaduras y ondulaciones métricas, de amplio radio de curvatura, rodeada por otra consistente en terrones con nódulos arriñonados (Sepúlveda et al. 2014).

Por otro lado, el Salar Grande (ca. 3000 km²) se ubica a los 697 msnm, a unos 63 km al suroeste de la ciudad de Iquique y a 27 km de la costa. Su litofacies de cloruros fue depositada como relleno de

una extensa cuenca de 45 km de largo por 4-5 km de ancho casi exclusivamente con halita masiva, la que alcanza el 99% de pureza. En superficie, los depósitos se presentan como una costra de halita uniforme, de color pardo claro debido a la presencia a una fina capa de arenas de origen eólico que la cubre casi totalmente. Además, presenta estructuras poligonales macroscópicas que se extienden como fracturas en profundidad (Sepúlveda et al. 2014).

Por último la Quebrada del río Loa, obedece a un río, con 440 Km. desde su nacimiento en la cordillera de los Andes en las vegas que rodean las faldas del Volcán Miño (Demetrio, 1989), hasta llegar a su desembocadura en el Océano Pacífico.

Especial relevancia, tiene la zona de la desembocadura del río Loa, la cual se caracteriza por ser un área de reclutamiento de diversas especies de vertebrados e invertebrados acuáticos, entre las cuales se encuentran peces pelágicos de importancia comercial en el sector marino y camarones de río en la zona estuarina. El sector marino de la desembocadura del río Loa es una de las principales áreas de desove de la zona norte de especies tales como anchovetas, sardina y al menos otras 20 especies de peces litorales tales como corvinas, lizas, pejerrey, sargo, corvinilla, entre otros CONAMA (1997).

Las principales actividades industriales que se encuentran asociadas a la cuenca del río Loa, están referidas a la minería. La mayoría de éstas utilizan las aguas del río Loa en sus procesos y algunas industrias descargan sus residuos líquidos, tratados o no, directa e indirectamente al río Loa.

4.2 Obtención de datos

Durante diciembre 2016 a diciembre 2018, se utilizaron 33 jornadas/hombre (Tabla 1), para la búsqueda y descripción de sitios de nidificación de golondrinas de mar. En todos los sectores se realizaron prospecciones en camioneta y recorrido pedestre buscando potenciales sitios de nidificación. Se seleccionaron sitios de planicie al interior de cada sector, donde la concentración de halitas era dominante. También se seleccionaron sitios de borde con pendiente, correspondiente a zonas de transición entre el salar y los depósitos aluvionales. Ambos sitios seleccionados de cada sector fueron revisados intensivamente por tres funcionarios de la Unidad RENARE de SAG regional, en busca de cavidades. Cuando un sitio con cavidades era detectado, se procedía a revisar, registrando la presencia del olor característico de estas aves, así como restos de carcasas, plumas,



fecas, cáscaras de huevo y comida (Torres-Mura & Lemus 2013). Los horarios de búsqueda comprenden principalmente horas diurnas (07:00am a 21:00hrs), sin embargo igualmente se realizaron muestreos nocturnos en horario de actividad de la especie (21:00hrs a 04:00hrs). La confirmación de la presencia de individuos o huevos se realizó a través de playback y de la cámara sonda de inspección Ridgid micro CA-300 (Anexo 4).

Para el caso particular de la especie *O. markhami*, se tomaron registros de periodos reproductivos diferentes, estos datos corresponden a los periodos nov 2016 a abr 2017, nov 2017 a abr 2018, oct 2018 a dic 2018.

Se definirá para efectos de descripción dos tipos de nidos:

Nido activo: el cual corresponderá a nidos con cuidado parental, entiéndase con polluelos y/o con adultos en periodo de incubación. También se considerara como activo a respuesta positiva a *playback* (vocalización del adulto dentro del nido)

Nido inactivo o abandonado: Se entiende por nidos con restos de plumaje y/o carcasas y/o restos de huevos y/u olor y/o restos de fecas, todo lo anterior relativo a la familia Hydrobatidae.

Los terrenos se realizaron las siguientes fechas:

Fecha	Sitio prospectado	Tipo de registro
09-12-2016	Caleta Buena	Sonda, Olor
27-12-2016	Caleta Buena	Sonda, Olor
05-12-2017	Salar Carmen, Soronal, Salar Grande	Sonda, Olor, Playback, Canes
07-12-2017	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback, Canes
08-12-2017	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback, Canes
11-12-2017	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback
10-01-2018	Salar Carmen, Soronal, Salar Grande	Sonda, Olor, Playback, Canes
17-01-2018	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback, Canes
19-01-2018	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback
24-01-2018	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback, Canes
31-01-2018	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback
07-02-2018	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback
08-02-2018	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback, Canes
01-03-2018	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback
02-03-2018	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback
15-03-2018	Quebrada Tana	Sonda, Olor, Playback
22-03-2018	Caleta Buena, Tana, Tiliviche	Sonda, Olor, Playback
27-03-2018	Caleta Buena, Tana, Tiliviche	Sonda, Olor, Playback
28-03-2018	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback
03-04-2018	Quebrada Tana, Quiuña	Sonda, Olor, Playback, Canes
17-04-2018	Salar Grande, Loa	Sonda, Olor, Playback
03-05-2018	Caltea Buena, Salar Grande	Sonda, Olor, Playback
04-09-2018	Jarza Chiza	Sonda, Olor, Playback
12-09-2018	Quebrada Tana, Chiza	Sonda, Olor, Playback
17-10-2018	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback
14-11-2018	Quebrada Tana, Quiuña	Sonda, Olor, Playback
16-11-2018	Loa	Sonda, Olor, Playback
29-11-2018	Caleta Buena, Quiuña	Sonda, Olor, Playback
03-12-2018	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback, Canes
06-12-2018	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback, Canes
17-12-2018	Quiuña	Sonda, Olor, Playback, Canes
21-12-2018	Quiuña	Sonda, Olor, Playback
26-12-2018	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback

Tabla 1. Jornadas ocupadas para la detección y descripción de sitios de nidificación de golondrinas de mar en la Región de Tarapacá, durante los años 2016-2018.

4.2.1 Detección de presencia/ausencia

Para la determinación de presencia o ausencia de individuos de golondrina de mar, se realizaron pruebas con *playback* obtenidas de las trampas cámaras. Éstos se aplicaron en todos los sitios durante prospecciones diurnas a la entrada de la cavidad, mientras que durante la noche las reproducciones de *playback* fueron dirigidos hacia el ambiente, con el fin de detectar individuos volando. En cada punto se realizó un máximo de tres reproducciones seguidas de dos minutos de espera, considerando los resultados obtenidos a la fecha con los terrenos.

En Quebrada de Quiuña, Salar Grande, Caleta Buena y Quebrada Loa también se realizaron pruebas con la Brigada Canina provenientes de la BRICAN (Anexo 5). El perro utilizado corresponde a una hembra de raza labrador, con dos años de edad, la cual fue entrenada con plumas y restos de *O. markhami*. Sin embargo, éste ya tenía implantado el olor de plumas de loro producto de sus labores cotidianas en instalaciones de frontera.

Los trabajos de la Brigada Canina se realizaron en horario diurno entre las 17:00-20:30hrs con el fin de no generar una afectación por razones de temperatura a las que se expone el can detector en terreno. La primera prueba con canes se realizó en salar Caleta Buena, donde se verificaron nidos y zonas sin nidificación. Por otro lado, en Salar Grande se inspeccionó, sitios con y sin registros de nidificación. El método de búsqueda de nidos, la realiza primeramente el perro acompañado de su entrenador, una vez que el perro marca la existencia de un nido, se acerca un investigador quien verifica la existencia de olor característico de la especie, posteriormente se verifica mediante playback y finalmente con cámara de inspección los nidos marcados por el can detector. Los sitios inspeccionados por perros no presentaban evidencias de la presencia de otros depredadores caninos y fueron monitoreados posteriormente para evaluar posibles impactos de este método (Brigada Canina) en el éxito reproductivo. Por lo anterior, y no habiendo literatura específica al respecto, se propuso inspeccionar y dar seguimiento a un total de 6 nidos registrados por los canes detectores, 3 nidos del Salar Grande y 3 nidos del Salar de Caleta Buena, en cada uno de estos nidos fue instalada una cámara trampa y fueron monitoreados por sonda hasta el término de la temporada. Una vez terminada la época reproductiva, se verificó su éxito reproductivo y fueron comparados con el resto de los nidos que no fueron detectados por el método de Brigada Canina, de manera de descartar cualquier afectación al sitio de nidificación. Igualmente se tiene antecedentes de que las colonias de golondrinas de mar, tienen un moderado grado de adaptación a los disturbios en la superficie, razón por la cual no generaría afectación significativa en los nidos (Soldatini et al 2015.)

4.2.2 Características morfológicas y hábitos reproductivos

De acuerdo a la información obtenida de los diferentes individuos rescatados producto de la atención de denuncia entre 2010 y 2018, se obtuvo las características biométricas de los individuos. Las mediciones fueron realizadas por funcionarios del Servicio a individuos rescatados y derivados

a las oficinas del SAG. Todas las mediciones se realizaron bajo el alero del protocolo de anillamiento del Sistema Nacional de Anillamiento de Aves Silvestres (SNAA-SAG).

Para obtener información de los hábitos y periodos de actividad de la especie, se instalaron seis cámaras trampa (Bushnell Trophy HD) entre el 8 de diciembre de 2017 y el 17 de abril de 2018. Tres cámaras en salar Caleta Buena y otras tres en Salar Grande. Las trampas se programaron para obtener videos de entre 10 y 60 segundos.

Además, en cada nido activo se registró la temperatura (°C) en diferentes horas (Anexo 7) para el rango de días entre el 5 y 16 de diciembre de 2017. Las mediciones se realizaron con un termómetro láser infrarrojo (-50°C ~ 750°C) sobre la superficie, inmediatamente al exterior del nido y al interior del mismo. Las mediciones fueron realizadas en tres horarios diferentes, por la noche (21:44 – 22:38), mediodía (13:34 – 15:20) y crepúsculo (18:30 – 19:12).

5. RESULTADOS

5.1 Reportes de incidentes en la Región de Tarapacá

Desde el año 2010 que la Unidad de Recursos Naturales de la dirección regional del SAG realiza la atención de denuncia y liberación de las cuatro especies involucradas. Los individuos son ingresados al Servicio a través del formulario de movimiento de fauna silvestre, donde son examinados para luego ser liberados al mar en sectores lejos de contaminación lumínica. La liberación se realiza en el sector sur de la ciudad de Iquique, en horario nocturno, las aves son dejadas en el borde costero para que ellas por su propia voluntad puedan emprender vuelo mar adentro. Asimismo, nuestro Servicio recibe anualmente los reportes de incidentes de empresas que operan en el Salar Grande, con la finalidad de mantener un registro de las contingencias asociadas a proyectos ingresados al SEIA. Esta información es pública, ya que es enviada por cada una de las empresas al sistema de la Superintendencia de Medio Ambiente.

5.1.1 Incidentes con instalaciones lumínicas

Entre el 2010 y 2018 el SAG Regional cuenta con un registro de un total de 8.331 individuos, de los cuales un total de 5.655 provienen de registros entregados por empresas privadas, donde la especie con mayor número de reportes fue *O. markhami*, quien representa el 98% (n=8.167) del total de

individuos rescatados. Le siguen *O. hornbyi*, con un 1.71% (n=143) de ejemplares rescatados y, por último, *O. gracilis* y *O. oceanicus*, las cuales representan sólo un 0.2% (n=20) y 0.01% (n=1) del total.

La tendencia de atención de denuncia ha ido en aumento desde el 2010, sin embargo, desde el 2014 se presentó un aumento del número de individuos rescatados (Fig. 5). *O. markhami* fue la especie más abundante en los rescates, seguida por *O. hornbyi* la cual ha sido rescatada frecuentemente desde el 2010. *O. gracilis* ha sido registrada en los años 2012, 2014, 2017 y 2018, mientras que *O. oceanicus* sólo fue registrada con un individuo el año 2010.

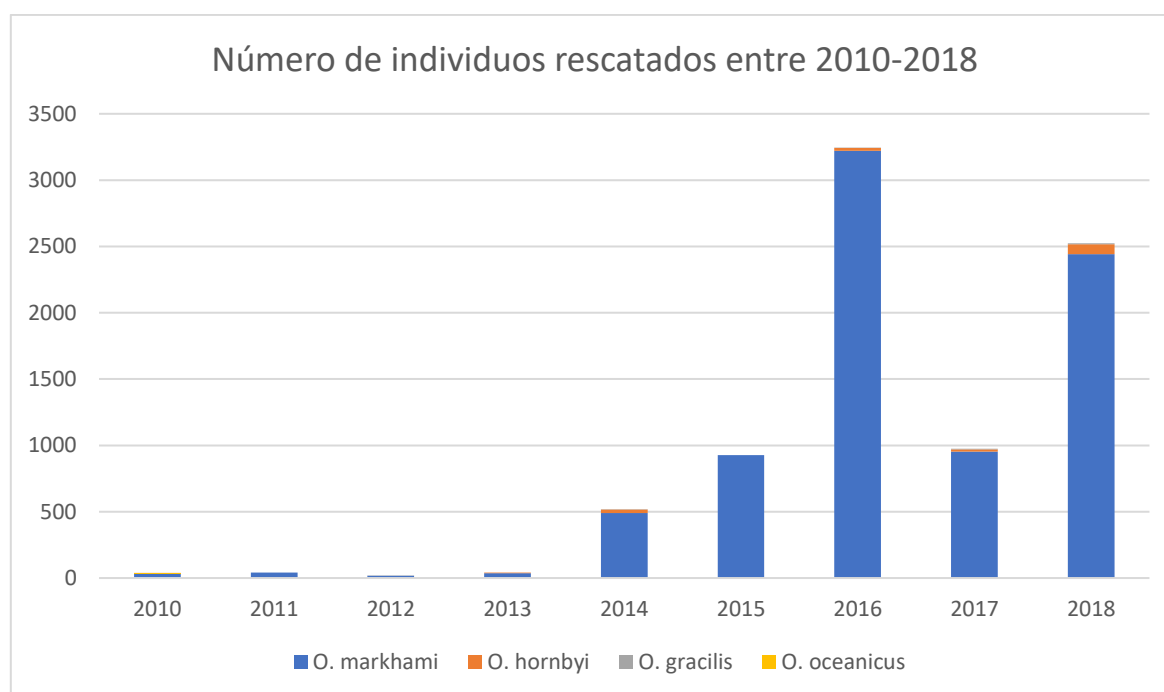


Figura 5. Número total de individuos rescatados de la Región de Tarapacá, durante los años 2010-2018.

Por otro lado, los reportes de especies se distribuyen heterogéneamente durante el año (Fig. 6). *O. markhami* es la especie que se registró más ampliamente durante el año (8 meses). Esta especie tuvo la mayor cantidad de rescates producto de la atención de denuncia entre los meses de marzo a mayo, correspondiendo es su mayoría a individuos en etapa de juvenil. *O. hornbyi* fue registrada durante 7 meses, sin embargo, durante marzo, abril y mayo sólo fue reportada en pequeñas proporciones, dominando el número de reportes entre junio y septiembre. Los individuos de *O. gracilis* fueron reportados en un total de 8 meses, registrándose principalmente entre agosto y diciembre. El único individuo de *O. oceanicus* fue rescatado durante el mes de agosto.

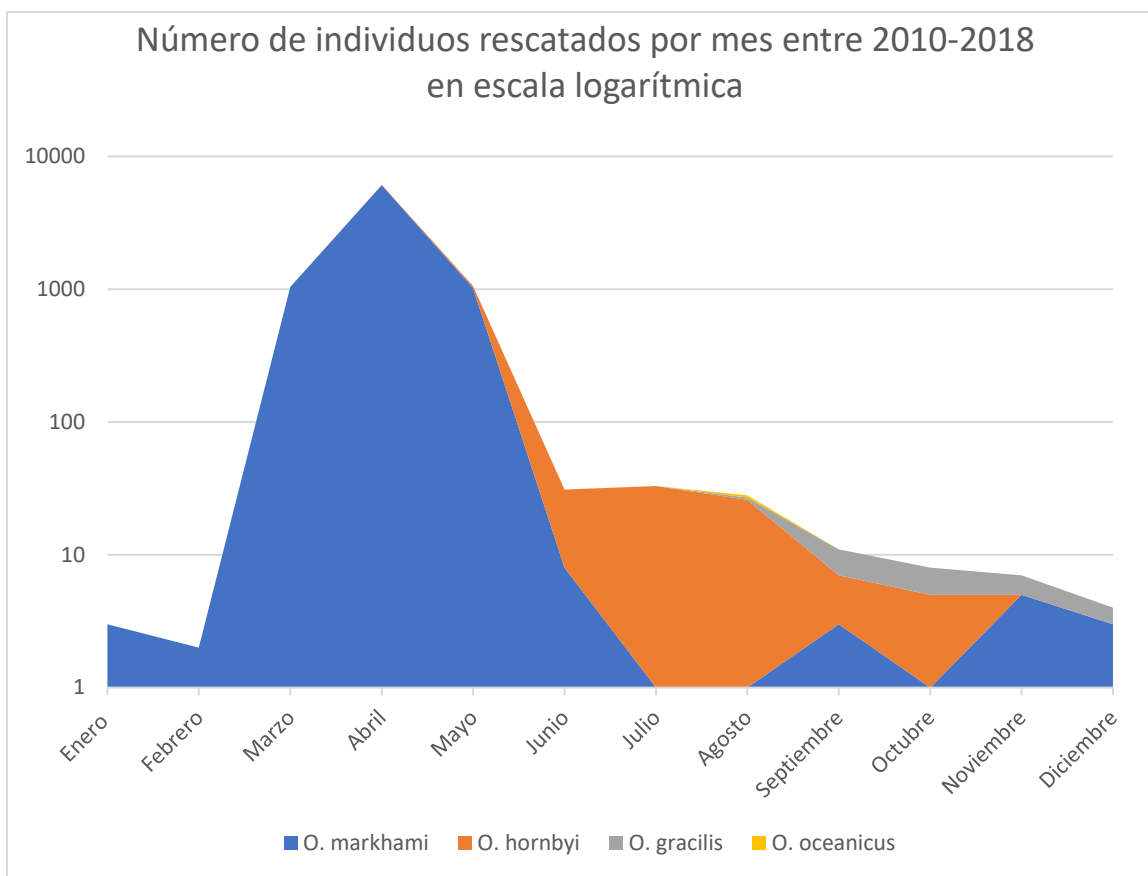


Figura 6. Número mensual de especies de golondrinas reportadas en incidentes en la Región de Tarapacá, durante los años 2010-2018.

Especialmente, los individuos reportados durante el periodo de estudio fueron rescatados desde las comunas de Iquique (radio urbano), con el 29.08% (n=2.423) de los individuos. Alto Hospicio, con el 2.3% (n=179), seguidas por localidades costeras del Salar Grande 0.25% (n=21) y Pozo Almonte con el 0.23% (n=19). También hubo registros en las localidades de Chanavayita, Patillos, Aeropuerto Diego Aracena, Huara, Huatacondo, Humberstone, La Tirana y Pica. (Fig. 7)

El otro grupo de golondrinas reportadas, corresponde a las faenas industriales del Salar Grande, dentro de las cuales se encuentra la Sociedad Minera Punta de Lobos S.A. (SPL) y La Compañía Minera Cordillera. En el caso de SPL durante el año 2015, reportó colisiones de 747 individuos correspondientes a la especie *O. markhami*. Durante el 2016 los incidentes se concentraron entre los meses de marzo a mayo (Fig. 6), reportándose 2601 aves vivas y 303 muertas con un total de 2904 para ese año. Por otro lado, los reportes 2017 y 2018 muestran un total de 795 incidentes y 760 incidentes respectivamente. Las colisiones provienen en su mayoría de las instalaciones del sector mina y planta (Anexo 8 y 9), ubicadas al interior del Salar Grande. En el caso de la Minera

Cordillera, reportaron un total 449 individuos durante el año 2018, no teniendo registros de años anteriores. (Fig. 8)

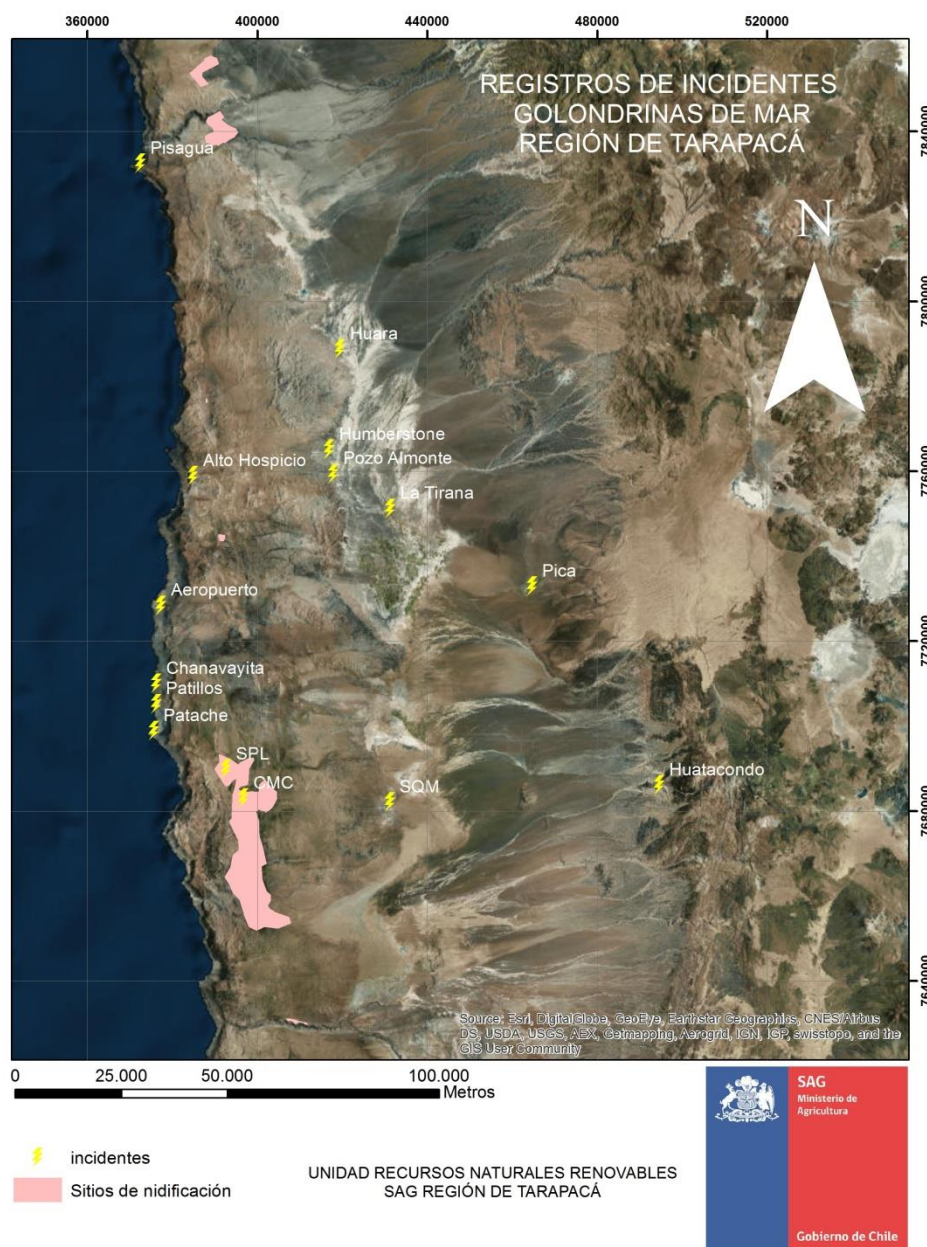


Figura 7. Mapa de incidentes con golondrinas de mar, durante el periodo de estudio en la Región de Tarapacá.



Figura 8. Número de individuos de golondrinas rescatadas en diferentes sitios de la Región de Tarapacá, entre los años 2010-2018.

Los rescates producto de la atención de denuncia de *O. markhami* provinieron desde todos los sitios mencionados (Fig. 9). Siendo mayoritario su reporte los registros de SPL con un total de 63% ($n=5.206$), seguido por el radio urbano de la ciudad de Iquique, donde concentra el 28% ($n=2.291$) de los registros y por último la faena minera Cordillera con un 5.5% ($n=449$). Por otro lado, *O. hornbyi* fue reportado en Iquique, con el 79% ($n=113$), en Alto Hospicio, con el 18% ($n=26$) y en Pozo Almonte con 3 individuos. Mientras que, *O. gracilis* y *O. oceanicus* fueron reportados sólo en el radio urbano de Iquique. Se hace mención que el 90% de los individuos rescatados en la ciudad de Iquique, provienen del sector del paseo costero de Playa Brava y Cavancha. Durante el año 2018, individuos marcados y liberados en el sector de Patillos ubicado a 50km al sur de la ciudad, se encontraron al día siguiente en el paseo costero de Playa brava de la ciudad de Iquique.

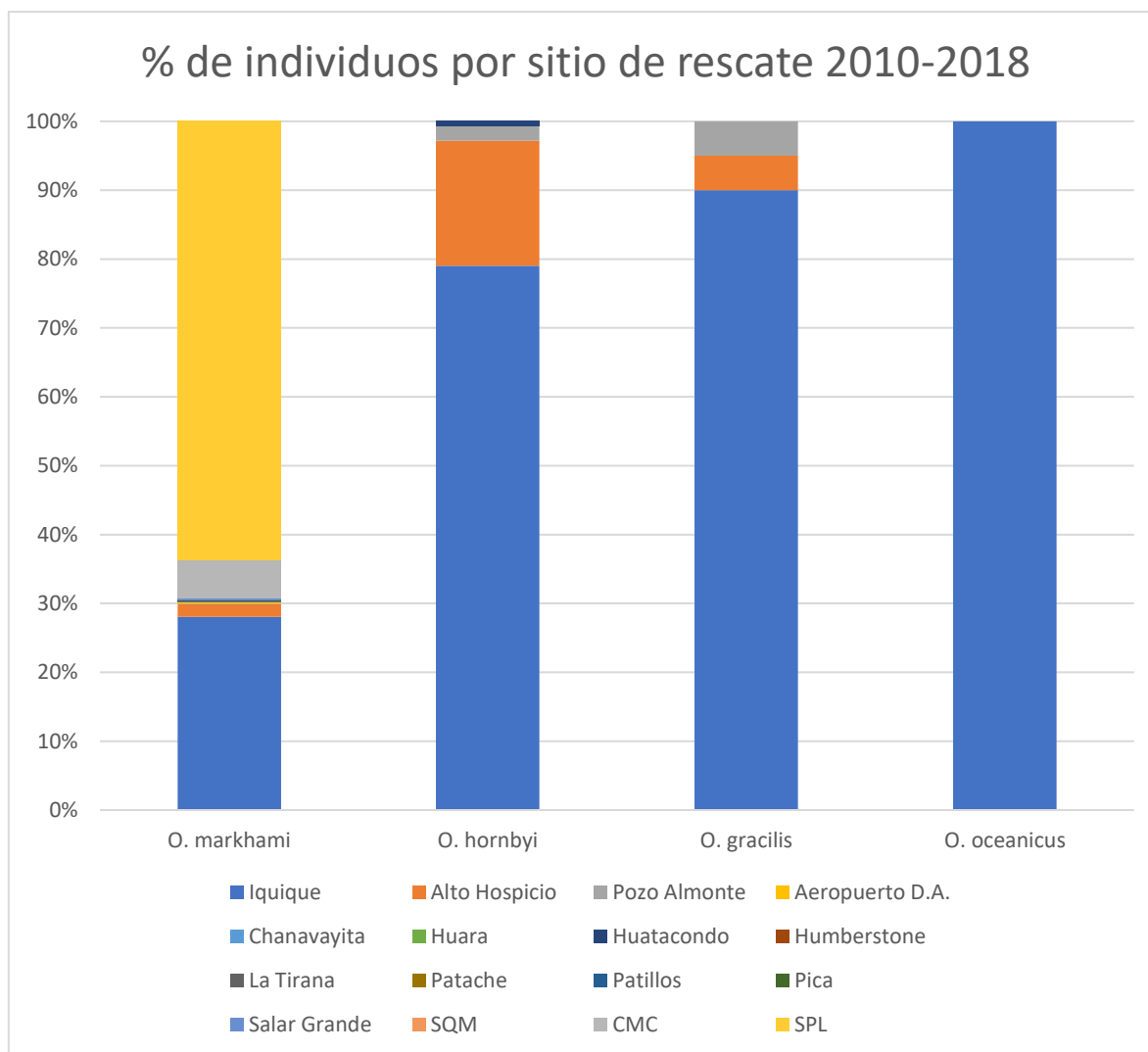


Figura 9. Porcentaje de individuos por sitios rescatados en diferentes lugares de la Región de Tarapacá, entre los años 2010-2018.

5.2 Prospecciones e identificación de sitios de nidificación

5.2.1 Caracterización de los sitios prospectados

Durante el periodo de estudio se identificaron potencialmente seis sitios de nidificación. Al prospectar los sitios en cuestión, tres fueron identificados con colonias reproductivas activas, al momento de la visita. Estos sitios correspondieron a la especie *O. markhami*, ubicados en Quiuña, Salar Caleta Buena y Salar Grande. Además, se identificaron potenciales sitios de nidificación en Jarza, Salar del Carmen Norte y Loa (Fig. 10).



Figura 10. Mapa de los sitios prospectados durante el periodo de estudio.

En el sector de Jarza, se identificaron dos puntos de nidificación inactivos, con olor y restos de plumaje pero sin adulto, huevo o polluelo, por lo cual se determinó como sitio de nidificación de especie indeterminada (Fig. 11).

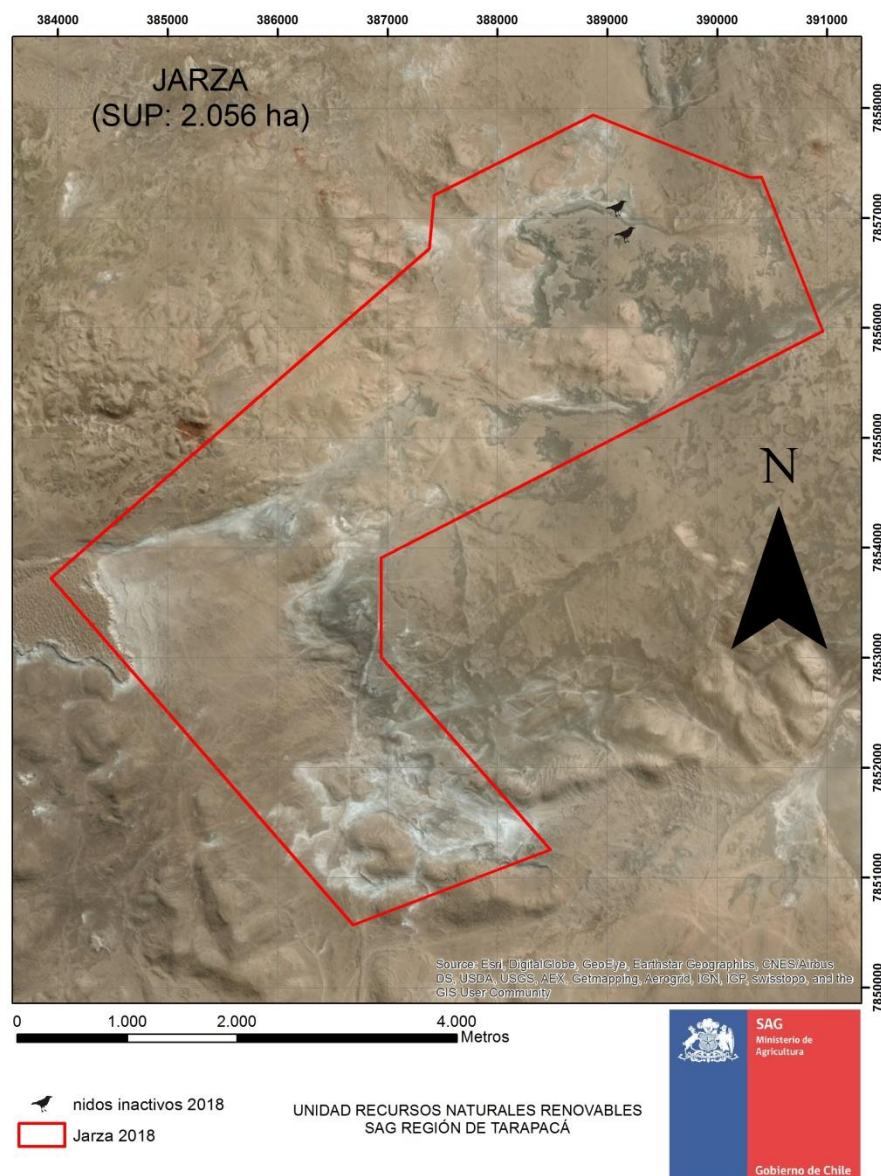


Figura 11. Ubicación de nidos inactivos del sector de Jarza prospectados durante el periodo de estudio.

El sector de Quiuña, fue identificado en campañas marzo y abril de 2018, en dichas prospecciones se encontraron signos de nidos abandonados y huevos sin eclosionar (Fig. 12). En terreno realizado el día 14 de noviembre de 2018 se detecta uno de los nidos con un polluelo de O. Markhami de varias semanas de edad (Fig. 13). En total se contabilizaron seis nidos en este sector.

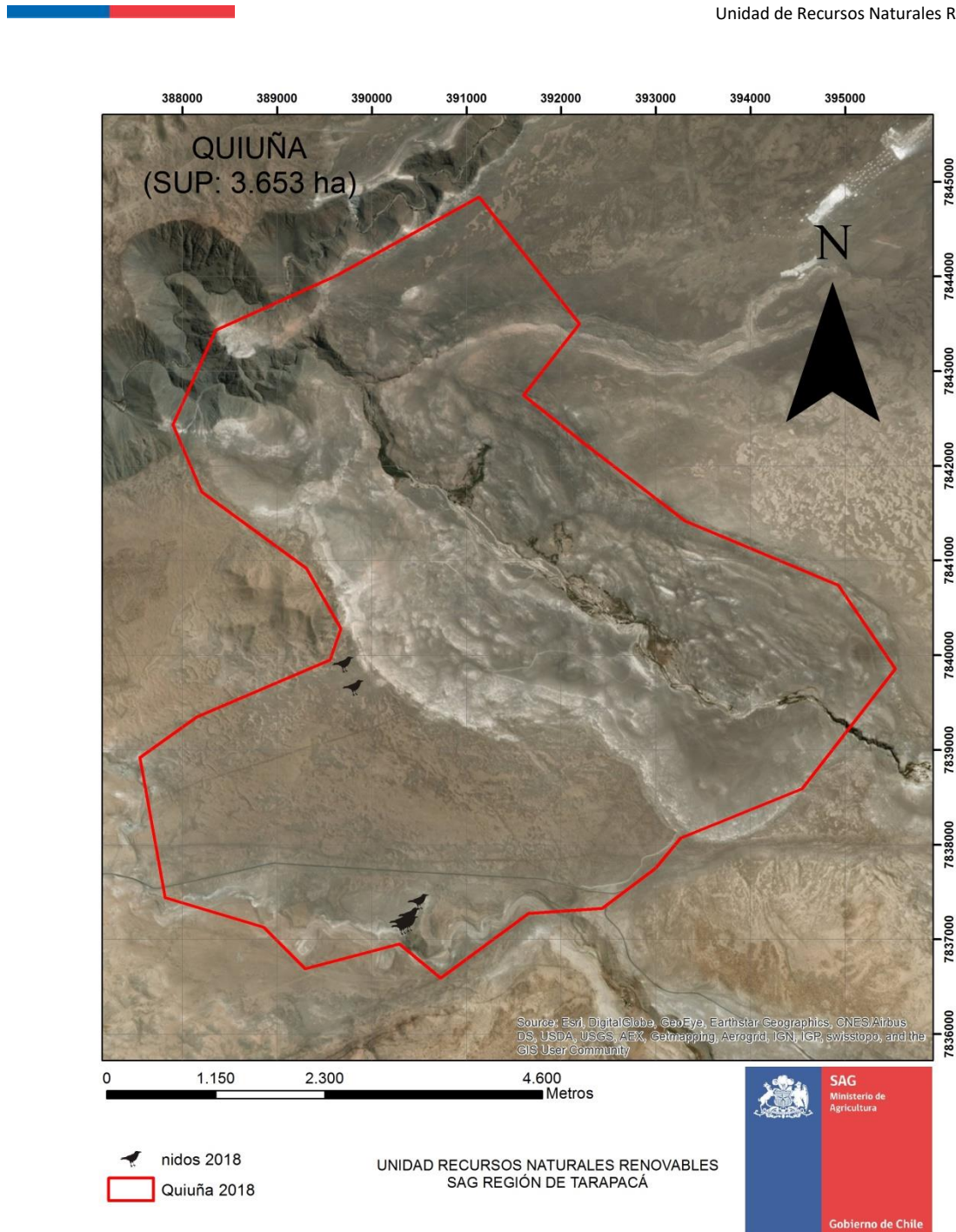


Figura 12. Ubicación de nidos activos del sector de Quiuña prospectados durante el periodo de estudio.



Fig.13. Polluelo de *O.markhami*, en sector Quiuña.

En el salar Caleta Buena se detectaron tres nidos durante el periodo nov 2016 a abril 2017, el periodo nov 2017 a abril 2018 se contabilizaron 30 nidos y en el último periodo comprendido entre los meses de octubre 2018 a diciembre 2018 se detectaron un total de 102 nidos. (Fig. 14). El inicio del periodo reproductivo 2018 se inició el día 14 de noviembre (Fig. 15). De acuerdo a lo observado a través de videos obtenidos mediante cámaras trampas, los nidos monitoreados no presentaron variaciones o interrupciones en ciclo reproductivo producto de la utilización del método de búsqueda con Brigada Canina.

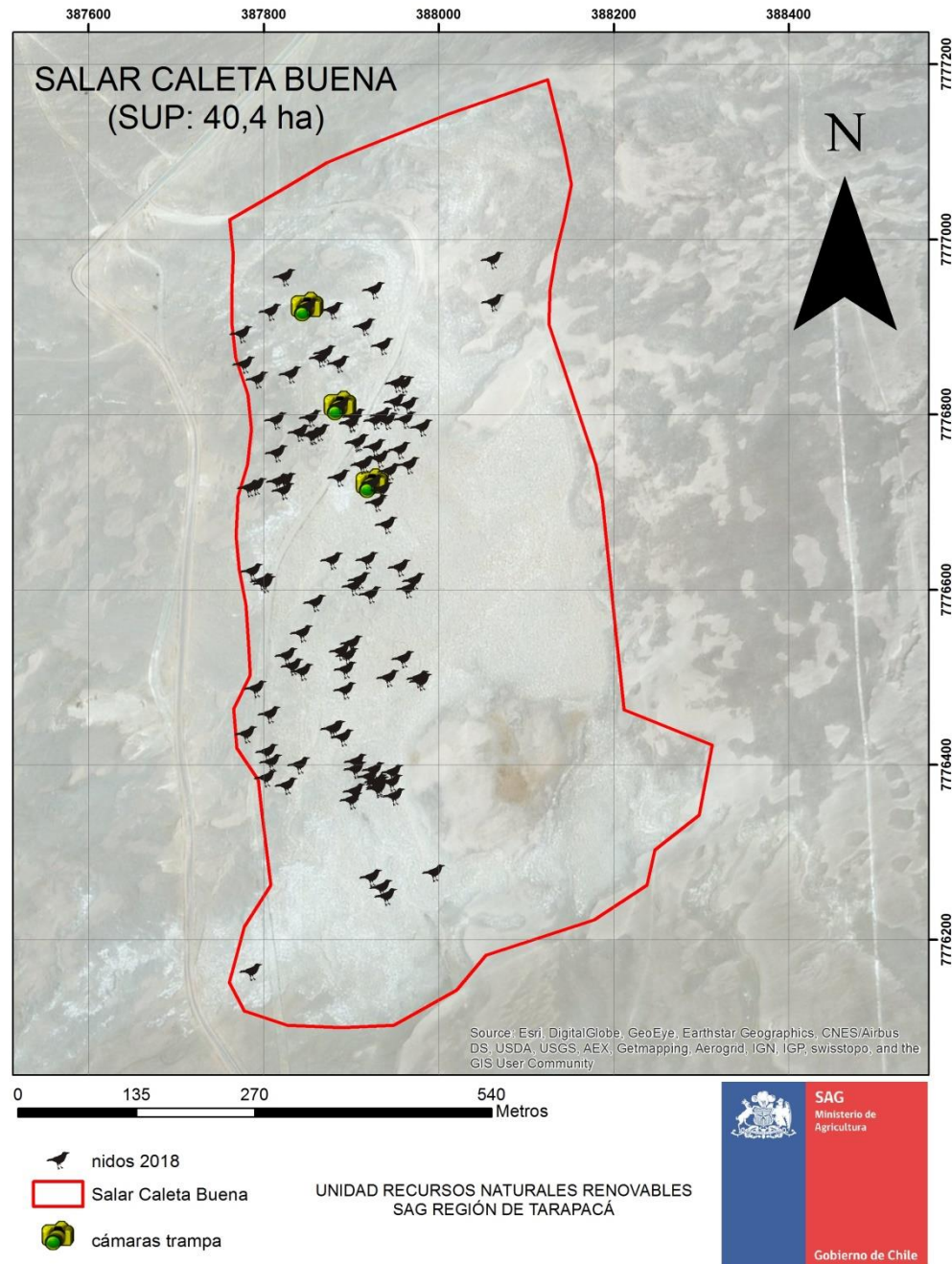


Figura 14. Ubicación de nidos activos del Salar Caleta Buena, prospectados durante noviembre-diciembre 2018.



Fig. 15. Adulto y huevo de *O.markhami*, en Salar Caleta Buena.

En el Salar Carmen Norte se registró un nido activo detectado el 5 de diciembre del año 2017 mediante *playback* de *O. markhami*, adicional a lo anterior, se hallaron cavidades con restos de pluma, fecas y olor característico al norte del segundo. Un grupo de cavidades se encontraron en una planicie marginal del salar, mientras que otra concentración de cavidades con restos fue registrado al sur del primero, en una zona con alta pendiente y de exposición al sur (Fig. 16).

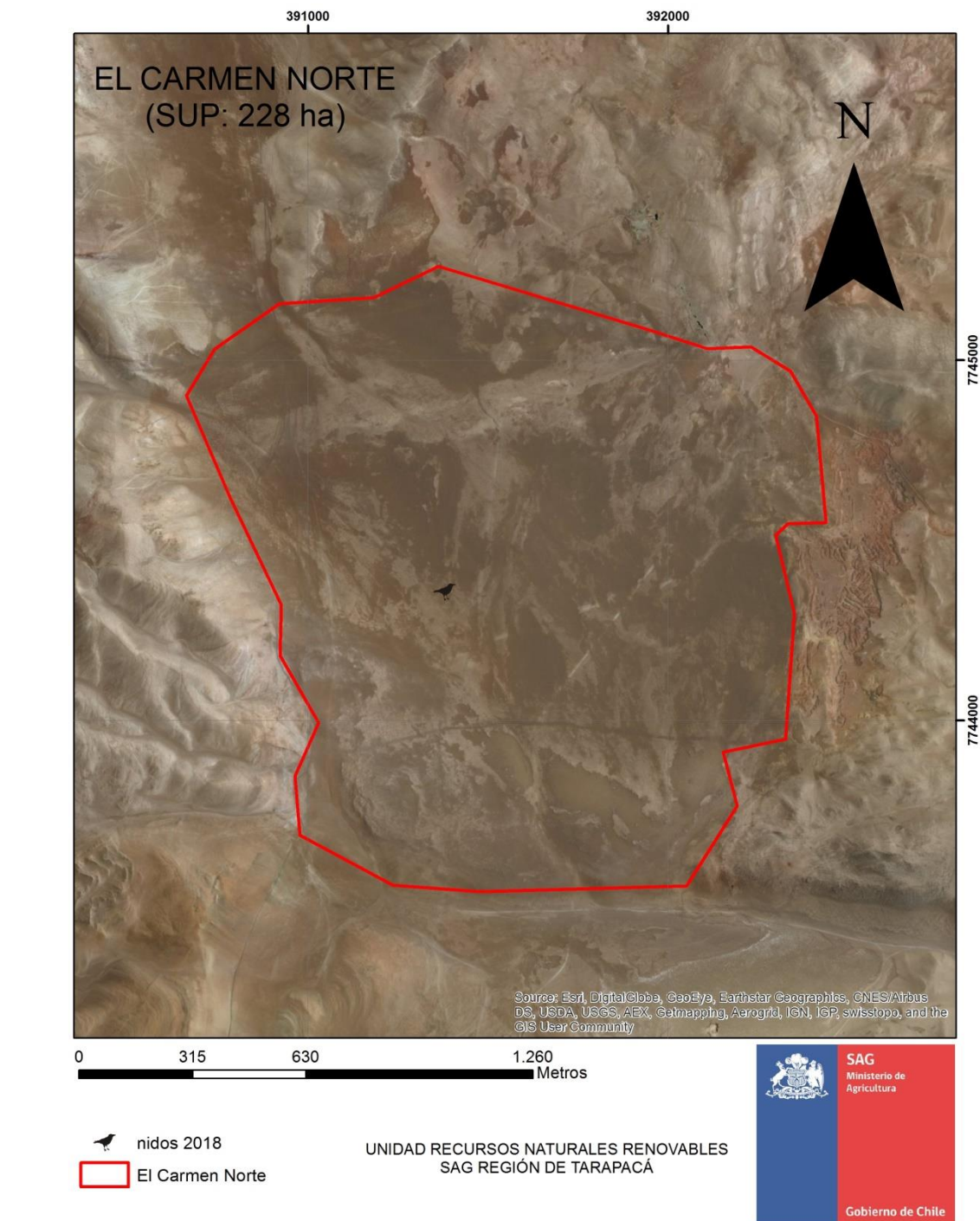


Figura 16. Ubicación de nido activo, del Salar Carmen Norte, prospectado durante el periodo de estudio

En el Salar Grande, se detectaron 46 nidos activos durante el periodo nov 2017 a abril 2018 y en el periodo octubre 2018 a diciembre 2018 se contabilizaron 7 nidos activos sumando un total de 53 nidos activos en todo el periodo de estudio, distribuidos principalmente en la ladera este del salar

(Fig. 17). Los resultados de cámaras trampa, al igual que Caleta Buena, no se evidenciaron alteraciones al ciclo reproductivo de la especie *O. markhami*, esto es, no hubo abandono de nido, muerte por estrés, cambio en el ciclo biológico del nido, modificación del tipo y sustrato de la cavidad del nido. Todos los nidos registrados en estos tres salares, se ubicaron en zonas de borde con una pendiente variable de exposición oeste. Adicionalmente se registró un nido inactivo fuera del área del Salar, sin embargo no presentó actividad, por lo cual no se incluye dentro del polígono.

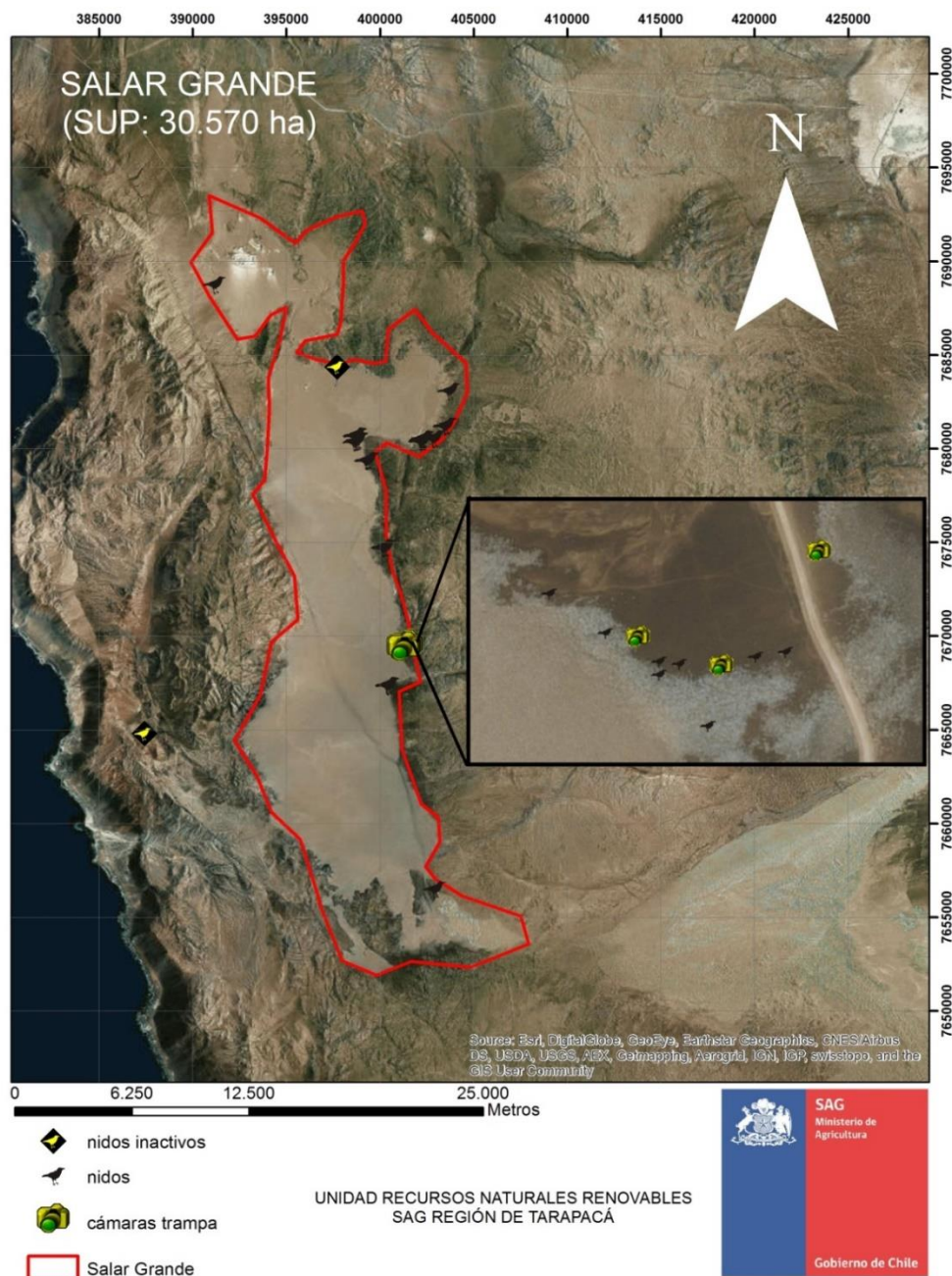


Figura 17. Distribución de los sitios con nidos activos de *O.markhami* en Salar Grande, en el periodo de estudio.

Por último, se entregan los resultados de los registros obtenidos en el sitio del Loa, el cual fue por primera vez prospectado el 17 de abril de 2018, encontrando un total de cinco nidos abandonados(sin adultos), uno de ellos con un huevo, sin embargo no había actividad al momento de la revisión por cámara sonda. Posterior a ello y una segunda visita realizada el día 16 de noviembre de 2018, se verifican los mismos sitios encontrando un nido con un adulto de *O. hornbyi* muerta y un huevo en el nido. Por lo cual se define el sitio como área de nidificación de Golondrina de Mar de Collar (Fig. 18).



Figura 18. Ubicación de cavidades con restos de la especie *O. hornbyi* al norte del Quebrada del río Loa, durante el periodo de estudio.

5.3 Características morfológicas y hábitos reproductivos

5.3.1 Biometría

Entre el año 2010-2018 se anillaron 18 individuos de *O. markhami*, cuatro de *O. gracillis* y una de *O. hornbyi*. Todos los individuos de *O. markhami* corresponden a atención de denuncia de los meses marzo a abril y a una captura en el salar Caleta Buena en el mes de diciembre 2017.

Los datos biométricos obtenidos de *O. markhami* corresponden a 17 individuos juveniles y un adulto reproductor. El largo de cuerda alar promedió 171.4 (DE $\pm$ 5.2) mm, con un mínimo de 163 y un máximo de 179 mm. Por otro lado, el largo del pico promedió 17 (DE $\pm$ 0.8) mm, con un mínimo de 15.5 y un máximo de 19.4 mm, esta medición se realizó mediante culmen total del ave. El largo de la cola fue de 89.4 (DE $\pm$ 12) mm, con 62 mm de valor mínimo y 105 mm como máximo. Por último, el peso promedio de los individuos fue de 46.5 (DE $\pm$ 4.3) g, con un peso mínimo y máximo de 36 y 52 g, respectivamente (Fig 19, Tabla 2).

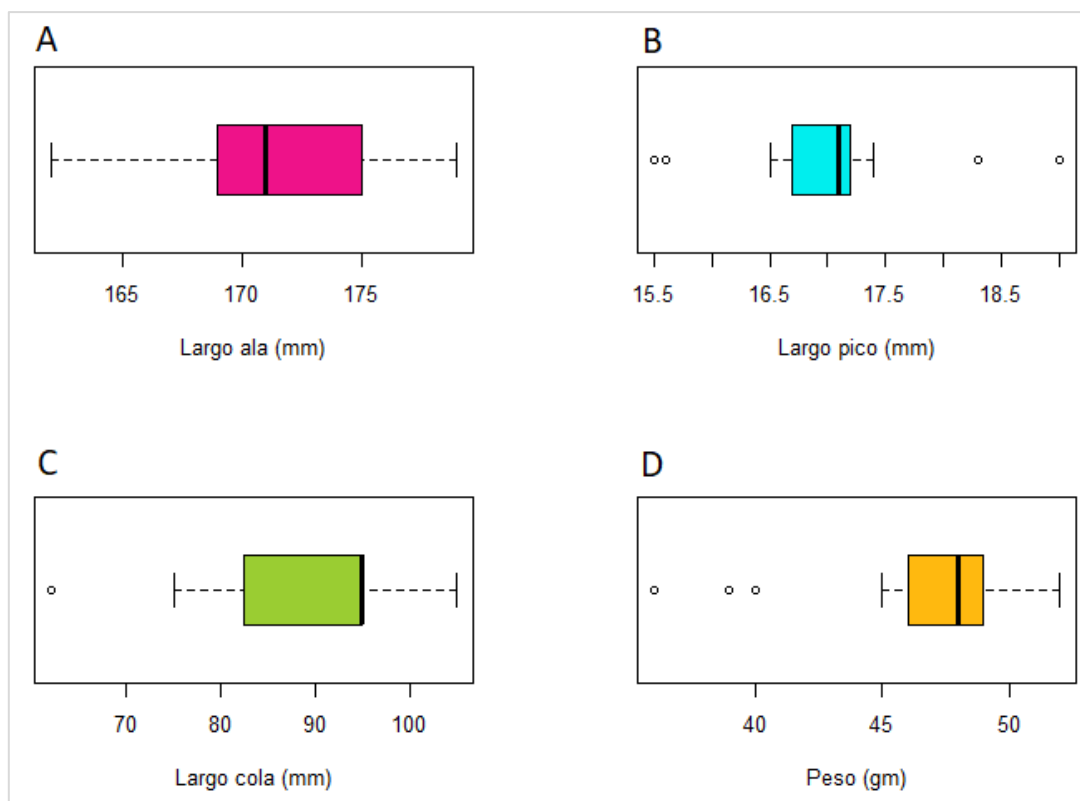


Figura 19. *Boxplot* resumen de medidas biométricas más relevantes para los individuos estudiados de *O. markhami* en el periodo de estudio. (A) Largo de ala expresado en milímetros, (B) Largo del pico expresado en milímetros, (C) Largo de la cola expresado en milímetros. (D) Peso expresado en gramos. La caja contiene el segundo y tercer cuartil (50% de los datos), mientras que los bigotes indican el primer y último cuartil (25% cada uno). La barra central señala la mediana.

Tabla 2. Biometría de los individuos estudiados de *O. markhami* durante el periodo de estudio. Las medidas están tomadas en milímetros y gramos.

Fecha	Edad ^a	D. tarso	L. cola	L. pico	L. tarso	L. ala	Peso
05-12-2017	4	2.1	74	19.4	25.7	173	49
02-05-2017	1	2	91	17.1	23.4	169	48
02-05-2017	1	2	-	16.7	22.2	163	36
02-05-2017	1	2	-	16.7	22.6	168	49
02-05-2017	1	2	-	16.9	26.3	172	47
02-05-2017	1	2.1	-	17.1	26.3	171	47
02-05-2017	1	2.5	-	17	26.6	162	40
19-03-2015	1	1.9	95	17.1	24.4	179	52
19-03-2015	1	2.1	105	15.5	24.9	171	45
26-03-2015	1	2	62	15.6	24.3	170	39
08-04-2014	1	2.5	95	17.2	25.1	171	49
08-04-2014	1	2.4	85	17.1	24.2	165	46
08-04-2014	1	2.4	95	17.4	24	178	49
08-04-2014	1	2.1	75	19	24.1	175	49
08-04-2014	1	2.4	95	17.3	22.1	178	47
08-04-2014	1	2.3	100	17.1	23.6	170	51
08-04-2014	1	2.6	95	16.5	24.4	173	48
08-04-2014	1	2.4	80	18.3	25.4	178	49
Promedio		2.2	89.4	17.0	24.3	171.4	46.5
Desv. Est.		0.2	12.0	0.8	1.3	5.2	4.3

^aSegún el SNAA. 4: Adulto, 1: Pichón o volantón.

5.3.2 Actividad diaria

El registro realizado a través de cámaras trampa demuestra que la actividad de las colonias nidificantes de *O. markhami*, al exterior del nido se concentran mayoritariamente a media noche

(Fig. 20 y Anexo 12). Obteniendo un rango de actividad máxima de 7 horas, comenzando a las 22 horas y finalizando a las 05 horas (cámaras trampa instaladas en Salar Grande y Caleta Buena).

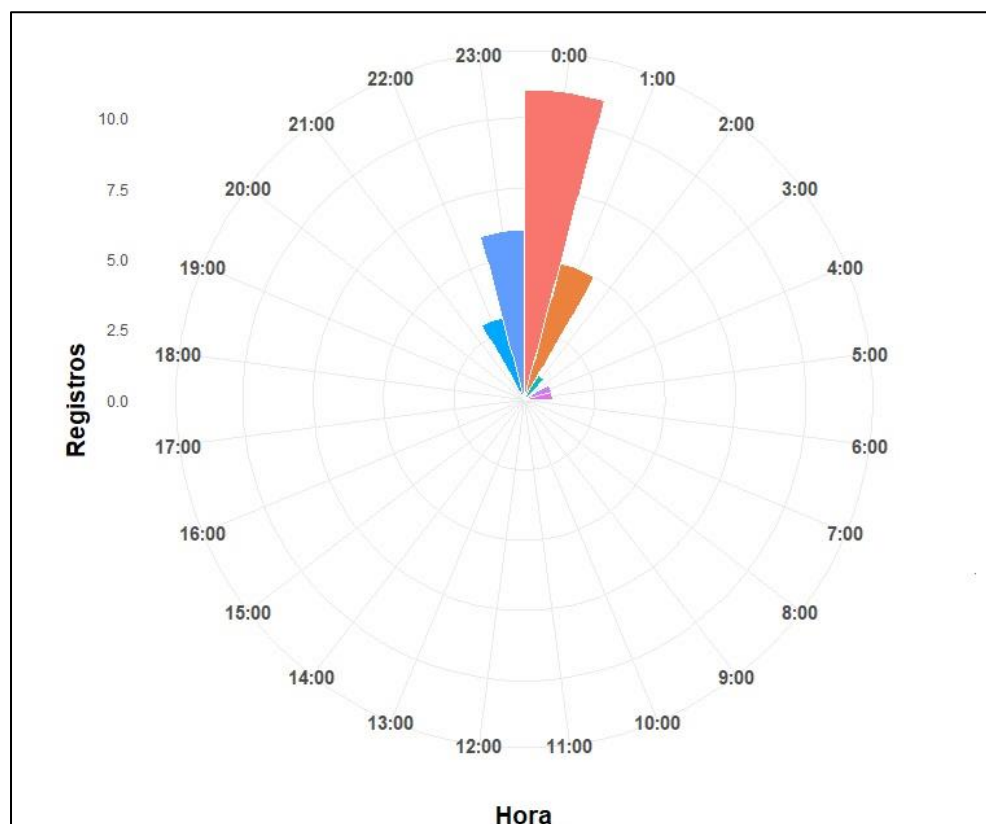


Figura 20. Horarios de actividad al exterior del nido de *O. markhami* en salar Caleta Buena y Salar Grande.

5.3.3 Características microclimáticas del nido

En cuanto al registro de temperaturas, se tiene que los nidos de *O. markhami*, mantienen una temperatura diaria estable, de entre 27.8 y 30.2 °C (Tabla 3), con una diferencia de 2.4°C. Además, se observa que durante la noche la temperatura al interior del nido se mantiene en un promedio de 27.8 °C (DE±1.7), mientras que afuera en 15.7 °C (DE±1.7), obteniéndose una diferencia promedio de 12.2 °C (DE±1.8). Por otro lado, al mediodía se registraron valores al interior de 30.2 °C (DE±2.4), mientras que al exterior de 47.8 °C (DE±2.5), obteniéndose una diferencia negativa de temperatura con respecto al exterior de -17.5°C (DE±3.6). Por último, el horario crepuscular presentó las menores diferencias de temperatura, obteniéndose un valor promedio de 30.1 °C (DE±1.9) al interior del nido y 26.9 °C (DE±3.1) en el exterior del mismo, resultando una diferencia de 3.2 °C (DE±2.9).

Tabla 3. Rango y diferencia de las mediciones de temperatura (°C) registradas al exterior e interior de los nidos de *O.markhami* durante tres horarios distintos, en Salar Grande y Caleta Buena.

	Noche			Mediodía			Crepúsculo		
	Fuera (°C)	Dentro (°C)	Dif. (°C)	Fuera (°C)	Dentro (°C)	Dif. (°C)	Fuera (°C)	Dentro (°C)	Dif. (°C)
	16.6	28.0	11.4	51.2	29.0	-22.2	26.5	32.0	5.5
	15.7	28.4	12.7	45.2	33.3	-11.9	24.0	28.2	4.2
	15.1	28.1	13.0	50.1	33.1	-17.0	30.1	30.0	-0.1
	18.4	27.4	9.0	46.5	29.4	-17.1	-	-	-
	14.6	27.3	12.7	48.1	27.3	-20.8	-	-	-
	13.5	27.6	14.1	45.5	29.3	-16.2	-	-	-
Promedio	15.7	27.8	12.2	47.8	30.2	-17.5	26.9	30.1	3.2
Desv. Est.	1.7	0.4	1.8	2.5	2.4	3.6	3.1	1.9	2.9

5.3.4 Ciclo reproductivo de la especie *Oceanodroma markhami*

De acuerdo al programa de terreno y en cuanto los registros obtenidos en cada uno de los sitios prospectados, y dado la información obtenida mediante cámara sonda, cámara trampa y datos de atención de denuncia, podemos obtener un calendario reproductivo de la especie Golondrina de Mar Negra *O.markhami*. Los resultados de los terrenos realizados en todos los sitios de la región de Tarapacá (Tabla 4) dan cuenta que en nuestra región existen dos calendarios reproductivos en diferentes fechas. Los sitios prospectados dan cuenta que se mantiene el mismo patrón reproductivo en la gran mayoría de los sitios, sin embargo los registros obtenidos en el sector de Quiuña, entre ellos, con un polluelo de *O. markhami* de varias semanas de edad registrado el día 14 de noviembre de 2018, tiene directa relación con el calendario de nidificación que reportan las colonias de la Región de Arica y Parinacota (Torres-Mura & Lemus 2013; Pyle 1993; Jahncke 1994), asimismo la proximidad con esta área da cuenta de que el ciclo biológico más próximo corresponde al descrito para la región de Arica y Parinacota. Dicho lo anterior, se infiere que las colonias de *O. markhami* ubicadas al sur de la Quebrada de Tiliviche, tienen un calendario reproductivo distinto a las colonias ubicadas al norte. (Fig. 21)

Fecha	Sitio prospectado	Tipo de registro	Resultado
09-12-2016	Caleta Buena	Sonda, Olor	Nidos huevos
27-12-2016	Caleta Buena	Sonda, Olor	Nidos huevos
05-12-2017	Salar Carmen, Soronal, Salar Grande	Sonda, Olor, Playback, Canes	Nidos huevos
07-12-2017	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback, Canes	Nidos huevos
08-12-2017	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback, Canes	Nidos huevos
11-12-2017	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback	Nidos huevos
10-01-2018	Salar Carmen, Soronal, Salar Grande	Sonda, Olor, Playback, Canes	Nidos huevos
17-01-2018	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback, Canes	Nidos huevos
19-01-2018	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback	Nidos huevos
24-01-2018	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback, Canes	Nidos huevos, Pollos
31-01-2018	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback	Nidos huevos, Pollos
07-02-2018	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback	Nidos huevos, Pollos
08-02-2018	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback, Canes	Nidos huevos, Pollos
01-03-2018	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback	Nidos, Pollos
02-03-2018	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback	Nidos, Pollos
15-03-2018	Quebrada Tana	Sonda, Olor, Playback	Nidos, Pollos
22-03-2018	Caleta Buena, Tana, Tiliviche	Sonda, Olor, Playback	Nidos, Pollos
27-03-2018	Caleta Buena, Tana, Tiliviche	Sonda, Olor, Playback	Nidos, Pollos
28-03-2018	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback	Nidos, Pollos
03-04-2018	Quebrada Tana, Quiuña	Sonda, Olor, Playback, Canes	Nidos, Pollos
17-04-2018	Salar Grande, Loa	Sonda, Olor, Playback	Nidos, Pollos (O. hornby Loa)
03-05-2018	Caltea Buena, Salar Grande	Sonda, Olor, Playback	Nidos abandonados
04-09-2018	Jarza Chiza	Sonda, Olor, Playback	Nidos inactivos
12-09-2018	Quebrada Tana, Chiza	Sonda, Olor, Playback	Nidos inactivos
17-10-2018	Salar Grande	Sonda, Olor, Playback	Sin Actividad
14-11-2018	Quebrada Tana, Quiuña	Sonda, Olor, Playback	Nidos, Huevos y Pollos quiuña
16-11-2018	Loa	Sonda, Olor, Playback	Nidos abandonados (O. hornby)
29-11-2018	Caleta Buena, Quiuña	Sonda, Olor, Playback	Nidos huevos
03-12-2018	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback, Canes	Nidos huevos
06-12-2018	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback, Canes	Nidos huevos
17-12-2018	Quiuña	Sonda, Olor, Playback, Canes	Nidos abandonados
21-12-2018	Quiuña	Sonda, Olor, Playback	Nidos abandonados
26-12-2018	Caleta Buena	Sonda, Olor, Playback	Nidos Huevos

Tabla 4. Terrenos comprendidos dentro del período de estudio y sus resultados en toda la Región de Tarapacá.

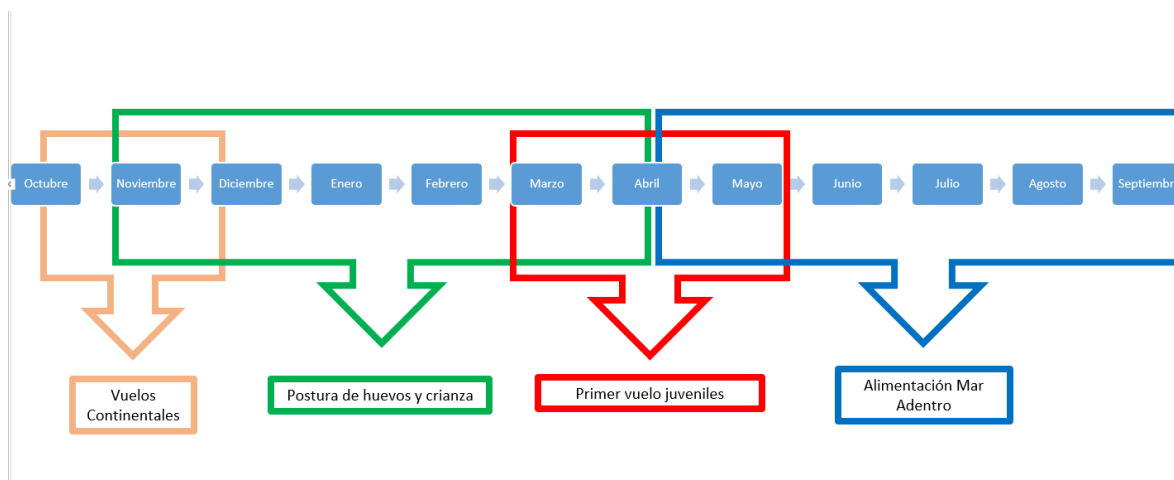


Figura 21. Calendario reproductivo de *O. markhami* para las poblaciones ubicadas al sur de la Quebrada de Tiliviche.

De acuerdo a este calendario reproductivo, se puede describir las siguientes fases a lo largo de los doce meses del año. En primera instancia se encuentran los “Vuelos Continentales”, definidos como los despliegues y vuelos que realizan los adultos para ingresar al continente y ubicar sus sitios reproductivos, dado que el resto del año permanecen mar adentro. En segundo lugar se define la etapa “Postura de Huevos y Crianza”, en la cual una vez que los adultos ingresan a las galerías, ubicándose en diferentes nidos, en el cual ponen un huevo en cada nido, incubándolo por un período estimado de 40 días (Jahncke 1994). Posteriormente una vez eclosionado los huevos los pichones comienzan su etapa de desarrollo en el nido la cual se prolonga por 80 días adicionales en promedio (Jahncke 1994). Según los registros obtenidos mediante cámara sonda; se pudo observar, que en cada galería existen hasta tres nidos separados a escasos 10 centímetros uno de otro, y que tienen distinto periodo de incubación y crianza de pichones, razón por la cual este periodo se puede prolongar hasta mediados de abril. Luego se define la etapa de “Primer Vuelo Juveniles”, esta etapa es la más crítica, dado que es el periodo en el cual ocurren la gran mayoría de los incidentes y contingencias de esta especie (*O. markhami*) dado que vuelan instintivamente de noche en dirección al mar, desviando su vuelo hacia instalaciones lumínicas cercanas a los sitios reproductivos, o bien centros poblados del borde costero de la región (Ficha *O. markhami* 14vo. Proceso de clasificación de especies MMA). Por último se define la etapa de “Alimentación Mar Adentro”, definida como la etapa en la cual los volantones abandonan sus nidos para iniciar su internación mar adentro y alimentarse para poder llegar a su estado adulto y repetir el mismo ciclo.

5.4 Amenazas.

Adicional a las amenazas antrópicas descritas anteriormente en los antecedentes, se detectaron mediante cámaras trampa y recorrido pedestre, depredadores naturales para la familia Hydrobatidae como son zorro chilla (*Lycalopex griseus*) (Fig.21) y el jote cabeza colorada (*Cathartes aura*). Adicionalmente se ha identificado una especie de ratón del genero *Phyllotis sp* (Fig.22), la cual se ha registrado ingresando a las galerías.



Fig. 21. *Lycalopex griseus*, en Salar Grande



Fig. 22. *Phyllotis sp.*, en Salar Grande

6. DISCUSIÓN

6.1 Reportes de incidentes en la Región de Tarapacá

El número de incidentes se mantuvo en un rango estable entre 2010 y 2013, sin superar los 100 individuos caídos al año. A partir del año 2014 se observa un drástico aumento en el número de atenciones de denuncia. Esto último tiene relación con el inicio de difusión y sensibilización de la especie a nivel regional. Por otra parte el aumento de incidentes podría coincidir con lo informado en prensa regional, sobre cambio de luminarias y el aumento de estas en todo el borde costero de ciudad de Iquique. El año 2016 tiene el número más alto de incidentes registrados, esto debe principalmente al reporte de casi tres mil individuos de *O. markhami* por parte de la empresa SPL, en el Salar Grande. En los años posteriores se mantiene la tendencia de incidentes sumando durante el año 2018, a casi 2500 ejemplares.

Si bien los reportes publicados hasta la fecha señalan que el periodo reproductivo de *O. markhami* se desarrolla durante el invierno austral (Torres-Mura & Lemus 2013; Pyle 1993; Jahncke 1994), los registros de incidentes analizados en el presente estudio indican que la temporada reproductiva comenzaría a fines de octubre y se extendería hasta mediados de abril, correspondiendo a la salida de los volantones de sus nidos. Esto coincide con lo señalado en el informe de la Adenda del Proyecto Espejo de Tarapacá, donde se encontraron nidos activos en los meses de diciembre de 2014 y enero de 2015 (FAUNATIVA 2015). Por tanto, los incidentes en la región de Tarapacá registrados en los meses de noviembre a febrero ($n \leq 6$), podrían corresponder a remanentes de volantones pertenecientes a las poblaciones de Arica o adultos en vuelo hacia los sitios de nidificación. Sin embargo, este antecedente de caída de volantones, está directamente relacionado con la descripción y el estado de las colonias reproductivas.

El alto número de incidentes reportados por la empresa SPL Ltda. y Compañía Minera Cordillera, puede estar asociado a las luminarias dispuestas a lo largo de sus instalaciones y la cercanía de los sitios de nidificación, tanto en Salar Grande, como en caleta Patillos (Malinarich 2010).

De la misma manera lo señala el trabajo de Rodríguez y colaboradores (2017), indicando que volantones y adultos de petreles nidificadores de cavidades, son atraídos por las luces artificiales durante la noche, desorientándose y colisionando, esto debido a su sensibilidad instintiva dada la características bioluminiscentes de sus presas (Imber 1975). Este fenómeno, llamado *fall-out* (Reed et al. 1985), es causante de mortalidades masivas en este tipo de aves y podría estar poniendo en

amenaza a las poblaciones locales. Por otra parte, la Red de Observadores de Vida Silvestre ROC, publicó durante el año 2018 un documento con los resultados de los estudios de impacto lumínico en el Salar Grande, situando este impacto como el mayor a nivel mundial producto de la cercanía con los sitios de nidificación. (ROC, 2018)

De acuerdo a los registros de las fechas de incidentes de juveniles de *O.markhami* informadas por las faenas mineras en el Salar Grande, estas fechas coinciden con los registros de incidentes en el borde costero de la ciudad de Iquique, lo cual indicaría que los ejemplares registrados podrían ser atraídos desde los sitios de nidificación de Salar Grande, el cual se encuentra a más de 50 kilómetros de la ciudad de Iquique. Prueba de lo anterior, en el año 2018 se realizaron recapturas de volantones de *O. markhami* anilladas en el borde costero de la ciudad de Iquique, las cuales habían sido anteriormente liberadas a 50 km al sur de esta, en un sitio costero cercano al Salar Grande. Por lo cual se puede inferir que individuos de *O.markhami* situados a un radio de 50km, están siendo atraídas por la instalación de luminarias presentes en todo el borde costero del radio urbano de Iquique.

6.2 Sitios de nidificación

De acuerdo a los resultados obtenidos en el estudio se identificaron un total de seis sitios de nidificación, siendo cuatro de ellos *O.markhami*, uno de *O.horbyi* y un sitio de especie indeterminada correspondiente al sector de Jarza. Este último, fue visitado en el mes de septiembre 2018, lo cual podría explicar la ausencia de nidos activos en el lugar.

El sitio de Quiuña fue descrito por primera vez en abril de 2018 por funcionarios del SAG Tarapacá encontrado solo nidos inactivos. Posteriormente en noviembre de 2018 se encontraron nidos activos, en los cuales en uno de ellos se logra identificar un polluelo de *O.markhami* de varias semanas de edad. Este registro da cuenta que la colonia de *O. markhami* en este sector podría tener un ciclo reproductivo distinto a los sitios de nidificación detectados al sur de la región.

Si bien los sitios de nidificación como Salar Caleta Buena y Salar Grande ya habían sido mencionadas por estudios solicitados para evaluación ambiental o por el trabajo de la Red de Observadores de Aves de Chile (ROC) (FAUNATIVA 2015; Schmitt et al. 2009; Barros *conv. pers.*) Este estudio viene a complementar la información descrita.

En el salar de Caleta Buena, se registró un aumento significativo en la detección de nidos durante el último periodo, esto se explica por la incorporación de una metodología de canes para la detección de nidos activos, lo cual formo parte de la creación de una aplicación SIG regional.

Nuevos sitios en Salar Grande son levantados en este estudio. A través de la ayuda de *playbacks* y los ejercicios de prueba con canes detectores, fue posible identificar sitios de nidificación en todo el borde este del salar. Los nidos de *O. markhami* más cercano a faenas industriales se encuentran a menos de 2 km de distancia.

Adicionalmente, se reporta por primera vez el sector norte al salar del Carmen con evidencias de actividad reproductiva. Posiblemente la implementación de herramientas de detección como *playbacks* y perros detectores, permitirá confirmar la presencia de aves en la zona, como lo fue con el resto de los sitios confirmados en este estudio.

En el sector del Loa, se realizó el primer registro de nido de *O. horbyi*, realizado en noviembre del año 2018. Este dato se transforma en el primer registro de sitio de nidificación de esta especie en la región.

La metodología de búsqueda con perros en los salares de la región, permitió aumentar la tasa de detecciones de manera considerable, optimizando el tiempo de búsqueda y de recurso humano. Esto es coherente con estudios previos, donde la utilización del método canes detectores aumenta en gran medida el área investigada y la tasa de detección de los objetivos (Cablak et al. 2006; Beebe et al. 2016). Las características ambientales del área muestreada también son relevantes al momento de la detección. Reed et al. (2011), concluyen que el factor ambiental que más disminuye la detección son las precipitaciones, ya que degradan o eliminan los restos orgánicos del suelo.

El resultado del seguimiento de los seis nidos detectados por el método canes detectores, dan cuenta que no hubo variaciones ni alteraciones en todas las etapas del ciclo reproductivo de la especie *O. markhami*. Este análisis considera el seguimiento de la etapa de incubación en diciembre 2017 hasta la etapa de abandono de nido en abril de 2018.

Las características de los nidos registrados son similares a lo señalado en Paracas - Perú (Jahncke 1994), correspondiendo a cavidades preformadas que crean galerías entre la costra salina, con evidencia de excavación. En cuanto a la profundidad de las galerías, las mediciones obtenidas en el presente trabajo son similares a las registradas en Paracas, donde se obtuvo un rango de 12-125 cm de profundidad, similar a lo registrado en el presente estudio (11.3 - >90cm). Según el autor, a

diferencia del diámetro de entrada, la profundidad de las galerías sería un factor relevante para el éxito reproductivo, ya que se mantienen menos expuestos a disturbios y depredación.

6.3 Características morfológicas y hábitos reproductivos

Las mediciones biométricas obtenidas muestran similitudes con los individuos evaluados en Paracas (Jahncke 1994). Sin embargo, el peso promedio muestra algunas diferencias, teniendo que el rango en esa zona de Perú es de 41 a 64g, lo que es alto si se compara con lo obtenido en Tarapacá (36-52g). Es probable que esta diferencia se deba a que gran parte de los individuos medidos en Tarapacá corresponden a volantones, al contrario del estudio en Paracas, donde las mediciones fueron hechas completamente sobre adultos.

Los registros de cámaras trampa se ajustan a los resultados de actividad diaria de Procellariiformes en una isla de Hawai (Reed et al. 1985), donde la actividad de los adultos comienza entre 2-3 horas luego de la puesta de sol debido a la amenaza de depredadores. Reed et al. (1985) y Jahncke (1994), señalan que la actividad de esta taxa se restringe a noches sin luna, sin embargo, los registros captados en este estudio demuestran actividad fuera del nido en noches con y sin luna (8-16 diciembre de 2017).

Las mediciones de temperatura demuestran una importante función amortiguadora de las cavidades, aislando térmicamente el nido y permitiendo un rango de temperatura estable durante las horas muestreadas. Estudios en otras aves que anidan en el suelo, demuestran lo importante de la función aislante, sabiendo que los embriones y polluelos son particularmente sensibles a las condiciones microclimáticas. Los nidos capaces amortiguar, reduciendo las temperaturas extremas, tienen como resultado un mayor éxito reproductivo. Sugiriendo que nidos con temperaturas cálidas son beneficiosos para las crías, ya que son capaces de concentrar la energía en procesos de crecimiento en inmunidad, en vez de termorregulación (Wakelin et al. 2013).

De acuerdo a los resultados de las prospecciones realizadas durante todo el periodo de estudio, se elabora un nuevo calendario de ciclo reproductivo de la especie *O. markhami*, de las colonias presentes al sur de la quebrada de Tiliviche. Para las especies como *O. hornbyi*, *O. gracilis* y *O. oceanites*, aún no se cuenta con los antecedentes suficientes que permitan determinar el calendario reproductivo en esta región.



Por último en relación a las amenazas naturales descritas, se hace mención que éstas sólo han quedado identificadas, sin embargo se requiere de un mayor análisis para saber su real impacto en las colonias reproductoras.

7. CONCLUSIONES

El número de incidentes ha mostrado una tendencia al aumento, en parte gracias a la incorporación de organizaciones comunitarias en la coordinación de los rescates producto de la atención de denuncia y a la internalización por parte de las empresas de incidentes con fauna silvestre en los últimos años. Sin embargo, el aumento de la contaminación lumínica en áreas urbanas y zonas próximas a sitios de nidificación, puede estar incidiendo en la gran cantidad de incidentes (Rodríguez, A. et al., 2017), tanto en ciudades como en áreas industriales de todo el borde costero de la región.

De acuerdo a los resultados de este estudio las luminarias del borde costero de la ciudad de Iquique podrían estar generando una atracción en adultos y juveniles de las distintas especies de golondrinas de mar. Esto principalmente por las recapturas realizadas en la ciudad de juveniles liberados al sur de la ciudad y que al día siguiente son encontrados en la ciudad, atraídas probablemente por la cantidad, tipo y disposición de las luminarias, lo cual favorece la desorientación y atracción, principalmente de juveniles de *O. markhami* durante el periodo comprendido de marzo a mayo de cada año.

Asimismo la operación y cercanía de los proyectos de explotación y uso de los salares en la región, tiene afectación en las colonias reproductivas, considerando el impacto directo por las instalaciones de faena en el área, así como los indirectos tales como luminaria, vibraciones, emisiones atmosféricas, ruido (ej. tronaduras), tránsito, perros domésticos, entre otros. Este último punto fue descrito recientemente en el documento “Diagnóstico y lineamientos para mitigar los efectos de la contaminación lumínica sobre golondrinas de mar en el norte de Chile” realizado por de la Red de Observadores de aves y vida silvestre de Chile (ROC) publicado en octubre 2018.

La distribución temporal de los reportes de incidentes muestra una variabilidad en el comportamiento reproductivo de las poblaciones de *O. markhami* en la Región. Estableciéndose un probable nuevo calendario reproductivo para esta especie en esta región. Esto último se establece mediante el registro de nidificación en los diferentes salares prospectados en la región, los cuales distan fenológicamente de los descritos anteriormente por el trabajo realizado por Torres-Mura, J.C. & Lemus, M.L., 2013. De esta manera se establece un período distinto para la búsqueda de sitios de nidificación en los salares de la región.

La implementación del método con canes detectores fue exitosa en la detección de nuevos sitios con nidos, no generando afectación o alteraciones en el ciclo reproductivo natural de las colonias de *O.markhami*.

En cuanto a las características morfológicas, no se observan claras diferencias entre las poblaciones del norte de Perú y Tarapacá. Aumentar el número de individuos evaluados posibilitará el mejoramiento de la caracterización biométrica. Por otro lado, los hábitos diarios muestran un claro patrón, donde la actividad fuera del nido se concentra entre las 22 y 03 am, comportamiento común entre los Hydrobátidos. Por último, las características microclimáticas de los nidos permiten una mejor eficiencia de la termorregulación, mejorando el éxito reproductivo de la colonia bajo condiciones extremas.

Desde el punto de vista de preferencia de hábitat para su reproducción, se puede concluir que la especie de Golondrina de Mar Negra, utiliza sectores de salares, de preferencia laderas con exposición oeste para la utilización de nidos. Asimismo se observa que la temperatura promedio para las galerías es de 28°C y se mantiene constante durante las 24 horas del día durante la temporada reproductiva. Si bien se pudo evidenciar amenazas naturales, ésta no ha sido cuantificada, por lo cual podría realizarse este estudio a posterior.

Se hace necesario la implementación de un plan de monitoreo periódico sobre las colonias reproductoras en la Región, el cual permitirá estimar adecuadamente la densidad poblacional y los hábitos reproductivos de éstas.

De acuerdo a este estudio, se obtienen seis diferentes sitios de nidificación de golondrinas de mar en la región, sin embargo ninguno de ellos cuenta actualmente con alguna categoría de protección oficial, así como tampoco cuentan con programas de manejo y cuidado de las colonias reproductivas de estas especies. Se debe tener en cuenta, que la especie *O.markhami* fue clasificada en Peligro de Extinción durante el año 2018, mediante la Decreto Supremo 79/2018 del Ministerio de Medio Ambiente.

Este estudio, es actualmente la única herramienta que describe a nivel regional el estado de las poblaciones de Hydrobátidos, así como también es válido para la identificación de eventuales impactos de proyectos y/o actividades que se requieran realizar en la región de Tarapacá y que tengan alguna afectación a las colonias reproductivas de Golondrina de Mar.

8. LITERATURA CITADA

- Ainley, D., 2005. The dark storm-petrels of the eastern north Pacific: speciation, current status, and future prospects. *Birding*, January/February, pp.58–65.
- Beebe, S.C., Howell, T.J. & Bennett, P.C., 2016. Using Scent Detection Dogs in Conservation Settings: A Review of Scientific Literature Regarding Their Selection. *Frontiers in Veterinary Science*, 3(October), pp.1–13.
- BirdLife International, 2016a. *Hydrobates hornbyi*. The IUCN Red List of Threatened Species.
- BirdLife International, 2017. *Hydrobates markhami*. The IUCN Red List of Threatened Species.
- BirdLife International, 2016b. *Oceanites gracilis*. The IUCN Red List of Threatened Species.
- BirdLife International, 2016c. *Oceanites oceanicus*. The IUCN Red List of Threatened Species. , 8235.
- Brooke, M. de L., 2004. *Albatrosses and Petrels Across the World*, Oxford: Oxford University Press.
- Cablk, M.E. et al., 2006. Accuracy and Reliability of Dogs in Surveying for Desert Tortoise (*Gopherus agassizii*). *Source: Ecological Applications Ecological Applications*, 16(165), pp.1926–1935.
- Drucker, J. & Jaramillo, A., 2013. Ringed Storm-Petrel (*Oceanodroma hornbyi*), version 1.0. *In Neotropical Birds Online (T. S. Schulenberg, editor) Cornell Lab of Ornithology*. Available at: <https://doi.org/10.2173/nb.rispet1.01>.
- FAUNATIVA, 2015. Análisis de la reproducción de golondrinas de mar. *Adenda: EIA Proyecto Espejo de Tarapacá*.
- García-godos, I. et al., 2002. The diet of Markham ' s storm petrel *Oceanodroma markhami* on the central coast of Peru. *Marine Ornithology*, 30, pp.77–83.
- Gazit, I. & Terkel, J., 2003. Domination of olfaction over vision in explosives detection by dogs. *Applied Animal Behaviour Science*, 82(1), pp.65–73.
- Hertel, F. & Torres-Mura, J.C., 2003. Discovery of a breeding colony of Elliot's storm-petrels

- (*Oceanites gracilis*, Hydrobatidae) in Chile. *Ornitología Neotropical*, 14, pp.113–115.
- Hoyo, J. del ed et al. eds., 1992. *Handbook of the birds of the world*, Barcelona: Barcelona Lynx Eds.
- Imber, M.J., 1975. Behaviour of petrels in relation to the Moon and artificial lights. *Notornis*, 22(Gould 1967), pp.302–306.
- Jahncke, J., 1994. *Biología y Conservación de la Golondrina de tempestad negra Oceanodroma markhami (Salvin 1883) en la península de Paracas, Perú*, Lima, Perú.
- Kurrer, P.V., 2009. La Brigada Canina del SAG. *Boletín Veterinario Oficial*, pp.1–5.
- Luebert, F. & Pliscoff, P., 2006. *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile* P. Pliscoff, ed., Santiago, Chile: Santiago, Chile : Universitaria.
- Malinarich, V., 2010. *Contaminación Lumínica, impacto sobre las poblaciones de aves costeras de la región de Tarapacá*,
- Moser, M.L. & Lee, D.S., 1992. a 14-Year Survey of Plastic Ingestion By Western North-Atlantic Seabirds. *Colonial Waterbirds*, 15(1), pp.83–94.
- Murillo, Y., RP, P. & L., D.-A., 2013. Rescate de Golondrinas de la Tempestad de Collar (*Oceanodroma hornbyi*) en la ciudad de Lima, Perú. *Boletín de Ornitología Peruana-UNOP*, 8, pp.55–64.
- Nussear, K.E. et al., 2008. Are wildlife detector dogs or people better at finding desert tortoises (*Gopherus agassizii*)? *Herpetological Conservation and Biology*, 3, pp.103–115.
- Pyle, P., 1993. A markham's storm-petrel in the northeastern pacific. *Western Birds*, 24, pp.108–110.
- Quillfeldt, P., 2001. Variation in breeding success in Wilson's storm petrels: influence of environmental factors. *Antarctic Science*, 13(4), pp.400–409.
- Quillfeldt, P., McGill, R.A.R. & Furness, R.W., 2005. Diet and foraging areas of Southern Ocean seabirds and their prey inferred from stable isotopes: Review and case study of Wilson's storm-petrel. *Marine Ecology Progress Series*, 295, pp.295–304.

- Reed, J.R., Sincock, J.L. & Hailman, J.P., 1985. Light Attraction in Endangered Procellariiform Birds: Reduction by Shielding Upward Radiation. *Auk*, 102(April), pp.377–383.
- Reed, S.E. et al., 2011. Detection distance and environmental factors in conservation detection dog surveys. *Journal of Wildlife Management*, 75(1), pp.243–251.
- Robert, M. & Laporte, P., 1994. Field techniques for studying breeding Yellow Rails. *J Field Ornithol*, 68(1), pp.56–63.
- Rodríguez, A. et al., 2017. Seabird mortality induced by land-based artificial lights. *Conservation Biology*, 31(5), pp.986–1001.
- Red de Observadores de Aves y Vida Silvestre, 2018. Diagnóstico y lineamientos para mitigar los efectos de la contaminación lumínica sobre golondrinas de mar en el norte de Chile
- Schmitt, F., Barros, R. & Norambuena, H., 2009. Markham ' s Storm Petrel breeding colonies discovered in Chile. *Neotropical Birding*, 2009(October), pp.5–10.
- Spear, L.B. & Ainley, D.G., 2007. Storm-Petrels of the Eastern Pacific Ocean: species assembly and diversity along marine habitat gradients. *Ornithological Monographs*, 62(62), pp.1–77.
- Soldatini et al 2015 Effects of human disturbance on cave-nesting seabirds: the case of the storm petrel .
- Tobias, J. a, Butchart, S.H.M. & Collar, N.J., 2006. Lost and found: a gap analysis for the Neotropical avifauna. *Neotropical Birding*, 1, pp.4–22.
- Torres-Mura, J.C. & Lemus, M.L., 2013. Breeding of Markham's Storm-Petrel (*Oceanodroma markhami*, Aves: Hydrobatidae) in the desert of northern Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 86(4), pp.497–499.
- Wakelin, J., Wilson, A.L. & Downs, C.T., 2013. Ground cavity nest temperatures and their relevance to Blue Swallow *Hirundo atrocaerulea* conservation. *Ostrich*, 84(3), pp.221–226.

9. ANEXOS



Anexo 1. Recepción domiciliaria de un individuo de *O. markhami* en la ciudad de Iquique en el año 2010.



Anexo 2. Evaluación de *O. oceanicus* previa a su liberación.



LISTA DE ASISTENCIA A CAPACITACION

Código: F-DP-DS-004
Versión: 03
Fecha de Vigencia: 14/03/2013
Página: 1 de 4

NOMBRE DE LA CAPACITACIÓN O ACTIVIDAD DE FORMACIÓN (*)	RED DE COORDINACIÓN RESCATE Y MANEJO DE FAUNA SILVESTRE
FECHA DE INICIO (*)	04/11/2016
FECHA DE TÉRMINO (*)	04/11/2016
N° DE HORAS (*)	2H
LUGAR DE REALIZACIÓN	DIRECCIÓN REGIONAL
ENTIDAD CAPACITADORA (*)	SAG
RUT DE LA ENTIDAD(*)	
RELATOR/A/ES/AS (*)	VINKO MALINARICH, ANTULEMU VALLVERDU

(*) Obligatorio

Anexo 3. Lista de asistencia Red de Coordinación Rescate y Manejo de Fauna silvestre.



Anexo 4. Utilización de cámara de inspección para detectar nidos.



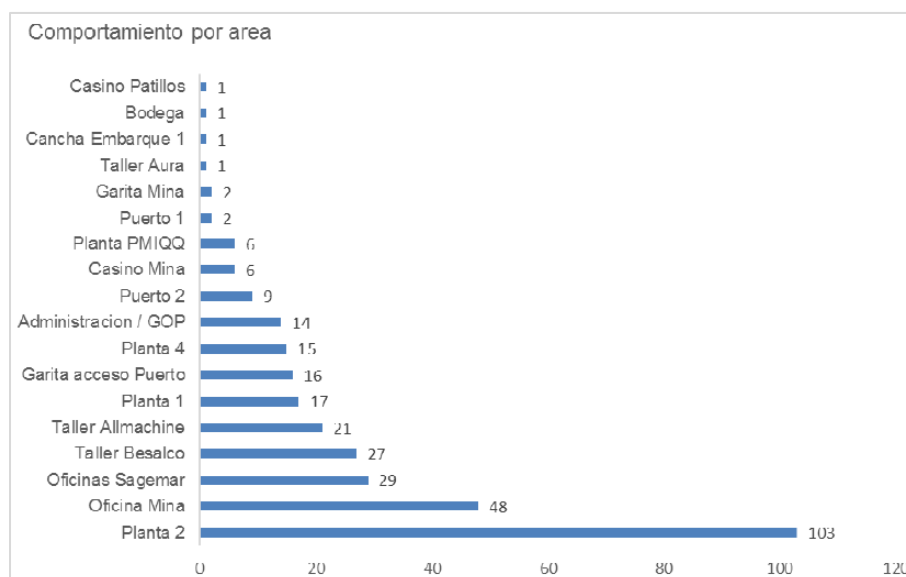
Anexo 5. Realización de pruebas con canes detectores en salar Caleta Buena.



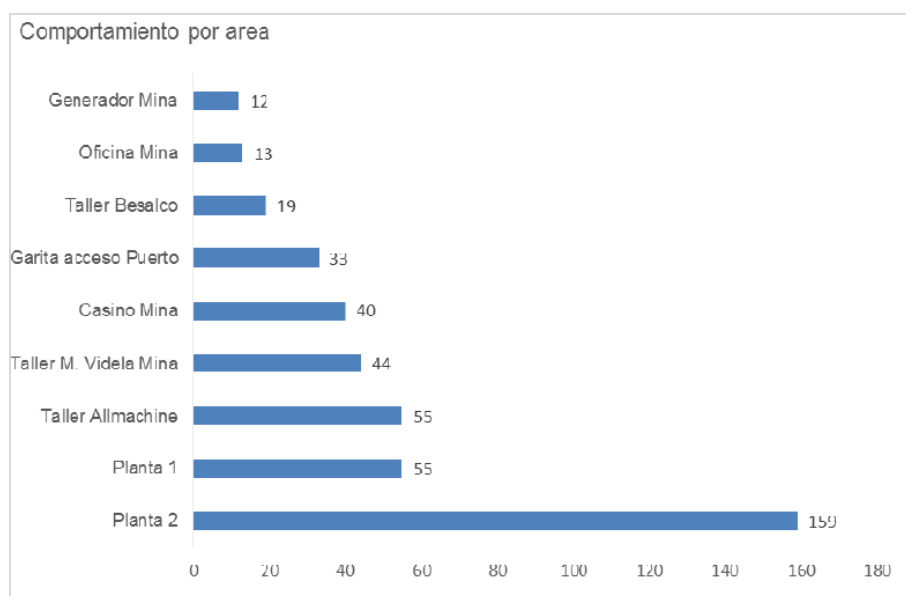
Anexo 6. Medición de cavidades en parcelas para estimar densidad en salar Caleta Buena.



Anexo 7. Medición de la temperatura en la superficie del suelo al interior del nido al medio día en el Salar Grande.



Anexo 8. Distribución de los incidentes de *O. markhami* en diferentes instalaciones de SPL para los meses de marzo de 2017.



Anexo 9. Distribución de los incidentes de *O. markhami* en diferentes instalaciones de SPL para los meses de abril de 2017.



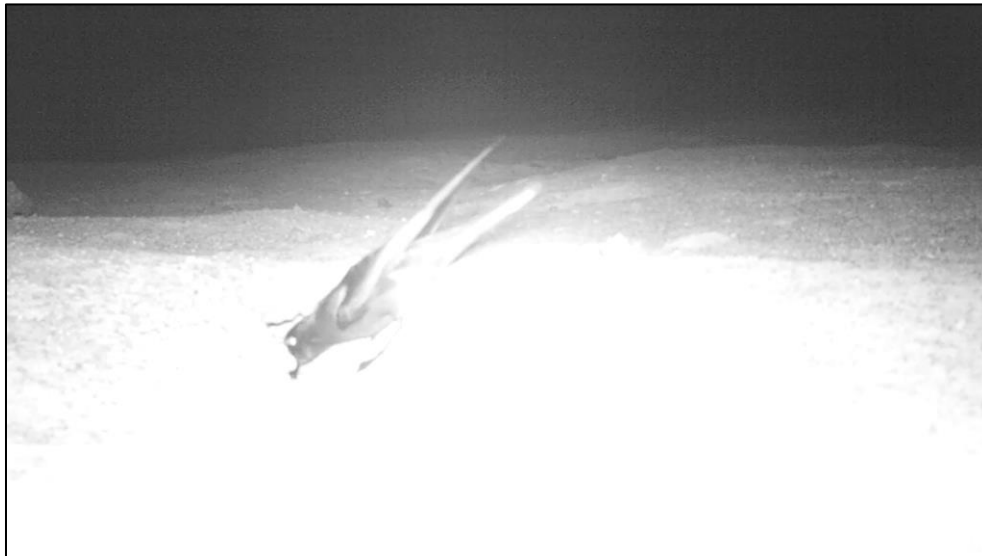
Anexo 10. Una de las cavidades detectadas al norte del Salar del Carmen.



Anexo 11. Cavity with nest in its interior, located in the Caleta Buena salt.



Anexo 12. Imagen Aérea Dron SAG, Salar Caleta Buena.



Anexo 13. Visualización de la actividad diaria registrada a través de cámaras trampa.



Anexo 14. Luminaria de instalaciones de proyectos mineros asociados al área de nidificación en Salar Grande.

MINUTA

***División de Recursos Naturales y Biodiversidad
Departamento de Conservación de Especies***



Contaminación lumínica y efectos sobre la biodiversidad

Los animales, incluidos los seres humanos, hemos evolucionado dependiendo de ciclos regulares entre luz y oscuridad. El patrón de día y noche (luz/oscuridad) es fundamental para un adecuado funcionamiento fisiológico y conductual (sistemas reproductivos, inmunes y conductuales), y de hecho, el tipo y la cantidad de radiación disponible influye en numerosos procesos fisiológicos, morfogénéticos y reproductivos de plantas y animales, y afecta de manera significativa el funcionamiento general de los ecosistemas (Kohen et al. 1995).

La luz desencadena diversos procesos evolutivos, desde la adaptación a la radiación media disponible, hasta la coevolución entre animales y plantas o parásitos y huéspedes, pasando por la flexibilidad o plasticidad para acomodarse a los cambios espaciales y temporales de la radiación (Valladares 2001).

Se describe que son cuatro las características principales de la radiación que tienen particular relevancia ecológica y evolutiva: la intensidad, la calidad o espectro, la direccionalidad y la distribución en el tiempo y en el espacio (Canham et al. 1990, Valladares 2003).

La intensidad, la calidad espectral, la duración y la periodicidad de la exposición a la luz afectan la bioquímica, fisiología y comportamiento de los organismos. En plantas, la presencia de productos químicos sensibles a la luz proporciona la base para la actividad fotosintética. La luz también es un importante modulador ambiental de las tasas de crecimiento y patrones de crecimiento para los cuales los cambios pueden tener profundas consecuencias en el nivel de la planta individual. Muchos microorganismos y una amplia variedad de animales que van desde protozoos a vertebrados superiores perciben la luz, ya sea de una forma básica de percepción de la luz hasta la imagen visual completa. Los animales más complejos tienen la capacidad de formar imágenes a partir de información recogido utilizando sus sistemas receptores de luz (Royal Commission on Environmental Pollution 2009).

Las alteraciones en los regímenes de luz natural (espacial, temporal y espectral), modifican la forma en que la luz influye en los sistemas biológicos, alterando en consecuencia aspectos fisiológicos y conductuales (Gaston et al. 2013).

Si bien, la luz artificial claramente ha mejorado la calidad de vida de las personas, tales beneficios están acompañados de una serie de costos encubiertos (Hölker et al. 2010). Los astrónomos fueron los primeros en reconocer que el resplandor del cielo dificulta la detección de objetos celestes más débiles, obligándolos a realizar sus observaciones desde áreas más oscuras o desde la

órbita (Riegel 1973, Smith 2009). Sólo más recientemente han tenido mayor atención los efectos negativos de la luz artificial sobre el medio ambiente, incluida la biodiversidad, así como sobre la salud y el comportamiento humano (Longcore & Rich 2004, Navara & Nelson 2007).

Se habla de contaminación lumínica ecológica para describir la luz artificial que altera los patrones de luz y oscuridad en los ecosistemas (Longcore & Rich 2004), para lo cual dos décadas antes Verheijen (1985) había propuesto el término “photopollution”, describiéndolo como “luz artificial que tiene efectos adversos sobre la vida silvestre”.

Algunos impactos sobre la biodiversidad:

Existe una nutrida y abundante literatura publicada que describe y analiza los impactos adversos de la contaminación lumínica sobre la fauna y flora, así como sobre servicios ecosistémicos. Una muestra reducida de ellas puede ser revisada desde el sitio <http://www.urbanwildlands.org/nightlightbiblio.html>, pero sin duda son centenares las publicaciones que abordan este problema.

En términos generales, los efectos sobre los sobre animales se pueden traducir en:

- Mortalidad a gran escala, mortalidad de aves marinas atraídas, mortalidad de insectos
- Problemas de navegación, como por ejemplo la desorientación de tortugas marinas.
- Altera relaciones interespecíficas
 - Relaciones predador-presa (facilita depredación de especies que no ven determinado rango, o de presas en general que se hacen más visibles)
 - Mutualismos
- Cambios en comportamiento reproductivo
- Cambios fisiológicos (alteración de ritmos circadianos)

La contaminación lumínica amenaza a la biodiversidad debido a cambios en los hábitos nocturnos (tales como reproducción y migración) de insectos, anfibios, peces, aves, murciélagos y otros animales y puede también afectar a las plantas por desórdenes en su ciclo natural de día/noche (Longcore & Rich 2004).

La luz artificial durante la noche causa efectos negativos en la biodiversidad, altera la movilidad de las especies, modificando el objetivo razón, la frecuencia y la temporalidad de los desplazamientos de los animales, ya sea por efectos atractivos o repulsivos. Recientemente, algunos estudios demostraron un claro impacto de fragmentación porque la iluminación artificial puede reducir la oscuridad de la noche y generar barreras infranqueables para la fauna (Sordello 2017).

Muchos insectos se congregan activamente alrededor de fuentes de luz hasta que mueren exhaustos. La contaminación lumínica puede por lo tanto afecta a los insectos porque reduce la biomasa o el tamaño poblacional, así como modificando la composición relativa de la población, aspectos que en su conjunto pueden afectar la cadena trófica de los ecosistemas. Peces y aves migratorias son confundidos por las luces artificiales, lo que resulta en pérdidas excesivas de energía y dificultades espaciales a la migración, lo que resulta en cambios fenológicos y reducción del éxito migratorio. Pero también puede afectar a animales diurnos, ya que podrían extender su actividad debido a la iluminación artificial, lo que puede aumentar su capacidad de depredar sobre animales nocturnos (Hölker et al. 2010b).

La contaminación lumínica en el ámbito marino es reconocida desde hace algunas décadas, siendo definida como una degradación del hábitat fótico debido a la luz artificial (Verheijhen 1985). En un inicio las mayores preocupaciones eran los problemas de mortalidad en aves marinas y la desorientación de tortugas, ahora último hay evidencia de afectación en muchos otros grupos taxonómicos, incluido una serie de invertebrados (Depledge et al. 2010, Longcore & Rich 2004, Navarro-Barranco & Hughes 2015, Rodríguez et al. 2017, Salmon et al. 1995).

El zooplancton, por ejemplo, dado que presenta migraciones verticales en columna de agua con los ciclos de día/noche, ve alterado os patrones normales producto de la luz artificial principalmente en sectores costeros, lo que induce cambios en la comunidad con posibles consecuencias en el funcionamiento del ecosistema (Gliwicz 1986.)

Para las plantas, la luz artificial en la noche puede causar pérdida temprana de las hojas, o aumentar los periodos de crecimiento en otras especies, lo que podría afectar la composición de la comunidad florística (Hölker et al. 2010b).

La contaminación lumínica es considerada como un importante factor que merma de algunos servicios ecosistémicos de provisión (por ejemplo debido a la pérdida de especies más sensibles a la luz), de regulación (por ejemplo debido a la declinación de algunos polinizadores nocturnos como polillas y murciélagos) y culturales (como por ejemplo la pérdida de valores estéticos debido la ausencia de capacidad para observar la Vía Láctea) (Smith 2009, Hölker et al. 2010a, Carpenter et al. 2009, Potts et al. 2010).

Chile no es ajeno a estos impactos:

Si bien a nivel nacional, los estudios son escasos, las especies de plantas y animales presentan las mismas características fisiológicos, bioquímicas y conductuales por lo que no puede dudarse de que este mismo tipo de efectos también se produce en el país.

Se reconoce la mortalidad de aves marinas inducidas por luces en Chile, citándose problemas en Archipiélago de Juan Fernández y algunos puntos de la costa continental (Rodríguez et al. 2017, ver figura). Desde el punto de vista numérico, el impacto de mayor magnitud ocurriría en el norte del país, donde cientos o miles de golondrinas de mar estaría muriendo cada año producto de la atracción generada por luces de faenas mineras, infraestructura costera y luces de ciudades como Iquique y Arica (Schmitt et al. 2015).

Para aves marinas existen antecedentes publicados, o informados, destacando los casos de fardela blanca (*Ardenna creatopus*) en isla Mocha y Archipiélago de Juan Fernández, varias especies de fardelas que nidifican en Juan Fernández, pollitos de mar en Mejillones, Yuncos (*Pelecanoides garnotii*) en Punta Choros y Chañaral de Aceituno y golondrinas de mar de tres especies en las Regiones de Arica y Parinacota, de Tarapacá y de Antofagasta.

Producto de la información disponible, la golondrina de mar negra (*Oceanodroma markhamii*) fue recientemente declarada como En Peligro (DS N° 79/2018 Ministerio del Medio Ambiente, publicado en el diario oficial el 19/12/2018), reconociendo en la evaluación que la contaminación lumínica es una de las amenazas más relevantes para la especie (<http://www.mma.gob.cl/clasificacionespecies/>). De acuerdo con estimaciones preliminares

realizadas por expertos de la Red de Observadores de Aves y Vida Silvestre (ROC), la mortalidad debido a luces para este petrel es el mayor a nivel global (publicación en prensa).

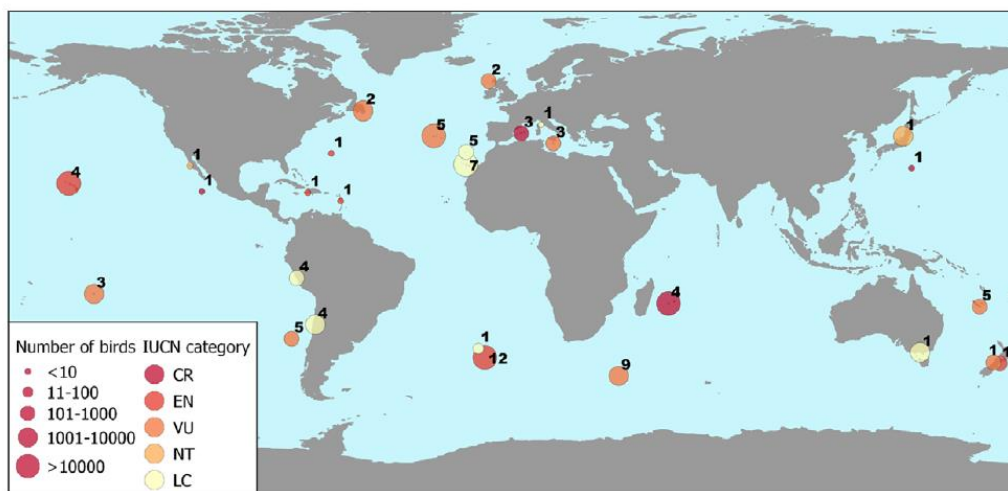


Figure 1. Locations where attraction of seabird fledglings to lights has been reported (numbers, number of species affected; circle size, proportional to number of grounded birds; CR, critically endangered; EN, endangered; VU, vulnerable; NT, near threatened; LC, least concern).

Figura publicada en Rodríguez et al. (2017) que muestra registro de especies de aves marinas afectadas por contaminación lumínica.

Ampliar los objetos de preocupación de la norma es necesario:

No sólo es perfectamente viable avanzar hacia una norma de calidad para mitigar efectos adversos de la iluminación sobre la biodiversidad, sino que es necesario hacerlo toda vez que corresponde a una amenaza que está en aumento. Es viable porque hoy en día el conocimiento es mayor y permite la incorporación de medidas tecnológicas y conductuales que podrían ayudar a disminuir el impacto adverso de la iluminación artificial.

Para contribuir a mitigar los impactos adversos de la iluminación artificial es necesario trabajar en espectro de la luz, la dirección de la luz, la temporalidad de su uso y sobre todo en evitar el uso de luz artificial donde no es absolutamente necesario, esto último es más relevante aún en las áreas naturales.

Por ejemplo, Longcore & Rich (2017) generan una guía de recomendaciones para disminuir el problema en distintos tipos de ambiente en áreas naturales, especialmente en áreas protegidas. Sugieren actuar en cinco aspectos:

1. Necesidad de iluminar. Es necesario tener soluciones creativas para evitar el uso de luces donde no son absolutamente necesarias, lo que es especialmente relevante en áreas naturales.
2. Espectro de la luz. Aunque ningún color de luz es benigno en todas las situaciones, se debe evitar las luces que tienen luz ultravioleta o azul (longitudes de onda más cortas) y, en general, usar luces con tonos rojos y amarillos.

3. Intensidad. La reducción de la intensidad de las luces a menudo puede mejorar la visibilidad para los humanos al reducir el contraste entre la luz y la sombra, permitiendo que las personas vean un área que de otro modo podrían discernir. No se deben seguir las pautas para la intensidad de iluminación de la industria de la iluminación cuando se trata de reducir los impactos en la vida silvestre, ya que generalmente son más altos de lo necesario para la visión humana y no tienen en cuenta los impactos en la vida silvestre.
4. Dirección. Las luces deben estar protegidas de manera tal que solo dirijan la luz donde sea necesaria, y nunca se dirijan hacia arriba.
5. Duración. Los temporizadores y los detectores de movimiento pueden reducir el tiempo en que una luz está encendida y, por lo tanto, pueden reducir los impactos.

La mitigación del problema, incluida la revisión de la norma, debe ser interdisciplinaria, conjugando, al menos, conocimiento sobre vida silvestre, fisiología de respuestas a la luz, salud humana, física de las radiaciones y tecnología de iluminación.

Literatura citada.

Canham CD, JS Denslow, WJ Platt, JR Runkle, TA Spies & PS White (1990) Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. *Canadian Journal of Forestry Research* 20: 620-631.

Carpenter SR, HA Mooney, J Agard, D Capistrano, RS DeFries, S Díaz, T Dietz, AK Duraiappah, A Oteng-Yeboah, HM Pereira, C Perrings, WV Reid, J Sarukhan, RJ Scholes & A Whyte (2009) Science for managing ecosystem services: beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A.* 106, 1305–1312

Depledge M, CAJ Godard-Coddig & RE Bowen (2010) Light pollution in the sea. *Marine Pollution Bulletin* 60(9): 1383-1385.

Gaston KJ, J Bennie, TW Davies & J Hopkins (2013) The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biological Reviews* 88: 912–927.

Gliwicz ZM (1986) A lunar cycle in zooplankton. *Ecology* 67, 883–897

Hölker F, T Moss, B Griefahn, W Kloas, CC Voigt, D Henckel, A Hänel, PM Kappeler, S Völker, A Schwöpe, S Franke, D Uhrlandt, J Fischer, R Klenke, C Wolter & K Tockner (2010a) The dark side of light: a transdisciplinary research agenda for light pollution policy. *Ecology and Society* 15(4): 13.

Hölker F, C Wolter, EK Perkin & K K Tockner (2010b) Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology & Evolution* 25(12): 681-682.

Kohen E, R Santus & JG Hirschberg (1995) *Photobiology*. Academic Press, London.

Longcore T & C Rich (2004) Ecological light pollution. *Front. Ecol. Environ.* 2 (4): 191–198.

Longcore T & C Rich (2016) Artificial night lighting and protected lands: ecological effects and management approaches (revised August 2017). *Natural Resource Report NPS/NRSS/NSNS/NRR—2017/1493*. National Park Service, Fort Collins, Colorado.

Navara KJ & RJ Nelson (2007) The dark side of light at night: physiological, epidemiological and ecological consequences. *Journal of Pineal Research* 34: 215–224.

Navarro-Barranco C & LE Hughes (2015) Effects of light pollution on the emergent fauna of shallow marine ecosystems: Amphipods as a case study'. *Marine Pollution Bulletin* (1-2):235-240

Potts SG, JC Biesmeijer, C Kremen, P Neumann, O Schweiger & WE Kunin (2010) Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends Ecol. Evol.* 25(2): 345–353

Riegel KW (1973) Light pollution. *Science* 179: 1285-1291.

Rodríguez A, N Holmes, PG Ryan, KJ Wilson, L Faulquier, Y Murillo, AF Raine, JF Penniman, V Neves, B Rodríguez, J Negro, A Chiaradia, P Dann, T Anderson, B Metzger, M Shirai, L Deppe, J Wheeler, P Hodum, C Gouveia, V Carmo, GP Crreira, L Delgado-Alburquerque, C Guerra-Correa, FXr Couzi, M Travers & and M Le Corre. 2017. Seabird mortality induced by land-based artificial lights. *Conservation Biology*, Volume 00, No. 0, 1–16. DOI: 10.1111/cobi.12900

Royal Commission on Environmental Pollution (RCEP) (2009) Artificial Light in the Environment. TSO, London.

Salmon, M., Tolbert, M.G., Painter, D.P., Goff, M., Reiners, R., 1995. Behavior of Loggerhead turtles on an urban beach: hatchling orientation. *J. Herpetol.* 29, 568–576.

Schmitt F, R Barros & H Norambuena (2015) Markham's Storm Petrel breeding colonies discovered in Chile. *Neotropical Birding* 17: 5-10.

Smith M (2009) Time to turn off the lights. *Nature* 457:27.

Valladares F (2001) Luz y evolución vegetal. *Investigación y Ciencia* 303: 73-79.

Verheijhen, F.J., 1985. Photopollution: artificial light optic spatial control systems fail to cope with incidents, causations, remedies. *Exp. Biol.* 44, 1–18.



NATURAL HISTORY NOTE

Breeding of Markham's Storm-Petrel (*Oceanodroma markhami*, Aves: Hydrobatidae) in the desert of northern Chile

Reproducción de la golondrina de mar negra (*Oceanodroma markhami*)
en el desierto del norte de Chile

JUAN C. TORRES-MURA* & MARINA L. LEMUS

Unión de Ornitólogos de Chile, Mosquito 459 Of. 103, Santiago, Chile
Corresponding author: torresmura@gmail.com

Storm-petrels (family Hydrobatidae) are diverse and widespread in the Pacific Ocean. Their breeding grounds are poorly known because they typically nest on islands, their nests are in burrows and crevices, and usually they attend their nests at night. Among the South Pacific species, Markham's Storm-Petrel (*Oceanodroma markhami* (Salvin, 1883)) is listed as Data Deficient by the IUCN (2012) because data on overall numbers, trends, and threats are not known. Only a few nesting sites on the Paracas peninsula (and offshore Isla Vieja) in Perú have been documented (Jahncke 1993, García-Godos et al. 2002) and therefore this species is considered endemic to Perú (Croxall et al. 2012). Here we present the first record of reproduction of Markham's Storm-Petrel in Chile, where it is categorized as endangered (Inadequately Known, SAG 2012).

In April 2012, fellow entomologist Laurence Packer (York University) told us he heard seabird calls at night while crossing the desert. Between 14 and 17 June 2013 we surveyed that area for nests or other signs of activity. During the day, approximately 22 km southeast of Arica (Arica Parinacota region) above the Acha ravine, we found cavities in the saltpeter with fecal stains and a strong odor, some dismembered black wings, and a mummy of a Storm-petrel in a crevice. At night we heard vocalizations and saw several birds flying. We identified the birds as Markham's Storm-Petrel (*Oceanodroma markhami*) based on their size, long pointed wings, and a deeply forked tail. This species is dark sooty brown above, shading to blackish brown on the underparts

with pale grayish brown upperwing coverts forming a distinct pale bar across the surface of the wing, which extends almost to the carpal joint. Wing flight feathers are almost black though the bases of the primary shafts look white. The underwing is blackish gray, and has a slight silvery sheen. The distal uppertail coverts are paler than the back, creating a slight contrast with the blackish tail (Murphy 1936, del Hoyo et al. 1992). Other dark brown storm-petrels with a pale wing bar are allopatric and differ in size (Murphy 1936, Harrison 1987).



Fig. 1: Markham's Storm-Petrel (*Oceanodroma markhami*) at its nesting site in Arica, Chile.

Golondrina de mar negra (*Oceanodroma markhami*) en su lugar de anidación, en Arica, Chile.

Markham's Storm-Petrel is common in the Humboldt Current, including pelagic and coastal waters of Ecuador, Perú, and Chile between 18° N and 30° S (Murphy 1936). It has been observed west of the Galápagos Islands near the equator, in the Panama Bight, and off Baja California, reaching as far west as 118° W (Spear & Ainley 2007). Maximum upwelling in the Humboldt Current occurs during the austral winter and may not vary appreciably with latitude. Coincidentally, the highest densities of this storm-petrel have been documented from austral autumn to spring off southern Perú and northern Chile (Figueroa & Suazo 2012, Spear & Ainley 2007).

The nesting area of this new locality occurs in a tropical hyper-arid climate with no precipitation and a mean annual temperature of 19 °C with minor differences between summer and winter (Luebert & Plissock 2006). The substrate is sandy with interspersed saltpeter patches and completely devoid of vegetation. Nests are located within a narrow band of saltpeter running west-east. The distance of the most inland (eastward) colonies is 15 km from the sea at a mean altitude of 650 masl. To reach the sea, birds must fly over the 850-900 m high coastal range.

We observed flying storm-petrels over an area of 6 km² (centered at 18° 30' S, 70° 15' W). We sampled burrowed areas via nest counts in eight 10 x10 m plots. Nest density was 2.6*100 m⁻² but the saltpeter areas were smaller with 12 patches with nests, and rendering a population of more than 5000 pairs. The widest part of the opening of 14 burrows had a mean ($\pm$ SD) of 10.3 $\pm$ 3.1 cm (range 7-18 cm), the narrowest part was (mean $\pm$ SD) 6.8 $\pm$ 1.9 cm (range 4-11 cm), and the depth of these burrows was > 40 cm; occupied burrows were narrower than those measured in Perú. There, nests with narrow diameters or with deeper burrows had a greater probability of success (Jahncke 1994). All nests were located inside saltpeter crevices and consisted of hollow scrapes in the sand with no nest material (only some feathers and feces). During nuptial displays storm-petrels engage in aerial pursuits with one bird following the other and both calling loudly (del Hoyo et al. 1992). During our survey we only observed solitary birds flying in circles above the nesting area, vocalizing frequently. Birds called in flight and also from within their burrows.

Most of the nesting areas we located were in salt pans that were very flat with only a few on slopes facing a creek, in contrast with the sloping terrain utilized by Markham's Storm-Petrels in Perú (Jahncke 1993). Both Brooke (2000) and Tobias et al. (2006) considered the salt flats of Atacama as possible colony sites, but questioned "whether the small salt peaks would provide a sufficient take-off point for birds, particularly fledglings on their first flight". This apparently does not seem to be a problem.

Egg laying by Markham's Storm-Petrel in Perú occurs from late June to August (Jahncke 1993), which indicates an austral winter-spring breeding season. In Chile reproduction seems to occur between March and June; fledglings are attracted by lights in cities from April to June. During our visit to the area in June we heard several fledglings vocalizing from the nests (but saw only one), even during the day.

Several dismembered storm-petrel wings were found in the salt pans, along with culpeo fox (*Pseudalopex culpaeus* (Molina, 1782)) footprints and feces with feathers of storm-petrels, and tracks of Turkey Vultures *Cathartes aura* Linnaeus, 1758 (and some of them soaring); no other vertebrate species were seen. In Paracas, two foxes (*P. culpaeus* and *P. sechurae* (Thomas, 1900)) are the predators of Markham's Storm-Petrel (Jahncke 1993, 1994).

Despite this storm-petrel being relatively common in the Humboldt Current, it was not until 1992 that a colony of 2300-4300 pairs was found on the Paracas Peninsula, Perú, in saltpeter deposits, between 200 and 300 m above sea level and about 5 km inland (Jahncke 1993, 1994). As a result of finding mummies, roadkills, and grounded nestlings, several authors (Johnson 1965, Brooke 2004, Tobias et al. 2006) suggested that this species likely breeds in the salt expanses, canyons, and coastal hills of the Atacama desert, extending from southern Perú to northern Chile. They also recommended that searches for colonies should be focused around Iquique, where breeding evidence has been suspected. As Paracas is at 13°48' N - 76°24' W, our finding extends the reproductive range 830 km south.

Threats to the nesting populations include mining (more common in the southern Tarapacá region; e.g. 20°58' S, 69°39' W) and human occupation. Near the nesting area

we saw bulldozer trails and a camp of road construction workers with machines and dogs. Seabirds, especially pelagic species, are more threatened than most other bird groups with similar numbers of species (Croxall et al. 2012), and several authors (Croxall et al. 1984, Tobias et al. 2006, Spear & Ainley 2007) suggested that the breeding seasons for Markham's and three other species known or suspected to nest in Chile-Perú deserts need better documentation (see Hertel & Torres-Mura 2003, Bernal et al. 2006). Data should include full coverage of the breeding range, which, judging from coastal distributions appears to extend along the South American coast from about 8° S to 25° S.

ACKNOWLEDGMENTS: We thank Laurence Packer and Gail Fraser for sharing information to us, Fritz Hertel for their lynchpin comments, and Francis van Oordt and Elisa Goya (IMARPE) for their help with Peruvian literature.

LITERATURE CITED

- BERNAL M, A SIMEONE & M FLORES (2006) Breeding of Wedge-rumped Storm- Petrels (*Oceanodroma tethys*) in Northern Chile. *Neotropical Ornithology* (USA) 17: 283-287.
- BROOKE, M de L (2000) Report on a project supported by a BOU research grant. *Ibis* 142: 348-349.
- CROXALL JP, PGH EVANS & RW SCHREIBER (1984) Status and conservation of the world's seabirds. ICBP Technical Publication No. 2, Cambridge.
- CROXALL JP, H STUART, M BUTCHART, B LASCELLES, AJ STATTERSFIELD, B SULLIVAN, A SYMES & P TAYLOR (2012) Seabird conservation status, threats and priority actions: a global assessment. *Bird Conservation International* 22:1-34.
- DEL HOYO J, A ELLIOTT & J SARGATAL (eds) (1992) Handbook of the birds of the world. Vol. 1. Ostrich to Ducks. Lynx Edicions, Barcelona.
- FIGUEROA J & E SUAZO (2012) Distribución de las aves marinas frente a la costa norte-centro del Perú en el invierno de 2010 y su interacción potencial con la pesquería. *The Biologist* (Perú) 10: 41-71.
- GARCÍA-GODOS I, E GOYA & J JAHNCKE (2002) The diet of Markham's Storm Petrel *Oceanodroma markhami* on the central coast of Perú. *Marine Ornithology* 30: 77-83.
- HARRISON P (1987) Seabirds of the world. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- HERTEL F & JC TORRES-MURA (2003). Discovery of a breeding colony of Elliot's Storm-Petrel (*Oceanites gracilis*, Hydrobatidae) in Chile. *Neotropical Ornithology* (USA) 14: 113-115.
- IUCN (2012) IUCN Red List of Threatened Species. Version 2012.2. URL: <http://www.iucnredlist.org> (accessed June 28, 2013).
- JAHNCKE J (1993) Primer informe del área de anidación de la golondrina de tempestad negra *Oceanodroma markhami* (Salvin, 1883). In: Castillo de Maruenda E (ed) *Memorias X Congreso Nacional de Biología*: 339-343. Lima, Perú.
- JAHNCKE J (1994) Biología y conservación de la golondrina de tempestad negra *Oceanodroma markhami* (Salvin 1883) en la península de Paracas, Perú. APECO, Lima. URL: <http://www.apeco.org.pe/> (accessed July 9, 2013).
- JOHNSON AW (1965) The birds of Chile and adjacent regions of Argentina, Bolivia and Perú. Volume I. Platt Establecimientos Gráficos, Buenos Aires.
- LUEBERT F & P PLISCOFF (2006) Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.
- MURPHY RC (1936) Oceanic birds of South America. American Museum of Natural History New York 2: 641-1245.
- SAG (2012) La Ley de Caza y su Reglamento. División de Protección de los Recursos Naturales Renovables, Servicio Agrícola y Ganadero, Santiago, Chile.
- SPEAR LB & DG AINLEY (2007) Storm-petrels of the Eastern Pacific Ocean: species assembly and diversity along marine habitat gradients. *Ornithological Monographs* (USA) 62: 1-77.
- TOBIAS JA, SHM BUTCHART & NJ COLLAR (2006) Lost and found: a gap analysis for the Neotropical avifauna. *Neotropical Birding* (England): 4-22.

Editorial Responsibility: Javier A. Simonetti

Received August 16, 2013; accepted October 10, 2013

The first World Atlas of the artificial night sky brightness

P. Cinzano,^{1,2★} F. Falchi^{1,2} and C. D. Elvidge³

¹*Dipartimento di Astronomia, Università di Padova, vicolo dell'Osservatorio 5, I-35122 Padova, Italy*

²*Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Inquinamento Luminoso (ISTIL), Thiene, Italy*

³*Office of the Director, NOAA National Geophysical Data Center, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, USA*

Accepted 2001 July 27. Received 2001 July 24; in original form 2000 December 18

ABSTRACT

We present the first World Atlas of the zenith artificial night sky brightness at sea level. Based on radiance-calibrated high-resolution DMSP satellite data and on accurate modelling of light propagation in the atmosphere, it provides a nearly global picture of how mankind is proceeding to envelop itself in a luminous fog. Comparing the Atlas with the United States Department of Energy (DOE) population density data base, we determined the fraction of population who are living under a sky of given brightness. About two-thirds of the World population and 99 per cent of the population in the United States (excluding Alaska and Hawaii) and European Union live in areas where the night sky is above the threshold set for polluted status. Assuming average eye functionality, about one-fifth of the World population, more than two-thirds of the United States population and more than one half of the European Union population have already lost naked eye visibility of the Milky Way. Finally, about one-tenth of the World population, more than 40 per cent of the United States population and one sixth of the European Union population no longer view the heavens with the eye adapted to night vision, because of the sky brightness.

Key words: scattering – atmospheric effects – light pollution – site testing.

1 INTRODUCTION

One of the most rapidly increasing alterations to the natural environment is the alteration of the ambient light levels in the night environment produced by man-made light. The study of global change must take into account this phenomenon called light pollution. Reported adverse effects of light pollution involve the animal kingdom, the vegetable kingdom and mankind (see e.g. Cinzano 1994 for a reference list). Moreover, the growth of the night sky brightness associated with light pollution produces a loss of perception of the Universe where we live (see e.g. Crawford 1991; Kovalevsky 1992; McNally 1994; Isobe & Hirayama 1998; Cinzano 2000d; Cohen & Sullivan 2001). This could have unintended impacts on the future of our society. In fact the night sky, which constitutes the panorama of the surrounding Universe, has always had a strong influence on human thought and culture, from philosophy to religion, from art to literature and science.

Interest in light pollution has been growing in many fields of science, extending from the traditional field of astronomy to atmospheric physics, environmental sciences, natural sciences and even human sciences. The full extent and implications of the problem have not been addressed to date owing to the fact that there have been no global-scale data on the distribution and magnitude of artificial sky brightness.

The zenith artificial night sky brightness at sea level is a useful indicator of the effects of light pollution on the night sky and the atmospheric content of artificial light. Sea level maps of it, being free of elevation effects, are useful for comparing pollution levels across large territories, for recognizing the most polluted areas or more polluting cities and for identifying dark areas (Cinzano et al. 2000, hereafter Paper I). Even if the capability to perceive the Universe is better shown by specific maps of stellar visibility, which account for altitude and atmospheric extinction (Cinzano et al. 2001a, hereafter Paper II), maps of the zenith artificial sky brightness at sea level provide a reasonable statistical evaluation of the visibility of the Milky Way and a comparison with typical natural brightness levels. The sea level product is also a reasonable starting point in the global study of light pollution given that population numbers are concentrated at low altitudes.

To date no global, quantitative and accurate depiction of the artificial brightness of the night sky has been available to the scientific community and governments. Ground based measurements of sky brightness are available only for a limited number of sites, mainly astronomical observatories, and are spread over many different years. The paucity of ground-based observations makes it impossible to construct global maps from this source.

One approach to modelling the spatial distribution of artificial night sky brightness is to predict it based on population density, because areas with high population usually produce higher levels of light pollution and, consequently, a high artificial luminosity of

★E-mail: cinzano@pd.astro.it; cinzano@lightpollution.it

the night sky (sky glow). However (i) the apparent proportionality between population and sky glow breaks down going from large scales to smaller scales and looking in more detail, owing to the atmospheric propagation of light pollution large distances from the sources, (ii) the upward light emission is not always proportional to the population (e.g. owing to differences in development and lighting practices), (iii) some polluting sources are not represented in population data (e.g. industrial sites and gas flares) and (iv) population census data are not collected using uniform techniques, timetables or administrative reporting units around the World.

As an alternative, we have used a global map of top of atmosphere radiances from man-made light sources produce using data from the US Air Force Defence Meteorological Satellite Program (DMSP) Operational Linescan System (OLS) to model artificial sky brightness. From 1972–92 only film data were available from the DMSP-OLS. Sullivan (1989, 1991) was successful in producing a global map of light sources using film data, but this product did not distinguish between the persistent light sources of cities and the ephemeral lights of events such as fire. In the mid-1990s Elvidge et al. (1997a,b,c) produced a global cloud-free composite of lights using a time-series of DMSP night-time observations, identifying the locations of persistent light sources. This potential use of these ‘stable lights’ for light pollution studies was noted by Isobe & Hamamura (1998). More recently a radiance-calibrated global map of man-made light sources has been produced using DMSP-OLS data collected at reduced gain settings (Elvidge et al. 1999, 2001). With both the location and top of atmosphere radiances mapped, the stage was set to model artificial sky brightness across the surface of the World.

The first exploration of these data for predicting artificial sky brightness was made by applying simple light pollution propagation laws to the satellite data (Falchi 1998; Falchi & Cinzano 2000). Subsequently we introduced a method to map the artificial sky brightness (Paper I) and naked-eye star visibility (Paper II) across large territories, computing the propagation of light inside the atmosphere using the detailed Garstang Models (Garstang 1984, 1986, 1989a,b, 1991, 2000; see also Cinzano

2000a,b). Here we present the first World Atlas of the zenith artificial night sky brightness at sea level. It has been obtained by applying the method discussed in Paper I to global high-resolution radiance-calibrated DMSP satellite data. In Section 2 we summarize the outline of the method, in Section 3 we present the Atlas and a comparison with Earth-based measurements, in Section 4 we present statistical results and tables based on a comparison with the Landsat 2000 DOE population density data base (Dobson et al. 2000) and in Section 5 we draw our conclusions.

2 OUTLINES OF THE METHOD

Here we summarize the methods used to produce the World Atlas. We refer the readers to Paper I and Paper II for a detailed discussion.

High-resolution upward flux data have been calculated from radiances observed by the Operational Linescan System (OLS) carried by the DMSP satellites. The OLS is an oscillating scan radiometer with low-light visible and thermal infrared (TIR) imaging capabilities (Lieske 1981). At night the OLS uses a photomultiplier tube (PMT), attached to a 20-cm reflector telescope, to intensify the visible band signals. It has a broad spectral response from 440 to 940 nm with highest sensitivity in the 500- to 650-nm region, covering the range for primary emissions from the most widely used lamps for external lighting: mercury vapour (545 and 575 nm), high-pressure sodium (from 540 to 630 nm) and low-pressure sodium (589 nm). We used a global map of radiances produced using 28 nights of data collected in 1996–97 at reduced gain levels, to avoid saturation in urban centres. The global map is a ‘cloud-free’ composite, meaning that only cloud-free observations were used. The map reports the average radiance observed from the set of cloud-free observations. Ephemeral lights produced by fires and random noise events were removed by deleting lights that occurred in the same place less than three times. Calibrated upward fluxes per unit solid angle toward the satellite have been obtained from radiance data based on a pre-flight irradiance calibration of the OLS PMT. The calibration was tested

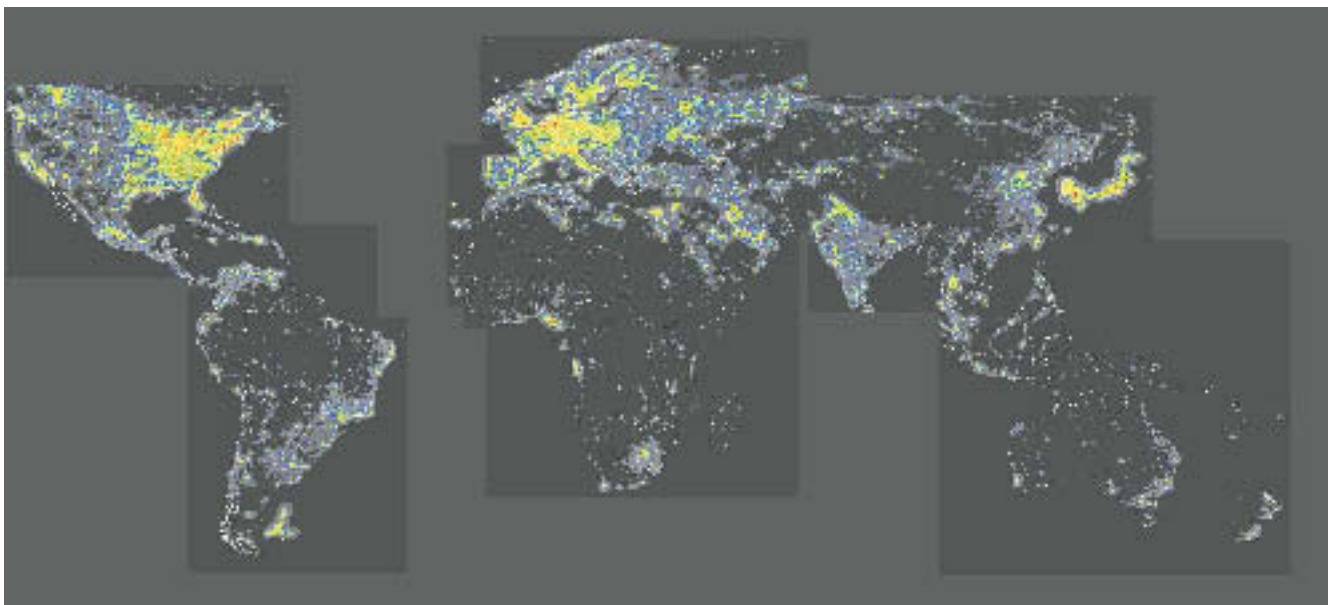


Figure 1. Artificial night sky brightness at sea level in the World. The map has been computed for the photometric astronomical V band, at the zenith, for a clean atmosphere with an aerosol clarity coefficient $K = 1$. The calibration refers to 1996–1997. Country boundaries are approximate.

with Earth-based measurements in Paper I. The upward flux per unit solid angle in other directions was estimated based on an average normalized emission function, in agreement with a study of the upward flux per unit solid angle per inhabitant of a large number of cities at different distances from the satellite nadir.

The propagation of light pollution is computed with the Garstang modelling techniques taking into account Rayleigh scattering by molecules, Mie scattering by aerosols, atmospheric extinction along light paths and Earth curvature. We neglected third and higher order scattering, which can be significant only for optical thicknesses higher than ours. We associated the predictions with well-defined parameters related to the aerosol content, so the atmospheric conditions, which predictions involve, are well known. Atmospheric conditions are variable and a careful evaluation of the ‘typical’ atmospheric condition in the local ‘typical’ clear night of each area is quite difficult, even regarding the difficulty to define it, so we used the same atmospheric model everywhere, corresponding to a standard clean atmosphere (Garstang 1986, 1989; Paper I; Paper II). This also avoids confusion between effects arising from light pollution and effects arising from geographic gradients of atmospheric conditions in ‘typical’ nights. Being more interested in understanding and comparing light pollution distributions than in predicting the effective sky brightness for observational purposes, we computed the artificial sky brightness at sea level, in order to avoid the introduction of altitude effects into our maps. Readers should

consider these differences when interpreting the Atlas results and the related statistics.

3 RESULTS

The World Atlas of the Sea Level Artificial Night Sky Brightness has been computed for the photometric astronomical V band, at the zenith, for a clean atmosphere with an aerosol clarity coefficient $K = 1$, where K is a coefficient which measures the aerosol content of the atmosphere (Garstang 1986), corresponding to a vertical extinction $\Delta m = 0.33$ mag in the V band, a horizontal visibility $\Delta x = 26$ km and an optical depth $\tau = 0.3$. The maps of each continent are shown in Figs 1–9 in latitude/longitude projection. The original high-resolution maps of the World Atlas are downloadable as zipped TIFF files from site <http://www.lightpollution.it/dmsp/> on the World Wide Web. They have been obtained with a mosaic of the original 30×30 arcsec² pixel size maps. Each map level is three times larger than the previous one. The map levels correspond to the artificial sky brightnesses (between brackets the respective colours) in V ph cm⁻² s⁻¹ sr⁻¹: 9.47×10^6 – 2.84×10^7 (blue), 2.84×10^7 – 8.61×10^7 (green), 8.61×10^7 – 2.58×10^8 (yellow), 2.58×10^8 – 7.75×10^8 (orange), 7.75×10^8 – 2.32×10^9 (red), $> 2.32 \times 10^9$ (white), or in μ cd m⁻²: 27.7–83.2 (blue), 83.2–252 (green), 252–756 (yellow), 756–2268 (orange), 2268–6804 (red), > 6804 (white) (based on the conversion in Garstang 1986, 1989). For the dark grey level see below. The

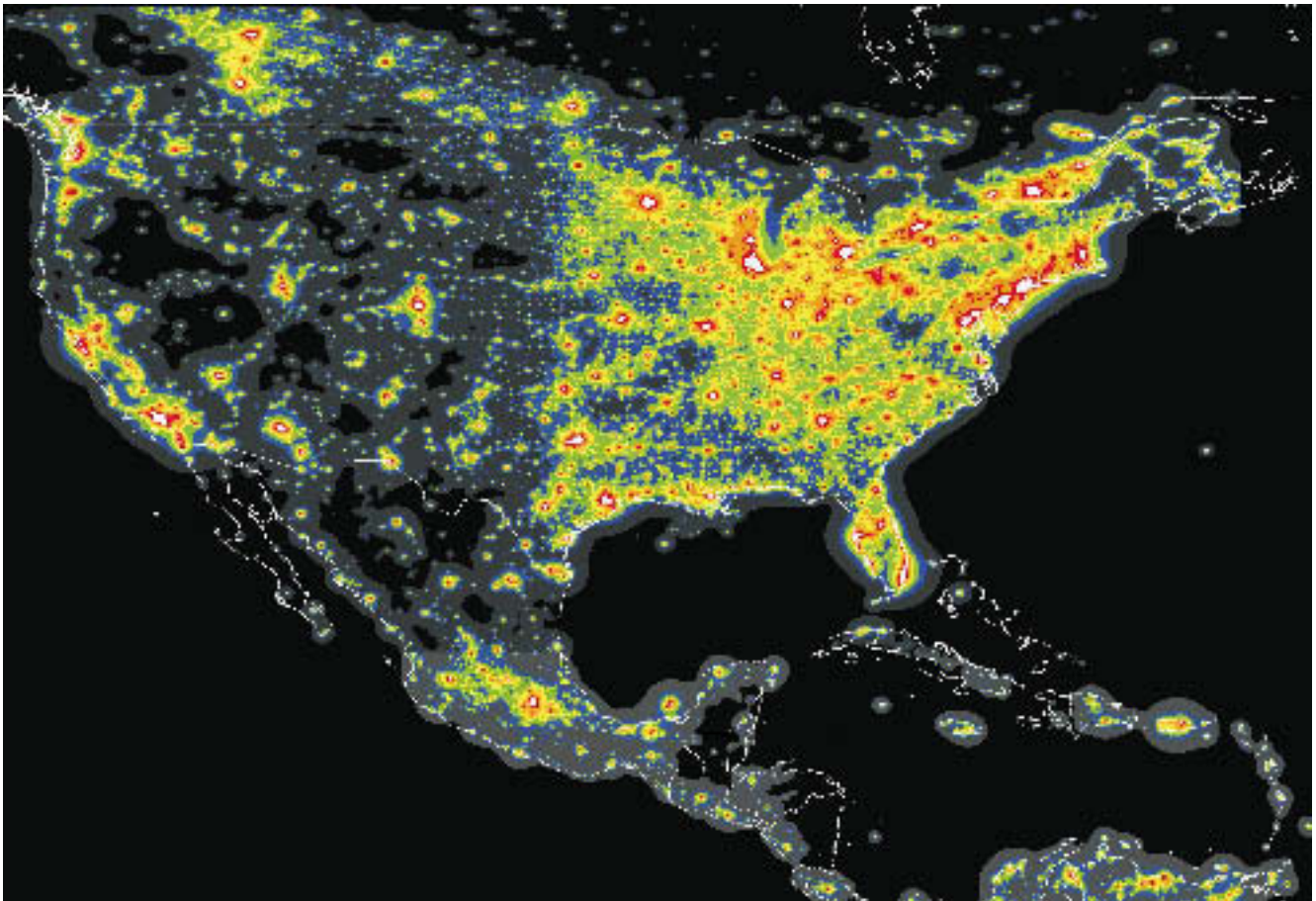


Figure 2. Artificial night sky brightness at sea level for North America. The map has been computed for the photometric astronomical V band, at the zenith, for a clean atmosphere with an aerosol clarity coefficient $K = 1$. The calibration refers to 1996–1997. Country boundaries are approximate.

map levels can be expressed more intuitively as ratios between the artificial sky brightness and the reference natural sky brightness. The natural night sky brightness depends on the geographical position, the solar activity, the time from the sunset and the sky area observed (see e.g. Paper II), so we referred the levels in our maps to an average sky brightness below the atmosphere of $b_n = 8.61 \times 10^7 \text{ V ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, corresponding approximately to $21.6 \text{ V mag arcsec}^{-2}$ or $252 \mu\text{cd m}^{-2}$ (Garstang 1986). In this case the map levels became 0.11–0.33 (blue), 0.33–1 (green), 1–3

(yellow), 3–9 (orange), 9–27 (red) and > 27 (white). Country boundaries are approximate. In order to show how far the light pollution propagates from sources, we coloured in dark grey areas where the artificial sky brightness is greater than 1 per cent of the reference natural brightness (i.e. greater than $8.61 \times 10^5 \text{ V ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ or $2.5 \mu\text{cd m}^{-2}$). In these areas the night sky can be considered unpolluted at the zenith but at lower elevations pollution might not be negligible and uncontrolled growth of light pollution will endanger even the zenith sky. This

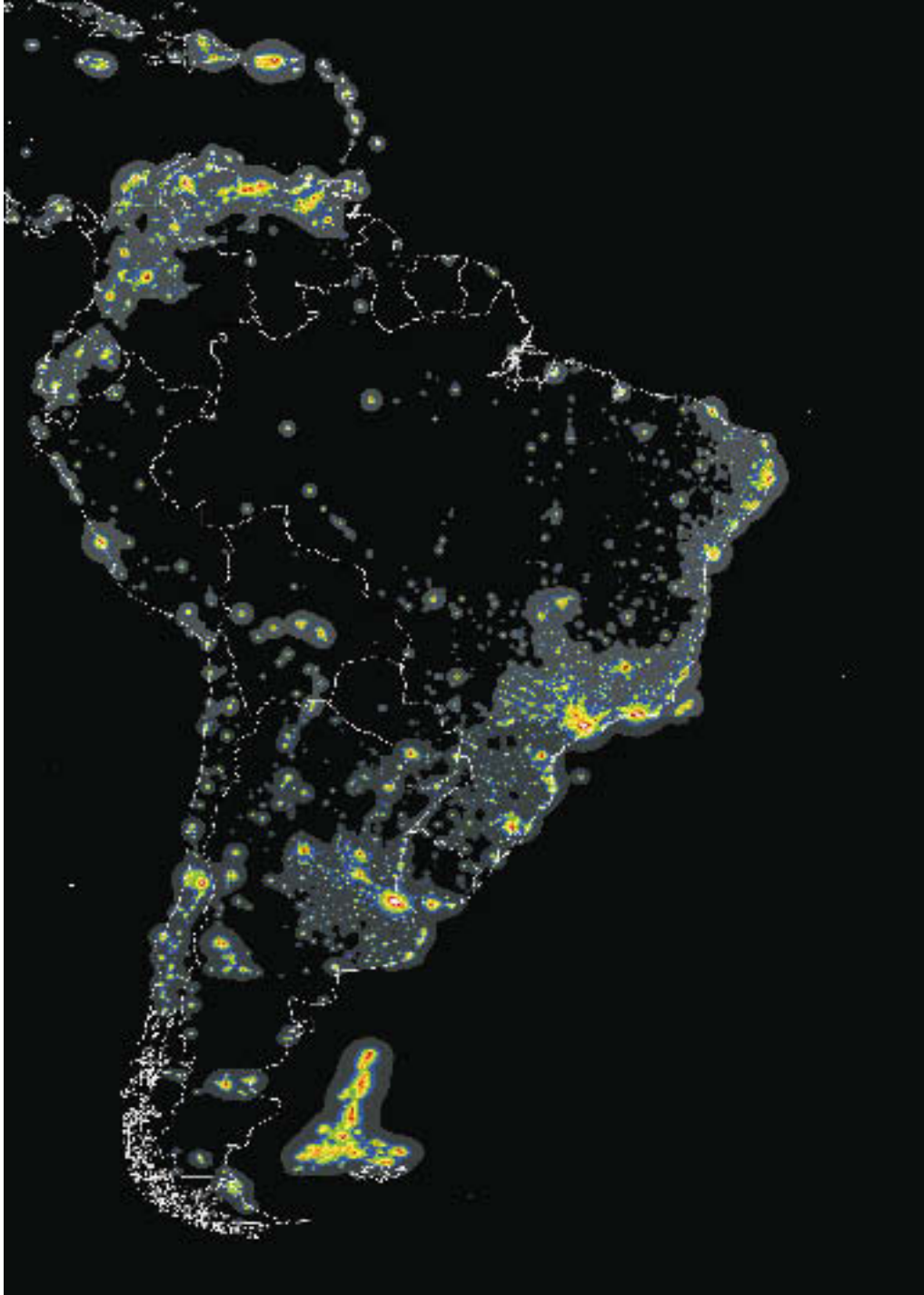


Figure 3. Artificial night sky brightness at sea level for South America. The map has been computed for the photometric astronomical V band, at the zenith, for a clean atmosphere with an aerosol clarity coefficient $K = 1$. The calibration refers to 1996–1997. Country boundaries are approximate.

level must be considered only an indication, because small differences in atmospheric conditions can produce large differences where the gradient of artificial brightness is small.

The resolution of the atlas does not correspond directly to the DMSP-OLS pixel size. The effective instantaneous field of view (EIFOV) of OLS-PMT is larger than the pixel-to-pixel ground sample distance maintained by the along-track OLS sinusoidal scan and the electronic sampling of the signal from the individual scan lines. Moreover the original data have been ‘smoothed’ by on-board averaging of 5 pixel by 5 pixel blocks, yielding a ground sample distance of 2.8 km. During geolocation the OLS pixel values are used to fill 30-arcsec grids, which are composited to generate the global 30-arcsec grid. However, since the sky

brightness is frequently produced by the sum of many contributions from distant sources, the lower resolution of the upward flux data commonly does not play a role and the map resolution mainly corresponds to the 30-arcsec grid cell size, which at the equator is 0.927 km.

The satellite data also record the offshore lights where oil and gas production is active (visible e.g. in the North Sea, Chinese Sea and Arabic Gulf), other natural gas flares (visible e.g. in Nigeria) and the fishing fleets (visible e.g. near the coast of Argentina, in the Japan Sea and near Malacca). Their upward emission functions likely differ from the average emission function of the urban night-time lighting so that the predictions of their effects have some uncertainty. The presence of snow could also add some uncertainty

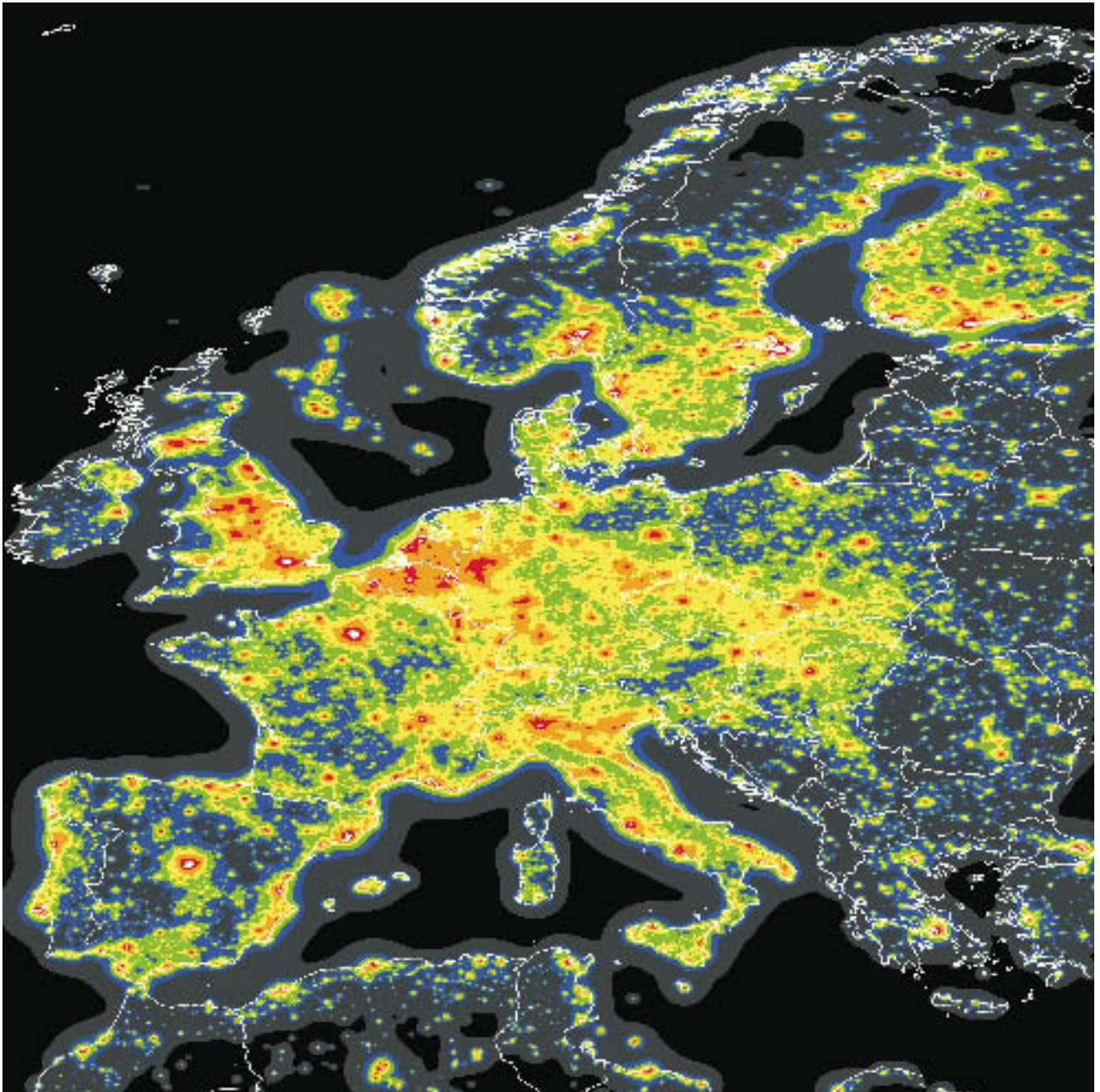


Figure 4. Artificial night sky brightness at sea level for Europe. The map has been computed for the photometric astronomical V band, at the zenith, for a clean atmosphere with an aerosol clarity coefficient $K = 1$. The calibration refers to 1996–1997. Country boundaries are approximate.

(see Paper I). For this reasons we neglected territories near the poles.

The differences between the levels for Europe in Fig. 4, based on the pre-flight OLS-PMT radiance calibration and referring to 1996–1997, and in figs 11 and 12 of Paper I, based on calibration with Earth-based measurements and referring to 1998–1999, agree with the yearly growth of light pollution measured in Europe (see e.g. Cinzano 2000c) but they cannot be considered significant because they are within the uncertainties of the method.

A comparison between map predictions and Earth-based sky brightness measurements is presented in Fig. 10. The left panel shows map predictions versus artificial night sky brightness measurements at the bottom of the atmosphere taken in clean or

photometric nights in the *V* band for Europe (filled squares), North America (open triangles), South America (open rhombi), Africa (filled triangles) and Asia (filled circle) (Catanzaro & Catalano 2000; Della Prugna 1999; Falchi 1998; Favero et al. 2000; Massey & Foltz 2000; Nawar et al. 1998a; Nawar, Morcos & Mikhail 1998b; Piersimoni, Di Paolantonio & Brocato 2000; Poretti & Scardia 2000; Zitelli 2000). All of them have been taken in 1996–1997, except those for Europe which have been taken in 1998–1999 and rescaled to 1996–1997 by subtracting 20 per cent in order to account approximately for the growth of light pollution in two years. Error bars account for measurement errors and for an uncertainty of about $0.1 \text{ mag arcsec}^{-2}$ in the subtracted natural sky brightness, which is non-negligible in dark sites. These are smaller

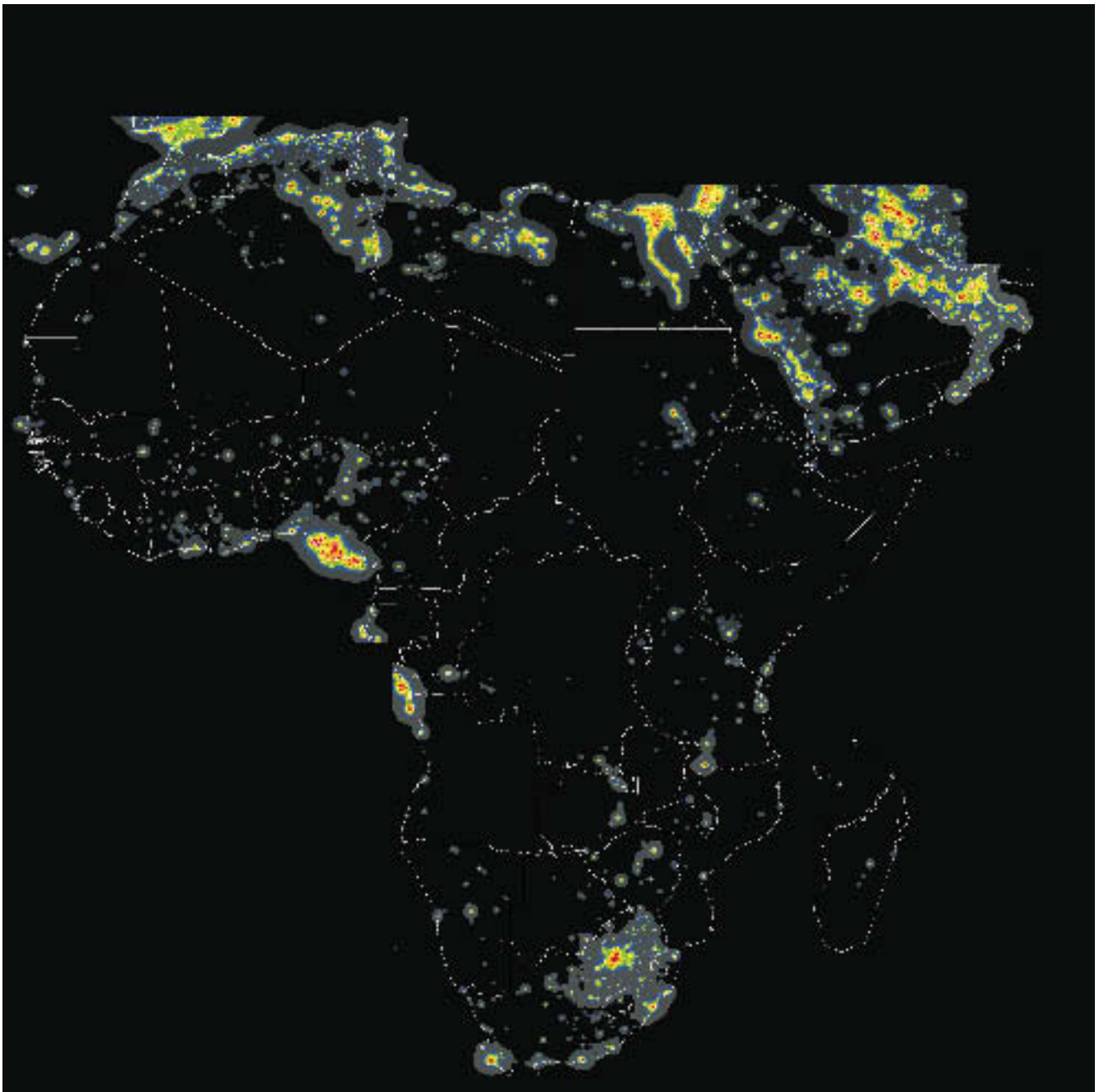


Figure 5. Artificial night sky brightness at sea level for Africa. The map has been computed for the photometric astronomical *V* band, at the zenith, for a clean atmosphere with an aerosol clarity coefficient $K = 1$. The calibration refers to 1996–1997. Country boundaries are approximate.

than the effects of fluctuations in atmospheric conditions. The right panel shows map predictions versus photographic measurements taken in Japan in the period 1987–1991 with variable atmospheric aerosol content (Kosai, Isobe & Nakayama 1992). They are calibrated to the top of the atmosphere and averaged for each site,

neglecting those where fewer than five measurements were taken. The large error bars show the effects of changes in the atmospheric aerosol content and in the extinction of the light of the comparison star. The dashed line shows the linear regression. A worldwide project of the International Dark-Sky Association (IDA) is

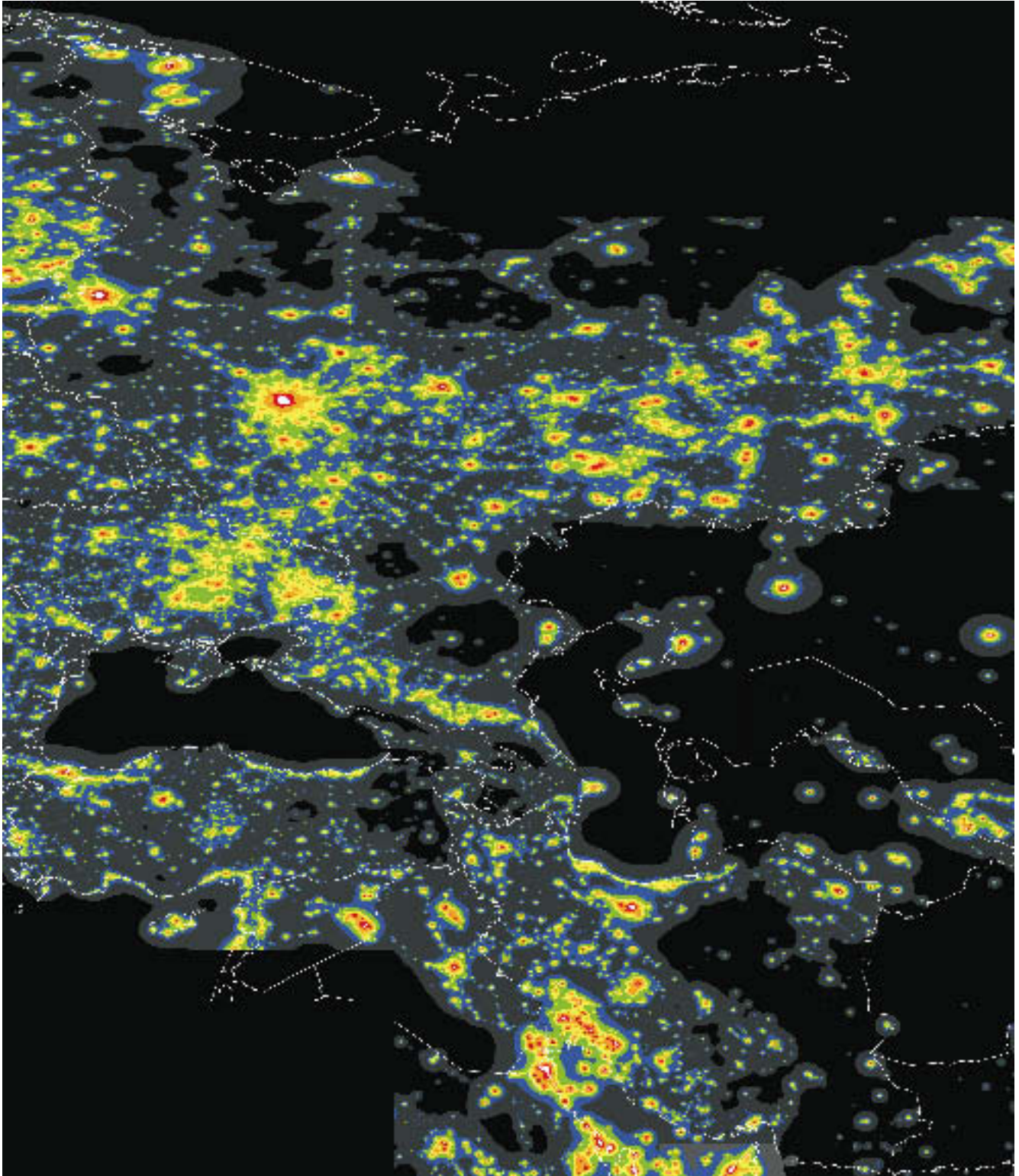


Figure 6. Artificial night sky brightness at sea level for West Asia. The map has been computed for the photometric astronomical V band, at the zenith, for a clean atmosphere with an aerosol clarity coefficient $K = 1$. The calibration refers to 1996–1997. Country boundaries are approximate.

collecting a large number of accurate CCD measurements of sky brightness together with the aerosol content, which could be valuable for testing future improvements in the modelling of artificial sky brightness (Cinzano & Falchi 2000).

4 STATISTICS

We compared our Atlas with the Landsat 2000 DOE global

population density data base (Dobson et al. 2000), which has the same 30-arcsec grid cell size as our Atlas. We checked the spatial match of our Atlas against the Landsat data by visual inspection of the superimposition of the two data sets. We extracted statistics for each individual countries, for the European Union and for the World, tallying the percentage population who on standard clear atmosphere nights are living inside each level of our Atlas. Additionally we tallied the percentage population living under a

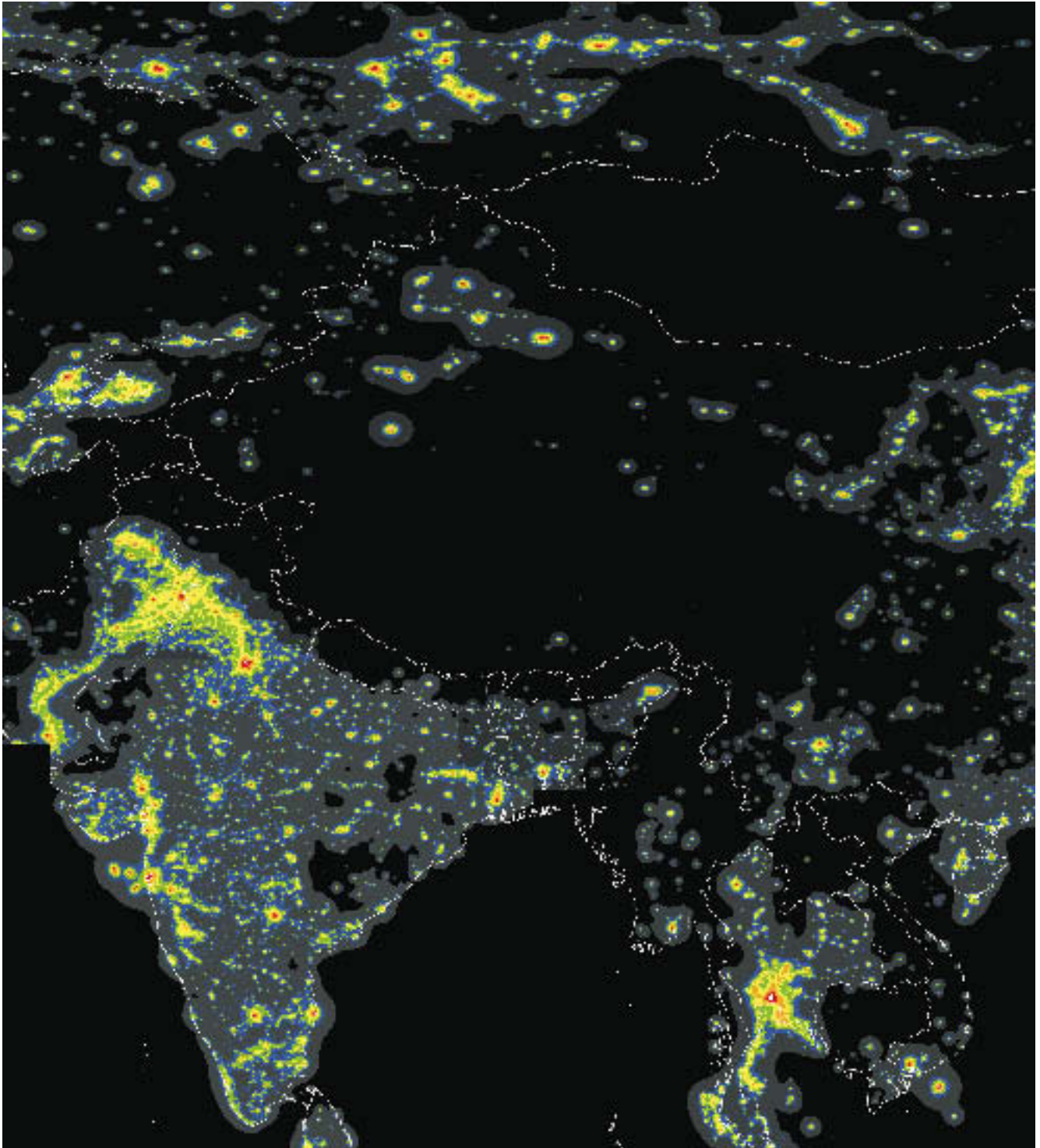


Figure 7. Artificial night sky brightness at sea level for Central Asia. The map has been computed for the photometric astronomical V band, at the zenith, for a clean atmosphere with an aerosol clarity coefficient $K = 1$. The calibration refers to 1996–1997. Country boundaries are approximate.

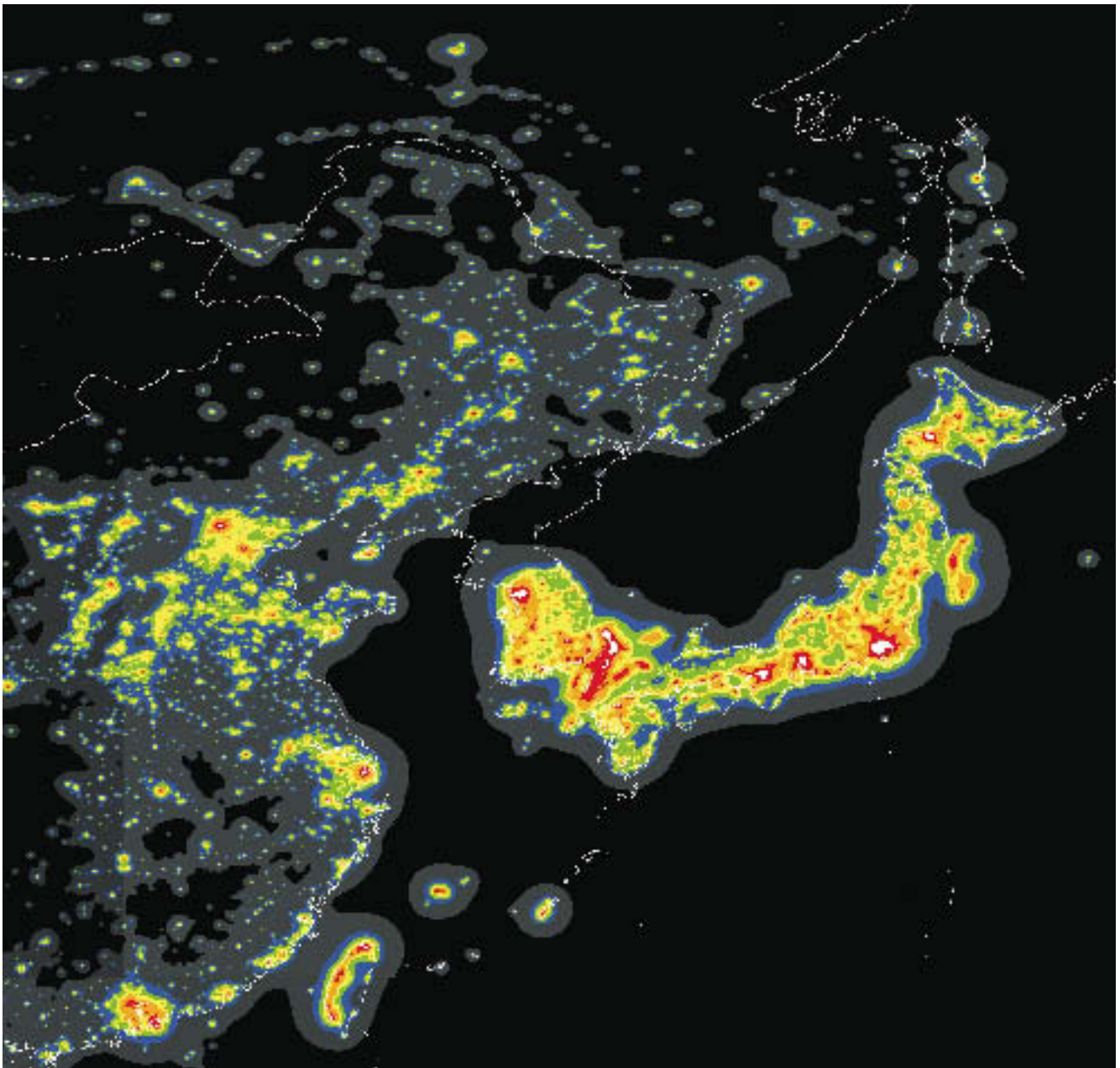


Figure 8. Artificial night sky brightness at sea level for East Asia. The map has been computed for the photometric astronomical V band, at the zenith, for a clean atmosphere with an aerosol clarity coefficient $K = 1$. The calibration refers to 1996–1997. Country boundaries are approximate.

sky brightness greater than several other sky brightness conditions, as described below. Table 1 shows the percentage of population who are living under a sky brightness greater than each level of our Atlas in standard clean nights, i.e. the ratios between the artificial sky brightness and the reference natural sky brightness are greater than 0.11 (column 1), 0.33 (column 2), 1 (column 3), 3 (column 4), 9 (column 5) and 27 (column 6). The table also shows the fraction of population who in standard clean nights are living under a sky brightness greater than some typical sky brightnesses: the threshold b_p to consider the night sky polluted [i.e. when the artificial sky brightness is greater than 10 per cent of the natural night sky brightness above 45° of elevation (Smith 1979)] (column 7), the sky brightness b_{fq} measured with a first quarter moon in the best astronomical sites (e.g. Walker 1987)(column 8), the sky brightness b_m in the considered location with a first quarter

moon at 15° elevation (based on Krisciunas & Schaefer 1991) and zero light pollution (column 9), the sky brightness b_{fm} measured on nights close to full moon in the best astronomical sites (e.g. Walker 1987)(column 10) which is not much larger than the typical zenith brightness at nautical twilight (Schaefer 1993), the threshold of visibility of the Milky Way for average eye capability b_{mw} (column 11), and the eye's night vision threshold b_e (Garstang 1986; see also Schaefer 1993)(column 12). Table 2 summarizes their numerical values.

To produce the Landscan, DOE collected the best available census data for each country and calculated a probability coefficient for the population density of each 30-arcsec grid cell. The probability coefficient is based on slope, proximity to roads, land cover, night-time lights, and an urban density factor (Dobson et al. 2000). The probability coefficients are used to perform a

Table 1. Percentage of population who are living under a sky brightness greater than given levels.

Country	(1) $\geq 0.11b_n$	(2) $\geq 0.33b_n$	(3) $\geq b_n$	(4) $\geq 3b_n$	(5) $\geq 9b_n$	(6) $\geq 27b_n$	(7) $\geq b_p$	(8) $\geq b_{iq}$	(9) $\geq b_m$	(10) $\geq b_{im}$	(11) $\geq b_{mw}$	(12) $\geq b_e$
Afghanistan	11	8	1	0	0	0	12	8	1	0	0	0
Albania	50	39	27	7	0	0	53	39	27	5	0	0
Algeria	86	74	61	36	12	2	87	73	61	30	16	4
Andorra	100	100	100	90	0	0	100	100	100	85	48	0
Angola	16	15	14	11	7	0	16	14	11	10	0	0
Anguilla UK	100	99	51	0	0	0	100	99	51	0	0	0
Antigua-Barbuda	98	91	70	21	0	0	98	90	70	0	0	0
Argentina	74	71	67	59	44	23	75	70	67	58	52	29
Armenia	91	88	61	42	0	0	92	88	61	35	0	0
Australia	71	69	68	62	37	1	71	69	68	60	48	8
Austria	100	97	82	45	21	0	100	97	82	41	29	9
Azerbaijan	82	76	54	29	1	0	82	75	54	27	19	0
Bahamas	84	82	81	75	58	0	85	82	81	73	66	0
Bahrain	100	100	100	99	99	76	100	100	100	99	99	98
Bangladesh	43	29	18	8	4	0	45	29	18	8	6	0
Barbados	100	98	91	61	0	0	100	98	91	56	27	0
Belgium	100	100	100	96	52	8	100	100	100	94	76	21
Belize	31	17	6	0	0	0	34	16	6	0	0	0
Benin	28	24	17	2	0	0	29	24	17	0	0	0
Bermuda UK	100	100	100	44	0	0	100	100	100	14	0	0
Bhutan	10	7	0	0	0	0	10	6	0	0	0	0
Bolivia	58	57	56	52	37	0	58	57	56	50	45	15
Bosnia-Herzegovina	80	61	32	0	0	0	82	60	32	0	0	0
Botswana	23	20	16	8	0	0	23	20	16	8	1	0
Brazil	66	60	55	45	29	10	66	59	55	43	36	17
British Virgin Islands	70	63	52	0	0	0	70	63	52	0	0	0
Brunei	93	84	78	58	28	0	94	84	78	53	44	0
Bulgaria	84	71	53	22	1	0	86	70	53	19	8	0
Burkina Faso	7	6	5	3	0	0	7	6	5	3	0	0
Burundi	6	4	4	0	0	0	6	4	4	0	0	0
Byelarus	86	78	68	45	13	0	87	78	68	37	18	0
Caiman Islands UK	92	90	78	55	0	0	92	86	78	50	16	0
Cambodia	14	11	9	7	0	0	15	11	9	5	0	0
Cameroon	22	20	18	14	0	0	22	20	18	9	0	0
Canada	97	94	90	83	71	46	97	94	90	82	77	59
Central African Rep.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chad	7	5	5	0	0	0	7	5	5	0	0	0
Chile	87	83	79	72	49	26	88	82	79	71	61	34
China	54	41	29	13	5	1	55	40	29	12	7	2
Cisgiordania	100	100	100	81	37	0	100	100	100	73	51	24
Colombia	77	68	60	49	34	8	78	67	60	47	40	22
Congo	41	39	36	33	0	0	41	39	36	27	0	0
Costa Rica	80	70	64	56	39	0	81	70	64	55	50	14
Croatia	96	85	67	31	15	0	96	84	67	25	17	0
Cuba	55	47	39	19	2	0	57	47	39	17	11	0
Cyprus	98	91	83	66	36	0	98	91	83	65	56	0
Czech Republic	100	100	95	59	22	0	100	100	95	52	34	5
Denmark	100	97	85	53	23	0	100	97	85	50	33	3
Djibouti	24	22	21	14	0	0	25	22	21	0	0	0
Dominica	7	4	0	0	0	0	7	4	0	0	0	0
Dominican Republic	84	74	64	48	36	0	85	74	64	45	38	16
Ecuador	57	48	41	27	9	0	58	48	41	24	15	2
Egypt	100	100	99	82	33	19	100	100	99	73	43	23
El Salvador	83	71	55	38	26	0	84	70	55	35	29	5
Equatorial Guinea	18	15	15	14	5	0	18	15	15	14	13	1
Eritrea	17	15	13	3	0	0	18	15	13	0	0	0
Estonia	86	72	65	55	35	0	88	72	65	53	42	20
Ethiopia	6	5	4	4	0	0	6	5	4	4	2	0
Falkland Islands UK	8	2	0	0	0	0	9	2	0	0	0	0
Faroe Islands	75	69	58	0	0	0	76	69	58	0	0	0
Fiji Islands	18	14	1	0	0	0	19	14	1	0	0	0
Finland	98	94	88	80	65	24	98	94	88	78	72	44
France	100	95	84	67	41	12	100	95	84	64	51	22
French Guiana	37	37	24	0	0	0	37	37	24	0	0	0
Gabon	39	37	34	31	1	0	39	37	34	22	1	0
Gambia	28	26	23	0	0	0	28	26	23	0	0	0
Gaza	100	100	100	95	0	0	100	100	100	79	36	0
Georgia	81	76	50	14	0	0	81	76	50	10	0	0
Germany	100	100	94	66	25	0	100	100	94	60	40	5
Ghana	29	23	18	12	4	0	30	23	18	11	7	0

Table 1 – continued

Country	(1) $\geq 0.11b_n$	(2) $\geq 0.33b_n$	(3) $\geq b_n$	(4) $\geq 3b_n$	(5) $\geq 9b_n$	(6) $\geq 27b_n$	(7) $\geq b_p$	(8) $\geq b_{fq}$	(9) $\geq b_m$	(10) $\geq b_{fm}$	(11) $\geq b_{mw}$	(12) $\geq b_e$
Gibraltar UK	100	100	100	100	0	0	100	100	100	100	84	0
Greece	90	80	70	54	41	17	91	80	70	52	44	31
Grenada	47	43	14	0	0	0	47	42	14	0	0	0
Guadeloupe	95	95	88	38	1	0	95	95	88	32	17	0
Guatemala	53	39	30	22	17	0	55	38	30	22	20	3
Guernsey UK	100	100	99	14	0	0	100	100	99	0	0	0
Guinea	10	9	7	0	0	0	10	9	7	0	0	0
Guinea-Bissau	21	18	5	0	0	0	21	18	5	0	0	0
Guyana	39	36	32	8	0	0	39	36	32	0	0	0
Haiti	24	22	20	16	0	0	25	22	20	14	0	0
Honduras	49	41	35	27	12	0	50	41	35	27	22	0
Hungary	100	95	76	41	19	5	100	94	76	37	23	12
India	61	41	25	12	4	0	63	40	25	10	6	1
Indonesia	42	33	24	12	4	0	42	33	24	11	6	0
Iran	88	81	73	57	35	14	89	81	73	54	42	21
Iraq	86	77	68	44	24	5	87	77	68	40	28	16
Ireland	86	65	52	37	19	0	88	65	52	34	27	0
Isle of Man UK	100	86	54	0	0	0	100	85	54	0	0	0
Israel	100	100	99	97	79	26	100	100	99	95	90	52
Italy	100	99	95	78	35	6	100	99	95	72	50	15
Ivory Coast	26	22	18	14	1	0	26	21	18	13	10	0
Jamaica	98	87	67	44	26	0	99	85	67	43	33	5
Japan	100	99	96	86	63	27	100	99	96	84	73	41
Jersey UK	100	100	96	0	0	0	100	100	96	0	0	0
Jordan	94	91	88	70	35	8	94	91	88	65	57	23
Kazakhstan	58	54	47	31	3	0	58	54	47	26	9	0
Kenya	19	16	12	7	0	0	19	16	12	6	1	0
Kuwait	100	100	100	99	98	86	100	100	100	99	98	96
Kyrgyzstan	75	66	47	17	0	0	75	66	47	12	6	0
Laos	16	14	11	2	0	0	16	14	11	0	0	0
Latvia	77	68	61	47	33	0	78	68	61	44	37	11
Lebanon	100	97	81	43	2	0	100	96	81	37	14	0
Lesotho	17	11	9	0	0	0	17	11	9	0	0	0
Liberia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Libya	83	78	73	62	39	8	84	78	73	58	48	21
Liechtenstein	100	100	100	0	0	0	100	100	100	0	0	0
Lithuania	86	71	61	42	12	0	89	71	61	38	23	0
Luxembourg	100	100	100	94	63	0	100	100	100	90	81	11
Macau P	100	100	100	100	100	0	100	100	100	100	100	0
Macedonia	92	82	71	32	0	0	94	81	71	29	12	0
Madagascar	11	10	8	0	0	0	11	10	8	0	0	0
Malawi	15	13	10	0	0	0	15	13	10	0	0	0
Malaysia	78	68	58	40	20	1	78	68	58	36	25	8
Mali	15	13	9	6	0	0	15	13	9	5	0	0
Malta	100	100	100	91	48	0	100	100	100	88	77	0
Martinique F	100	99	93	61	0	0	100	99	93	58	39	0
Mauritania	23	22	21	17	0	0	23	22	21	17	0	0
Mayotte F	6	5	0	0	0	0	7	3	0	0	0	0
Mexico	88	81	72	59	44	25	89	80	72	57	50	33
Moldova	93	83	62	33	0	0	95	83	62	27	9	0
Monaco	100	100	100	100	87	0	100	100	100	100	100	0
Mongolia	34	33	31	16	0	0	34	33	31	11	0	0
Montenegro	83	74	58	9	0	0	84	74	58	0	0	0
Montserrat UK	56	25	0	0	0	0	59	25	0	0	0	0
Morocco	62	53	45	35	16	4	63	52	45	32	25	7
Mozambique	10	9	7	4	0	0	10	9	7	3	1	0
Myanmar	25	19	12	8	2	0	25	19	12	7	5	0
Namibia	17	16	13	8	3	0	17	16	13	8	6	0
Nepal	25	19	9	3	0	0	26	18	9	2	0	0
Netherlands	100	100	100	88	39	2	100	100	100	85	60	16
Netherlands Antilles	100	98	93	89	56	0	100	98	93	84	69	0
New Caledonia	45	44	44	42	0	0	45	44	44	41	0	0
New Zealand	87	84	81	67	25	0	87	84	81	61	45	2
Nicaragua	56	48	42	22	11	0	57	48	42	22	20	0
Niger	3	2	1	1	0	0	3	2	1	1	0	0
Nigeria	45	37	27	17	7	1	46	36	27	15	12	2
Norfolk Islands AU	7	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
North Korea	25	18	13	1	0	0	26	17	13	0	0	0
Norway	95	89	82	72	52	20	96	89	82	70	61	30
Oman	90	83	73	39	24	0	90	82	73	35	27	12

Table 1 – *continued*

Country	(1) $\geq 0.11b_n$	(2) $\geq 0.33b_n$	(3) $\geq b_n$	(4) $\geq 3b_n$	(5) $\geq 9b_n$	(6) $\geq 27b_n$	(7) $\geq b_p$	(8) $\geq b_{iq}$	(9) $\geq b_m$	(10) $\geq b_{im}$	(11) $\geq b_{mw}$	(12) $\geq b_e$
Pakistan	87	77	54	26	14	4	88	76	54	24	18	8
Panama	65	57	49	38	23	0	65	57	49	36	29	0
Papua New Guinea	13	12	10	3	0	0	13	12	10	2	0	0
Paraguay	60	55	50	41	31	0	61	55	50	38	36	16
Peru	58	56	52	44	30	15	59	56	52	41	33	23
Philippines	50	42	34	23	14	2	50	42	34	22	17	8
Poland	99	88	72	44	18	0	100	87	72	39	26	3
Portugal	98	90	80	60	33	14	99	89	80	57	42	22
Puerto Rico	100	100	100	93	46	23	100	100	100	90	67	33
Qatar	100	100	99	97	92	81	100	100	99	96	94	84
Romania	84	69	52	23	7	0	86	69	52	19	13	0
Russia	87	80	73	60	34	8	88	79	73	57	44	15
Rwanda	6	4	4	0	0	0	6	4	4	0	0	0
Saint Kitts e Nevis	97	84	65	0	0	0	99	81	65	0	0	0
Saint Lucia	88	84	69	0	0	0	89	84	69	0	0	0
San Marino	100	100	100	99	0	0	100	100	100	90	0	0
Saudi Arabia	94	92	90	84	74	53	94	92	90	83	78	64
Senegal	35	32	26	18	0	0	35	31	26	18	2	0
Serbia	95	83	63	22	5	0	96	82	63	19	12	0
Seychelles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sierra Leone	15	15	14	0	0	0	15	15	14	0	0	0
Singapore	100	100	100	100	100	60	100	100	100	100	100	95
Slovakia	100	100	92	35	7	0	100	100	92	29	14	0
Slovenia	100	98	81	47	19	0	100	97	81	43	30	0
Somalia	11	9	0	0	0	0	11	9	0	0	0	0
South Africa	58	51	46	38	23	1	58	51	46	36	29	10
South Korea	100	100	99	92	75	45	100	100	99	90	82	59
Spain	98	93	87	78	57	25	99	93	87	76	67	38
Sri Lanka	44	26	12	0	0	0	46	24	12	0	0	0
St. Vinc.- Grenadines	77	62	21	0	0	0	78	62	21	0	0	0
Sudan	23	21	18	13	8	0	23	20	18	13	10	0
Suriname	66	59	53	30	0	0	66	59	53	18	0	0
Swaziland	22	14	10	0	0	0	23	14	10	0	0	0
Sweden	99	97	93	79	51	18	99	97	93	75	62	31
Switzerland	100	100	97	67	15	0	100	100	97	57	28	0
Syria	89	79	65	42	13	0	89	78	65	39	23	0
Taiwan	100	99	99	92	60	16	100	99	99	87	72	34
Tajikistan	73	61	41	8	0	0	74	60	41	3	0	0
Tanzania	14	12	11	6	0	0	14	12	11	6	5	0
Thailand	68	56	45	25	14	8	69	56	45	22	17	11
Togo	19	17	15	2	0	0	19	17	15	0	0	0
Trinidad and Tobago	99	96	90	67	2	0	99	96	90	59	29	0
Tunisia	80	70	60	38	11	0	82	69	60	33	22	2
Turkey	79	71	62	40	15	0	80	70	62	36	25	2
Turkmenistan	56	50	38	19	4	0	57	49	38	16	11	0
Turks - Caicos Is. UK	54	52	0	0	0	0	54	52	0	0	0	0
Uganda	10	8	5	4	0	0	10	8	5	4	1	0
Ukraine	93	85	70	40	7	0	93	85	70	34	18	0
United Arab Emirates	100	100	99	97	89	67	100	100	99	97	94	78
United Kingdom	100	98	94	79	40	4	100	98	94	74	55	15
Un. States of America	99	97	93	83	62	30	99	97	93	81	71	44
Uruguay	80	75	73	62	50	18	80	75	73	61	54	37
Uzbekistan	90	84	68	28	10	0	90	83	68	24	12	1
Vanuatu	8	6	4	4	0	0	8	5	4	4	2	0
Venezuela	90	85	80	71	52	23	91	84	80	70	62	31
Vietnam	31	22	14	9	4	0	32	22	14	8	5	2
Virgin islands US	100	100	99	94	0	0	100	100	99	84	39	0
Western Sahara	11	9	8	2	0	0	12	9	8	2	0	0
Yemen	41	34	23	13	3	0	42	33	23	12	7	0
Zaire	13	12	11	7	0	0	13	12	11	7	1	0
Zambia	38	36	32	12	0	0	38	36	32	11	4	0
Zimbabwe	30	28	25	17	0	0	30	28	25	14	1	0
European Union	99	97	90	72	38	8	99	96	90	68	51	17
The World	62	53	43	30	16	6	63	52	43	28	21	9

spatial allocation of the population for all the grid cells covering a census reporting unit (usually province). Therefore the resulting population distribution represents an ambient population which integrates diurnal movements and collective travel habits rather

than the residential population at night-time. Readers must be aware that these percentages should be considered as estimates, owing to the proceeding discussion on the Landscan data characteristics, the minor altitude effects on the artificial sky

Table 2. Numerical values and references of thresholds in Table 1, columns 8–14. The natural sky brightness has been subtracted.

b_p	b_{iq}	b_m	b_{fm}	b_{mw}	b_e
10 per cent b_n	$\sim 90 \mu \text{cd m}^{-2}$	$252 \mu \text{cd m}^{-2}$	$\sim 890 \mu \text{cd m}^{-2}$	$6 b_n$	$4452 \mu \text{cd m}^{-2}$
Smith 1979	e.g. Walker 1987	based on Krisciunas & Schaefer 1991	e.g. Walker 1987	estimate	Garstang 1986

brightness levels and departures in the angular distribution of light from sources from the assumed average normalized emission function.

We also determined the surface area corresponding to each level of our Atlas. Table 3 shows the fraction per cent of the surface area of the individual World countries, the European Union and the World, where the sky brightness is greater than each level of our Atlas in standard clean nights, i.e. the ratios between the artificial sky brightness and the reference natural sky brightness are greater than 0.11 (column 1), 0.33 (column 2), 1 (column 3), 3 (column 4), 9 (column 5) and 27 (column 6).

Fig. 11 shows in white the World's area covered by our Atlas where 98 per cent of the World population lives. Our data refer to 1996–1997, so the artificial night sky brightness today is likely increased.

5 CONCLUSIONS

The Atlas reveals that light pollution of the night sky is not confined, as commonly believed, to developed countries, but rather appears to be a global-scale problem affecting nearly every country of the World. The problem is more severe in the United States, Europe and Japan, as expected. However the night sky appears more seriously endangered than commonly believed.

The population percentages presented in Tables 1 and 3 speak for themselves, indicating that large numbers of people in many countries have had their vision of the night sky severely degraded. Our Atlas refers to 1996–1997, so the situation today is undoubtedly worse. We found that more than 99 per cent of the United States and European Union population, and about two-thirds of the World population, live in areas where the night sky is above the threshold for polluted status [i.e. the artificial sky brightness is greater than 10 per cent of the natural night sky brightness above 45° of elevation (Smith 1979)]. In the areas where 97 per cent of the United States population, 96 per cent of the European Union population and half of the World population live, the night sky in standard clean atmospheric conditions is brighter than has been measured with a first quarter moon in the best astronomical sites (e.g. Walker 1987). 93 per cent of the United States population, 90 per cent of the European Union population and about 40 per cent of the World population live under a zenith night sky that is brighter than they would have in the same location with a first quarter moon at 15° elevation (based on Krisciunas & Schaefer 1991) and zero light pollution. They therefore effectively live in perennial moonlight. They rarely realize it because they still experience the sky to be brighter under a full moon than under new moon conditions. We also found that for about 80 per cent of the United States population, two-thirds of the European Union population and more than one-fourth of the World population the sky brightness is even greater than that measured on nights close to full moon in the best astronomical sites (e.g. Walker 1987). ‘Night’ never really comes for them because this sky brightness is slightly larger than the typical zenith brightness at nautical twilight (Schaefer 1993). Assuming average eye functionality, more than

two-thirds of the United States population, about half of the European Union population and one-fifth of the World population have already lost the possibility of seeing the Milky Way, the Galaxy where we live. Finally, approximately 40 per cent of the United States population, one-sixth of the European Union population and one tenth of the World population cannot even look at the heavens with the eye adapted to night vision, because its brightness is above the night vision threshold (Garstang 1986; see also Schaefer 1993). Preliminary data on moonlight without the moon were presented by Cinzano, Falchi & Elvidge (2001b).

We noticed that Venice is the only city in Italy with more than 250 000 inhabitants from which an average observer had the possibility of viewing the Milky Way from the city centre on a clear night in 1996–97. Even though Venice's historic centre (population 68 000) is imbedded in the strong sky glow produced by the terra firma part of the city (Mestre, population 189 000), its average artificial sky brightness is still lower than in cities with 80 000 inhabitants in the nearby Veneto plane. This is due mainly to the unique low-intensity romantic lighting of this city, which deserves to be preserved.

Many areas that were believed to be unpolluted because they appear completely dark in night-time satellite images, on the contrary show in the Atlas non-negligible artificial brightness levels, owing to the outward propagation of light pollution. In a number of cases the sky of a country appears polluted by sources in a neighbouring country: this could open a new chapter of international jurisprudence. Astronomical observatories known for their negligible zenith artificial sky brightness appear to lie near or inside the 1 per cent level: this means that without undertaking a serious control of light pollution in liable areas they risk in less than 20 years seeing their sky quality degraded. Site testing for next-generation telescopes will require an accurate study of the long-term growth of the artificial night sky brightness in order to assure dark sky conditions for an adequate number of years after their installation. Serious control both of lighting installations and of new urbanizations or developments would be necessary for a large area surrounding the site (possibly even 250 km in radius).

We are working towards the preparation of a forthcoming Atlas giving the growth rates of light pollution, the growth rates of night sky brightness, the emission functions of the sources (Paper I) and the ratio of the upward light flux versus population per unit area.

The International Dark-Sky Association (<http://www.darksky.org>) is supporting worldwide the legislative effort carried on in many countries to limit light pollution, in order to protect astronomical observatories, amateur observatories, the citizens' perception of the Universe and the environment, and to save energy, money and resources. Commission 50 of the International Astronomical Union (‘The protection of existing and potential astronomical sites’) is working actively to preserve the astronomical sky, now with a specific Working Group (‘Controlling light pollution’) born after the UN–IAU Special Environmental Symposium ‘Preserving the Astronomical Sky’, held in the

Table 3. Percentage of the surface area where the artificial sky brightness at sea level on standard clear nights is greater than given levels.

Country	(1) $\geq 0.11b_n$	(2) $\geq 0.33b_n$	(3) $\geq b_n$	(4) $\geq 3b_n$	(5) $\geq 9b_n$	(6) $\geq 27b_n$
Afghanistan	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Albania	17.1	5.2	1.3	0.1	0.0	0.0
Algeria	9.4	4.4	1.8	0.7	0.2	0.0
Andorra	100.0	100.0	89.8	27.9	0.0	0.0
Angola	0.9	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0
Anguilla UK	100.0	83.6	19.0	0.0	0.0	0.0
Antigua-Barbuda	63.5	49.8	21.6	1.3	0.0	0.0
Argentina	11.3	4.6	1.9	0.7	0.2	0.0
Armenia	17.8	7.2	2.1	0.5	0.0	0.0
Australia	2.3	1.0	0.4	0.2	0.0	0.0
Austria	100.0	76.2	29.3	3.5	0.4	0.0
Azerbaijan	23.3	9.3	3.2	0.8	0.0	0.0
Bahamas	7.8	4.9	3.4	1.7	0.3	0.0
Bahrain	100.0	100.0	91.6	74.6	50.7	25.8
Bangladesh	24.4	9.0	3.0	0.6	0.1	0.0
Barbados	100.0	93.3	64.6	20.0	0.0	0.0
Belgium	100.0	100.0	99.8	74.4	11.4	0.3
Belize	7.6	2.5	0.6	0.0	0.0	0.0
Benin	1.6	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0
Bermuda UK	100.0	100.0	92.5	17.0	0.0	0.0
Bhutan	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Bolivia	3.0	1.4	0.6	0.2	0.0	0.0
Bosnia-Herzegovina	40.5	12.6	2.2	0.0	0.0	0.0
Botswana	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
Brazil	7.9	3.5	1.4	0.5	0.1	0.0
British Virgin Islands	51.0	44.5	32.8	0.0	0.0	0.0
Brunei	47.6	27.2	15.8	8.4	1.1	0.0
Bulgaria	41.1	12.0	3.4	0.4	0.0	0.0
Burkina Faso	0.9	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0
Burundi	1.6	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0
Byelarus	41.0	14.8	4.9	0.8	0.1	0.0
Caiman Islands UK	68.8	59.3	27.5	10.9	0.0	0.0
Cambodia	1.3	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0
Cameroon	1.4	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0
Canada	32.8	18.6	9.2	3.6	1.0	0.2
Central African Rep.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chad	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chile	12.2	5.6	2.1	0.7	0.2	0.0
China	12.5	6.0	2.4	0.5	0.1	0.0
Cisgiordania	100.0	100.0	92.7	43.2	4.1	0.0
Colombia	14.0	5.9	2.3	0.7	0.1	0.0
Congo	1.2	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0
Costa Rica	34.1	15.1	6.0	2.1	0.5	0.0
Croatia	74.8	41.4	14.3	1.7	0.2	0.0
Cuba	14.6	5.8	2.1	0.5	0.1	0.0
Cyprus	85.1	57.3	29.5	7.1	0.7	0.0
Czech Republic	100.0	99.7	76.0	11.8	0.9	0.0
Denmark	99.5	87.4	46.0	9.1	0.9	0.0
Djibouti	1.6	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0
Dominica	8.1	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Dominican Republic	45.0	22.6	8.4	2.4	0.6	0.0
Ecuador	17.4	8.2	3.3	0.7	0.1	0.0
Egypt	17.1	10.7	6.4	2.5	0.3	0.1
El Salvador	59.1	33.4	12.4	3.4	0.8	0.0
Equatorial Guinea	5.5	3.0	1.3	0.5	0.1	0.0
Eritrea	0.8	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
Estonia	59.7	23.8	9.3	2.4	0.5	0.0
Ethiopia	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
Falkland Islands UK	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Faroe Islands	33.8	13.5	2.3	0.0	0.0	0.0
Fiji Islands	3.0	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0
Finland	70.0	47.2	22.7	6.7	1.3	0.2
France	98.9	75.1	36.0	9.6	1.4	0.1
French Guiana	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
Gabon	3.3	1.5	0.8	0.3	0.0	0.0
Gambia	2.5	1.2	0.6	0.0	0.0	0.0
Gaza	100.0	100.0	100.0	74.5	0.0	0.0
Georgia	10.6	4.5	1.2	0.1	0.0	0.0
Germany	100.0	94.5	64.5	16.9	1.9	0.0

Table 3 – continued

Country	(1) $\geq 0.11b_n$	(2) $\geq 0.33b_n$	(3) $\geq b_n$	(4) $\geq 3b_n$	(5) $\geq 9b_n$	(6) $\geq 27b_n$
Ghana	4.3	1.7	0.7	0.3	0.0	0.0
Gibraltar UK	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0
Greece	57.7	25.7	9.4	2.2	0.6	0.1
Grenada	24.5	13.5	3.3	0.0	0.0	0.0
Guadeloupe	89.5	87.5	55.6	10.3	0.0	0.0
Guatemala	16.1	5.8	2.1	0.7	0.2	0.0
Guernsey UK	100.0	100.0	97.7	3.8	0.0	0.0
Guinea	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
Guinea-Bissau	1.8	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0
Guyana	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
Haiti	5.1	2.1	0.9	0.3	0.0	0.0
Honduras	10.6	4.5	1.8	0.5	0.0	0.0
Hungary	100.0	81.9	29.9	3.4	0.6	0.1
India	34.7	14.9	5.0	0.8	0.1	0.0
Indonesia	6.8	3.3	1.4	0.3	0.0	0.0
Iran	30.2	14.2	6.2	2.0	0.5	0.1
Iraq	25.3	11.5	5.1	2.0	0.5	0.0
Ireland	61.2	22.0	7.0	1.5	0.3	0.0
Isle of Man UK	100.0	65.9	19.1	0.0	0.0	0.0
Israel	90.3	78.0	58.6	35.7	9.4	1.0
Italy	99.4	91.9	58.7	19.1	1.9	0.1
Ivory Coast	2.5	0.9	0.3	0.1	0.0	0.0
Jamaica	93.7	57.4	22.4	5.2	1.0	0.0
Japan	98.5	84.4	53.5	24.0	5.6	1.0
Jersey UK	100.0	100.0	68.4	0.0	0.0	0.0
Jordan	27.2	15.8	9.0	2.1	0.4	0.0
Kazakhstan	4.3	1.9	0.8	0.2	0.0	0.0
Kenya	1.6	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0
Kuwait	100.0	88.4	65.0	39.4	13.2	3.5
Kyrgyzstan	12.4	5.3	1.5	0.1	0.0	0.0
Laos	1.7	0.7	0.3	0.0	0.0	0.0
Latvia	34.8	13.0	4.0	1.1	0.3	0.0
Lebanon	100.0	66.0	33.3	6.7	0.3	0.0
Lesotho	3.4	1.2	0.4	0.0	0.0	0.0
Liberia	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Libya	8.4	4.1	1.7	0.6	0.1	0.0
Liechtenstein	100.0	100.0	90.6	0.0	0.0	0.0
Lithuania	62.2	21.3	6.9	1.5	0.1	0.0
Luxembourg	100.0	100.0	100.0	61.2	11.6	0.0
Macau P	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0
Macedonia	56.7	19.3	5.6	0.5	0.0	0.0
Madagascar	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Malawi	3.4	1.7	0.7	0.2	0.1	0.0
Malaysia	22.2	11.9	5.4	1.6	0.3	0.0
Mali	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
Malta	100.0	100.0	99.4	73.7	14.4	0.0
Martinique F	100.0	91.9	67.0	16.6	0.0	0.0
Mauritania	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Mayotte F	7.9	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mexico	30.5	16.1	7.2	2.4	0.6	0.1
Moldova	67.3	26.2	7.1	0.9	0.1	0.0
Monaco	100.0	100.0	100.0	100.0	63.2	0.0
Mongolia	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Montenegro	31.3	10.9	2.9	0.1	0.0	0.0
Montserrat UK	56.1	15.8	0.0	0.0	0.0	0.0
Morocco	12.4	4.9	1.7	0.5	0.1	0.0
Mozambique	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
Myanmar	2.9	1.1	0.3	0.1	0.0	0.0
Namibia	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
Nepal	3.1	1.2	0.3	0.0	0.0	0.0
Netherlands	100.0	99.1	96.7	56.8	8.3	0.6
Netherlands Antilles	89.3	66.1	43.2	26.8	5.4	0.0
New Caledonia	3.2	1.3	0.6	0.3	0.0	0.0
New Zealand	11.7	5.0	2.1	0.7	0.1	0.0
Nicaragua	8.2	3.3	1.2	0.3	0.0	0.0
Niger	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Nigeria	12.4	7.8	5.3	3.0	1.1	0.1
Norfolk Islands AU	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
North Korea	8.8	3.6	1.1	0.1	0.0	0.0
Norway	62.8	34.6	14.6	4.4	0.9	0.1

Table 3 – *continued*

Country	(1) $\geq 0.11b_n$	(2) $\geq 0.33b_n$	(3) $\geq b_n$	(4) $\geq 3b_n$	(5) $\geq 9b_n$	(6) $\geq 27b_n$
Oman	27.8	12.7	4.8	1.4	0.3	0.0
Pakistan	30.2	19.4	7.9	0.9	0.2	0.0
Panama	11.7	5.4	2.3	0.7	0.1	0.0
Papua New Guinea	2.1	1.0	0.5	0.2	0.0	0.0
Paraguay	4.6	2.0	0.9	0.4	0.1	0.0
Peru	3.0	1.3	0.5	0.2	0.1	0.0
Philippines	12.6	6.2	2.5	0.7	0.2	0.0
Poland	96.8	59.6	23.9	4.3	0.5	0.0
Portugal	85.1	47.8	24.1	6.8	1.1	0.2
Puerto Rico	99.4	98.9	97.2	68.4	11.5	2.2
Qatar	99.3	89.5	55.2	27.5	8.8	2.6
Romania	52.2	20.5	5.9	0.6	0.0	0.0
Russia	24.2	11.1	4.3	1.2	0.2	0.0
Rwanda	2.0	0.8	0.3	0.0	0.0	0.0
Saint Kitts e Nevis	92.3	53.0	22.1	0.0	0.0	0.0
Saint Lucia	60.3	29.7	10.9	0.0	0.0	0.0
San Marino	100.0	100.0	100.0	97.2	0.0	0.0
Saudi Arabia	19.3	9.8	4.5	1.7	0.4	0.1
Senegal	1.3	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0
Serbia	72.0	37.3	11.8	1.1	0.1	0.0
Sierra Leone	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
Singapore	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	33.3
Slovakia	100.0	98.4	64.1	4.8	0.2	0.0
Slovenia	100.0	84.2	29.3	3.1	0.2	0.0
Somalia	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
South Africa	13.7	6.8	3.0	1.2	0.3	0.0
South Korea	99.7	98.2	79.2	32.0	5.9	1.2
Spain	83.3	50.4	23.0	7.3	1.4	0.2
Sri Lanka	21.6	8.8	2.4	0.0	0.0	0.0
St. Vincent-Grenadines	29.7	13.8	2.4	0.0	0.0	0.0
Sudan	0.8	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0
Suriname	1.0	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0
Swaziland	11.0	4.1	1.2	0.0	0.0	0.0
Sweden	66.9	49.9	26.6	6.7	1.2	0.1
Switzerland	100.0	97.7	57.4	10.2	0.4	0.0
Syria	50.3	26.6	11.2	3.9	1.0	0.1
Taiwan	90.5	63.1	45.5	27.2	6.4	0.4
Tajikistan	13.1	5.5	1.7	0.0	0.0	0.0
Tanzania	1.5	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0
Thailand	33.6	18.1	9.0	2.7	0.5	0.1
Togo	1.3	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0
Trinidad and Tobago	89.8	53.7	29.6	10.7	0.1	0.0
Tunisia	28.0	12.6	4.8	1.2	0.1	0.0
Turkey	31.2	12.2	4.1	0.7	0.1	0.0
Turkmenistan	9.2	4.1	1.6	0.4	0.1	0.0
Turks and Caicos Is. UK	15.6	8.7	0.0	0.0	0.0	0.0
Uganda	1.1	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0
Ukraine	62.4	31.2	11.1	1.7	0.1	0.0
United Arab Emirates	74.6	50.9	30.2	12.8	3.1	0.7
United Kingdom	84.7	67.9	48.1	20.1	3.5	0.1
United States of America	61.8	42.7	22.5	9.2	2.6	0.6
Uruguay	14.4	5.6	2.3	0.9	0.3	0.0
Uzbekistan	23.4	13.8	6.5	1.0	0.1	0.0
Vanuatu	5.7	4.8	2.7	1.1	0.0	0.0
Venezuela	21.6	10.8	5.1	2.0	0.5	0.0
Vietnam	7.0	2.8	1.0	0.3	0.0	0.0
Virgin islands US	100.0	93.6	77.3	53.2	0.0	0.0
Western Sahara	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
Yemen	6.1	2.5	0.8	0.2	0.0	0.0
Zaire	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
Zambia	1.1	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0
Zimbabwe	2.6	1.1	0.5	0.1	0.0	0.0
European Union	85.3	64.8	36.7	11.5	1.7	0.1
The World	18.7	10.9	5.3	1.8	0.4	0.1



Figure 9. Artificial night sky brightness at sea level for Oceania. The map has been computed for the photometric astronomical V band, at the zenith, for a clean atmosphere with an aerosol clarity coefficient $K = 1$. The calibration refers to 1996–1997. Country boundaries are approximate.

Vienna United Nations Organization Centre in the summer of 1999 (Cohen & Sullivan 2000).

ACKNOWLEDGMENTS

We are grateful to Roy Garstang of JILA–University of Colorado for his friendly kindness in reading and commenting on this paper, for his helpful suggestions and for interesting discussions. We acknowledge the unknown referee for the stimulus to extend this work with statistical tables. PC acknowledges the Istituto di Scienza e Tecnologia dell’Inquinamento Luminoso (ISTIL), Thiene, Italy, which supported part of this work. The authors gratefully acknowledge the US Air Force for providing the DMSP data used to make the night-time lights of the World.

REFERENCES

- Catanzaro G., Catalano F. A., 2000, in Cinzano P., ed., Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 211
- Cinzano P., 1994, References on Light Pollution and Related Fields version 2, Internal Report 11, Dep. of Astronomy, Padova, also on-line at <http://www.pd.astro.it/cinzano/refer/index.htm>
- Cinzano P., 2000a, in Cinzano P., ed., Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 93
- Cinzano P., 2000b, in Cinzano P., ed., Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 113
- Cinzano P., 2000c, in Cinzano P., ed., Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 159
- Cinzano P., 2000d, in Cinzano P., ed., Measuring and Modelling Light Pollution, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 1
- Cinzano P., Falchi F., 2000, <http://www.pd.astro.it/cinzano/en/sbeam2.html>

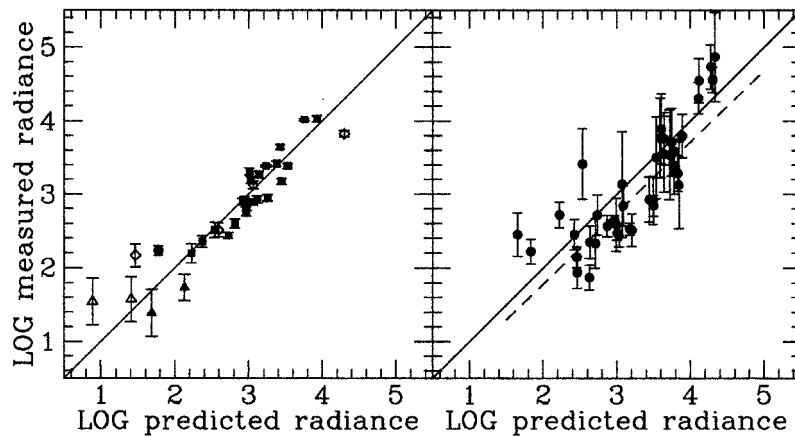


Figure 10. Comparison between map predictions and measurements of artificial night sky brightness. Left panel: map predictions versus artificial sky brightness measurements at the bottom of the atmosphere taken in clean or photometric nights in the V band in Europe (filled squares), North America (open triangles), South America (open rhombi), Africa (filled triangles) and Asia (filled circle). Right panel: map predictions versus photographic measurements taken in Japan in the period 1987–1991 with variable atmospheric aerosol content and averaged for each site. The large error bars show the effects of the changes in the atmospheric aerosol content and in the extinction of the light of the comparison star. The dashed line shows the linear regression. Night sky brightnesses are expressed as photon radiances.

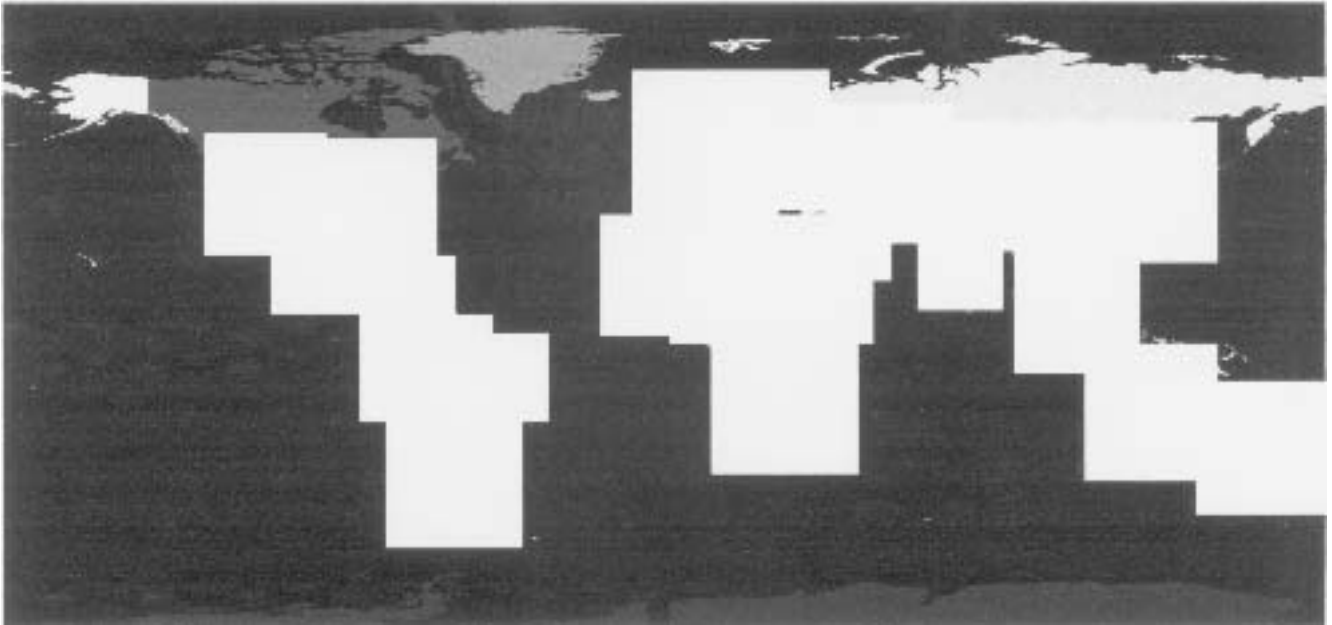


Figure 11. The World areas covered by the Atlas and the statistic (in white).

- Cinzano P., Falchi F., Elvidge C. D., Baugh K. E., 2000, *MNRAS*, 318, 641 (Paper I)
- Cinzano P., Falchi F., Elvidge C. D., 2001a, *MNRAS*, 323, 34 (Paper II)
- Cinzano P., Falchi F., Elvidge C. D., 2001b, *Earth, Moon and Planets*, 85, 517
- Cohen J., Sullivan W. T., eds, 2001, *Proc. UN–IAU Symp. 196, Preserving the Astronomical Sky*. Astron. Soc. Pac., San Francisco
- Crawford D. L., ed., 1991, *ASP Conf. Ser. Vol. 17, IAU Coll. 112, Light Pollution, Radio Interference and Space Debris*. Astron. Soc. Pac., San Francisco
- Della Prugna F., 1999, *A&AS*, 140, 345
- Dobson J. E., Bright E. A., Coleman P. R., Durfee R. C., Worley B. A., 2000, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, 849
- Elvidge C. D., Baugh K. E., Kihn E. A., Kroehl H. W., Davis E. R., 1997a, *Photogram. Eng. Remote Sens.*, 63, 727
- Elvidge C. D., Baugh K. E., Kihn E. A., Kroehl H. W., Davis E. R., Davis C., 1997b, *Int. J. Remote Sensing*, 18, 1373
- Elvidge C. D., Baugh K. E., Hobson V. H., Kihn E. A., Kroehl H. W., Davis E. R., Cocero D., 1997c, *Global Change Biology*, 3, 387
- Elvidge C. D., Baugh K. E., Dietz J. B., Bland T., Sutton P. C., Kroehl H. W., 1999, *Remote Sens. Environ.*, 68, 77
- Elvidge C. D., Imhoff M. L., Baugh K. E., Hobson V. R., Nelson I., Dietz J. B., 2001, *J. Photogrammetry and Remote Sensing*, submitted
- Falchi F., 1998, *Tesi di Laurea*, Univ. Milan
- Falchi F., Cinzano P., 2000, in Cinzano P., ed., *Measuring and Modelling Light Pollution*, *Mem. Soc. Astron. Ital.*, 71, 139
- Favero G., Federici A., Blanco A. R., Stagni R., 2000, in Cinzano P., ed., *Measuring and Modelling Light Pollution*, *Mem. Soc. Astron. Ital.*, 71, 223
- Garstang R. H., 1984, *Observatory*, 104, 196
- Garstang R. H., 1986, *PASP*, 98, 364
- Garstang R. H., 1989a, *PASP*, 101, 306
- Garstang R. H., 1989b, *ARA&A*, 27, 19
- Garstang R. H., 1991, *PASP*, 103, 1109

- Garstang R. H., 2000, in Cinzano P., ed., *Measuring and Modelling Light Pollution*, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 83
- Isobe S., Hamamura S., 1998, in Isobe S., Hirayama T., eds, ASP Conf. Ser. Vol. 139, Proc. IAU JD5, *Preserving the Astronomical Windows*. Astron. Soc. Pac., San Francisco, p. 191
- Isobe S., Hirayama T., eds, 1998, ASP Conf. Ser. Vol. 139, Proc. IAU JD5, *Preserving the Astronomical Windows*. Astron. Soc. Pac., San Francisco
- Kosai H., Isobe S., Nakayama Y., 1992, Proc. IDA Annual Meeting 65
- Kovalevsky J., ed., 1992, *The Protection of Astronomical and Geophysical Sites*, NATO Pilot Study no. 189. Editions Frontieres, Paris
- Krisciunas K., Schaefer B. E., 1991, PASP, 103, 1033
- Lieske R. W., 1981, Proc. Int. Telemetry Conf., 17, 1013
- McNally D., ed., 1994, Proc. IAU-ICSU-UNESCO meeting *Adverse environmental impacts on astronomy, The Vanishing Universe*. Cambridge Univ. Press, Cambridge
- Massey P., Foltz C. B., 2000, PASP, 112, 566
- Nawar S., Morcos A. B., Metwally Z., Osman A. I. I., 1998a, in Isobe S., Hirayama T., eds, ASP Conf. Ser. Vol. 139, *Preserving the Astronomical Windows*. Astron. Soc. Pac., San Francisco, p. 151
- Nawar S., Morcos A. B., Mikhail J. S., 1998b, Ap&SS, 262, 485
- Piersimoni A., Di Paolantonio A., Brocato E., 2000, in Cinzano P., ed., *Measuring and Modelling Light Pollution*, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 221
- Poretti E., Scardia M., 2000, in Cinzano P., ed., *Measuring and Modelling Light Pollution*, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 203
- Schaefer B. E., 1993, Vistas Astron., 36, 311
- Smith F. G., 1979, IAU Trans., XVIIIA, 218
- Sullivan W. T., 1989, Int. J. Remote Sensing, 10, 1
- Sullivan W. T., 1991, in Crawford D. L., ed., ASP Conf. Ser. Vol. 17, IAU Coll. 112, *Light Pollution, Radio Interference and Space Debris*. Astron. Soc. Pac., San Francisco, p. 11
- Walker M., 1987, NOAO Newsl., 10, 16
- Zitelli V., 2000, in Cinzano P., ed., *Measuring and Modelling Light Pollution*, Mem. Soc. Astron. Ital., 71, 193

This paper has been typeset from a $\text{\TeX}/\text{\LaTeX}$ file prepared by the author.

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/304992943>

Ambient Light Exposure and Changes in Obesity Parameters: A Longitudinal Study of the HEIJO-KYO Cohort

Article *in* The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism · July 2016

DOI: 10.1210/jc.2015-4123

READS

35

3 authors:



Kenji Obayashi

Nara Medical University

43 PUBLICATIONS **192** CITATIONS

SEE PROFILE



Keigo Saeki

Nara Medical University

70 PUBLICATIONS **452** CITATIONS

SEE PROFILE



Norio Kurumatani

Nara Medical University

181 PUBLICATIONS **2,006** CITATIONS

SEE PROFILE

Ambient Light Exposure and Changes in Obesity Parameters: A Longitudinal Study of the HEIJO-KYO Cohort

Kenji Obayashi*, Keigo Saeki*, Norio Kurumatani

Department of Community Health and Epidemiology, Nara Medical University School of Medicine, Nara, Japan. *Drs. Obayashi and Saeki contributed equally to this work.

CONTEXT: Previous epidemiological studies have suggested an association between nighttime light levels and the prevalence of obesity, although evidence is limited to cross-sectional studies.

OBJECTIVE: To evaluate the longitudinal association between ambient light exposure and the subsequent changes in obesity parameters.

DESIGN AND PARTICIPANTS: Data from 1,110 elderly participants at baseline (mean age, 71.9 years) and data from 766 at follow-up (median, 21 months) were included in this prospective population-based study.

MEASURES: Time-dependent ambient light exposure based on objective measurements and changes in the waist-to-height ratio (WHtR) and body mass index (BMI) were measured.

RESULTS: Multivariable mixed-effect linear regression models showed a significant association between light exposure and the %WHtR gain; this was independent of potential confounders (e.g., caloric intake, physical activity, and sleep/wake parameters). Nighttime or evening exposure to higher light intensity was significantly associated with subsequent %WHtR gain. Morning exposure to a longer time ≥ 500 lux or nighttime exposure to a longer time < 3 lux was significantly associated with subsequent %WHtR loss. These association trends were nearly consistent when the BMI was used as an obesity parameter. Increased nighttime light exposure (mean ≥ 3 vs. < 3 lux) was estimated to correspond to a 10.2% WHtR gain and 10.0% increase in BMI over 10 years.

CONCLUSIONS: Ambient light exposure, such as increased nighttime or evening light exposure and decreased morning light exposure, was independently associated with subsequent increases in obesity parameters. Further interventional studies are warranted to establish an optimal controlled lighting environment as a preventive option against obesity.

The prevalence of obesity has increased over time in most countries and now reached epidemic proportions (1–4). Obesity is widely recognized as one of the leading health threats worldwide and a major risk factor for hypertension, diabetes, cardiovascular diseases, cancer, and early mortality (5–9). Although obesity is primarily caused by overeating and physical inactivity, existing diet and physical exercise programs have failed to prevent this epidemic (10), warranting novel innovative approaches.

Energy homeostasis is fundamentally maintained by the endogenous circadian timing system under the control of the suprachiasmatic nucleus of the hypothalamus (the master biological clock) (11). Clock gene mutations induced obesity in mice (12), and circadian misalignment between the internal and environmental rhythms decreased daily energy expenditure and leptin levels in human experimental studies (13, 14). These findings agree with previous epidemiological findings of obesity being

ISSN Print 0021-972X ISSN Online 1945-7197

Printed in USA

Copyright © 2016 by the Endocrine Society

Received December 1, 2015. Accepted June 29, 2016.

Abbreviations:

induced by shiftwork, which is associated with chronic circadian misalignment (15).

The solar 24-hour cycle has led to the evolution of the human circadian timing system, which is crucially influenced by light information. Light exposure at an inappropriate timing against the solar cycle can desynchronize the internal rhythms from the environmental rhythms, resulting in circadian misalignment (16). Modern societies have developed with the widespread use of electrical lighting at night (17). Recent experimental studies using mice (18, 19) demonstrated that an 8-week exposure to nighttime light significantly increased body mass, even at a low intensity (5 lux), and 5-week exposure to a shorter nighttime dark period dose-dependently increased fat mass. In epidemiological studies (20, 21), a higher prevalence of obesity was observed in individuals with a higher nighttime bedroom light intensity measured objectively and subjectively; however, evidence is limited to cross-sectional studies (22). The purpose of this study is to evaluate the hypothesis whether objectively measured ambient light exposure are longitudinally associated with the subsequent changes in obesity parameters.

Materials and Methods

Study Participants and Design

Baseline data collection of the HEIJO-KYO cohort was conducted between September and April 2010–2014, which included 1127 community-dwelling elderly individuals aged ≥ 60 years. Of these, we excluded participants who did not complete measurements of light exposure and obesity parameters. As a result, we evaluated the primary outcomes from 1110 participants at baseline and from 766 at follow-up (median duration, 21 months). Follow-up was conducted between August and September. All participants provided written informed consent. The study protocol was approved by Nara Medical University's ethics committee.

The baseline study protocol was reported in our previous study (23). In brief, the homes of participants were visited predominantly on weekdays and demographic and medical information was collected during face-to-face interviews by trained interviewers using a standardized questionnaire. Waist circumference, body weights, and heights were measured and venous blood samples were collected. Then, light exposure measurements were performed for 48-hour from noon of the first day to noon of the third day and participants were instructed to maintain a standardized sleep diary for the first and second night. Overnight urine for the second night was collected. Finally, the instruments, sleep diaries, and urine samples were collected from the homes of the participants. All participants did not receive any instruction on their eating, activity or sleep behavior, except for drinking. They were instructed not to consume alcohol during the designated monitoring period.

Measurements of Light Exposure

Morning (4 hours after rising time), evening (4 hours before bedtime), daytime (rising time to bedtime), and nighttime (bedtime to rising time) were defined using data from the sleep diary.

Light exposures in the morning, evening, and daytime, were measured for two consecutive days at 1-minute intervals using a wrist light meter (Actiwatch 2; Respironics Inc., Murrysville, PA) worn on the nondominant wrist. The device has a photodiode with a spectral sensitivity approximating that of the human eye (illuminance sensitivity, 0–150 000 lux). All participants were given special rubber bands to prevent their shirtsleeves from covering the device. Daytime values of < 1 lux were considered artifact data because of the sensor coverage and were not considered for calculating mean values (24). If light data for more than half of the daytime period were interpreted as artifacts, the data were considered missing. Mean light intensities were used as parameters of exposed light amplitude. Times above the threshold intensities were the total minutes above the thresholds, which were based on the values of 500 and 1000 lux during daytime used in the previous observational studies (23–25). The thresholds of 50 and 100 lux on evening light exposure were based on our previous data showing that median intensity of evening light exposure was approximately 1/10 of that of daytime (26). Data were analyzed after base 10 logarithmic transformation.

Light exposures during the nighttime and in the first (1 hour after bedtime) and last hour of the night (1 hour before rising time) were measured for two consecutive nights at 1-minute intervals using a portable light meter (LX-28SD; Sato Shouji Inc., Kanagawa, Japan) placed facing the ceiling by the head of the subject's bed at 60 cm above the floor (illuminance sensitivity, 0–100 000 lux). Light meter measurements were synchronized to those of the wrist light meter. Mean light intensities were used as parameters of exposed light amplitude. Times below the threshold intensities (3 and 10 lux) were the total minutes below the thresholds. Since normalizing the distribution of nighttime light was difficult, we conducted categorical analysis by tertile value or the predefined threshold (3 and 10 lux) which were based on the values that have minimal effects on human physiology (16).

Measurements of the Obesity Parameters

Waist circumference at the umbilicus level, height, and body weight were measured in the standing position. The waist-to-height ratio (WHtR) was calculated as the waist circumference (m) divided by height (m), and the body mass index (BMI) was calculated as body weight (kg) divided by height (m^2). WHtR is more accurate than the BMI or waist circumference for evaluating fat distribution and accumulation, and determining the cardiometabolic risk (27, 28). Abdominal obesity was defined as $WHtR \geq 0.6$, as clinical significance increases beyond this value in the elderly (29).

Measurements of the Covariates

The current smoking, drinking, and socioeconomic statuses were surveyed using a questionnaire. The caloric intake was assessed by a validated food frequency questionnaire, containing 29 food groups and 10 kinds of cookery; the weekly intake of each food group was estimated by commonly used units or portion sizes (30). Physical activity was assessed using the International Physical Activity Questionnaire (Japanese version), containing questions on the amount of time spent performing

moderate and vigorous activities, and walking per week (31). A standardized sleep diary was used to estimate bedtimes and rising times. Subjective sleep quality was assessed using the Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI) questionnaire, and sleep disturbances were defined as PSQI score ≥ 6 (32). As an index of melatonin secretion, urinary 6-sulfatoxymelatonin excretion (UME) was measured from urine samples collected overnight as described in our previous publication (23). The day length (sunrise to sunset), based on the measurement days in Nara, Japan (latitude 34°N), was extracted from the National Astronomical Observatory of Japan's website (33).

Statistical Analysis

Averages of data for the light exposure, sleep diary, and day length on two measurement days were used for analysis. Means were compared between the dichotomous groups using the unpaired *t* test, and the χ^2 test was used to compare categorical data. The mean, median, or proportion was substituted for missing data of independent variables. Data of total participants (*n* = 1110) were used in cross-sectional analysis of the association between light exposure and abdominal obesity. In longitudinal analysis, using data of 1110 participants at baseline and 766 participants at follow-up, the association between light exposure and changes in the obesity parameters was evaluated by the mixed-effect linear regression analysis consisting of the individual-level variables (light exposure, age [≥ 70 vs. < 70 years], sex [male vs. female], follow-up duration [≥ 2 vs. < 2 years], current smoking status [yes vs. no], alcohol consumption [≥ 30 vs. < 30 g/d], household income [≥ 4 vs. < 4 million Japanese Yen/y], education [≥ 13 vs. < 13 years], caloric intake [per 100 kcal/d], physical activity [per log MET-h/wk], sleep disturbances [yes vs. no], bedtime [per 1 hour delay], duration in bed [per 1 hour], UME [per log μ g], and day length [per quartile]), and the day-level variables (WHtR and BMI). Regression coefficients were estimated by the maximum likelihood method. All analyses were performed using SPSS, version 19.0 for Windows (IBM SPSS Inc., Chicago, IL). Statistical significance was set at a two-sided *P* value < 0.05 . Time-dependent changes in exposed light intensity were smoothed by the generalized additive model, minimizing the generalized cross-validation score (34) using the R statistics package (35).

Results

Baseline Characteristics

The participants' mean age at baseline was 71.9 ± 7.1 year (Table 1). The mean WHtR was 0.536 ± 0.057 . WHtR correlated better with waist circumference than height ($r = 0.85$ vs. -0.31 , respectively). The median of mean light intensities in the morning, evening, daytime, and nighttime were 345.9, 24.0, 337.2, and 0.7 lux, respectively (Table 2). The median time ≥ 500 lux in the morning, ≥ 100 lux in the evening, ≥ 500 lux during the daytime, and < 3 lux during the nighttime were 24, 6, 74, and 467 minutes. These baseline characteristics stratified by the follow-up status are summarized in tables.

Figure 1 shows time-dependent changes in exposed

light intensity between the groups with (*n* = 138) and without (*n* = 972) abdominal obesity at baseline. The abdominal obesity group was exposed to a lower light intensity from rising time to near the beginning of the evening than the no abdominal obesity group. Thereafter, the former was mostly exposed to higher light intensity throughout the night.

Longitudinal Association between Light Exposure and Obesity Parameters

The mean follow-up WHtR was 0.550 ± 0.059 and the mean WHtR difference (follow-up minus baseline) was 0.016 (95% CI, 0.014 to 0.019), respectively.

Morning exposure to higher light intensity was significantly associated with subsequent %WHtR loss in the unadjusted model over a median follow-up of 21 months (*P* = .002; Table 3), but this was insignificant in the minimally adjusted model (*P* = .07; model 1). A longer time ≥ 500 lux in the morning was significantly associated with subsequent %WHtR loss in the unadjusted model; the association remained significant in the fully adjusted model (*P* = .022; model 2), whereas there was a marginal association between a longer time $\geq 1,000$ lux in the morning and %WHtR loss (*P* = .06; model 2).

Regarding evening light, no parameter was significantly associated with change in %WHtR in the unadjusted models. After adjusting for confounders, evening exposure to higher light intensity and a longer time ≥ 100 lux were significantly associated with subsequent %WHtR gain (*P* = .045 and *P* = .032, respectively; model 2).

Daytime light, including morning and evening light, was significantly associated with subsequent %WHtR loss in the unadjusted models, and the only association between a longer time ≥ 500 lux during the daytime and subsequent %WHtR loss remained significant in the adjusted model (*P* = .021; model 2).

Nighttime exposure to higher light intensity (mean ≥ 3 lux) was significantly associated with subsequent %WHtR gain in each statistical model (*P* = .010, model 2). A longer time < 3 lux during the nighttime was significantly associated with subsequent %WHtR loss in each statistical model (*P* = .021, model 2). These results were consistent when a higher cutoff intensity of 10 lux was used. Regarding light intensity in the first hour of the nighttime period, no significant association with %WHtR change was observed in any statistical model; however, higher light intensity in the last hour of the night (the highest vs. lowest tertiles) was significantly associated with subsequent %WHtR gain in each statistical model (*P* = .030; model 2).

When using BMI as the obesity parameter, the associ-

Table 1. Baseline Characteristics

Variables	All	Follow-up status		<i>p</i> [§]
		Yes	No	
No. of participants	1110	766	344	
Basic parameters				
Age, mean (sd), years	71.9 (7.1)	71.0 (6.7)	73.7 (7.6)	<0.001
Gender, number, male	520 (46.8%)	355 (46.3%)	165 (48.0%)	0.62
Current smoker, number	56 (5.0%)	40 (5.2%)	16 (4.7%)	0.96
Alcohol consumption (≥30 g/day), number	159 (14.3%)	113 (14.8%)	46 (13.4%)	0.58
Household income (≥4 million JPY/year), number	440 (42.9%)	319 (44.3%)	121 (39.5%)	0.59
Education (≥13 yr), number	295 (26.6%)	228 (29.8%)	67 (19.5%)	0.014
Caloric intake, mean (sd), kcal/day	1991.1 (484.6)	1997.4 (534.1)	1973.8 (534.1)	0.28
Physical activity, median (IQR), MET-hr/week	22.3 (7.7, 46.2)	23.1 (8.8, 46.7)	18.8 (5.1, 40.9)	0.007†
Sleep disturbances (PSQI ≥6), number	388 (35.2%)	260 (33.9%)	128 (37.3%)	0.17
Obesity parameters				
Waist-height ratio, mean (sd)	0.536 (0.057)	0.534 (0.057)	0.541 (0.057)	0.28
Body mass index, mean (sd), kg/m ²	23.1 (3.0)	23.1 (3.0)	23.1 (3.2)	0.43
Circadian rhythm parameters				
Bedtime, mean (sd), clock time	22:29 (1:10)	22:34 (1:08)	22:17 (1:14)	0.050
Duration in bed, mean (sd), min	497 (76.8)	491.2 (74.7)	511.5 (79.7)	0.030
UME, median (IQR), μg	6.8 (4.0, 10.6)	7.0 (4.2, 11.2)	5.9 (3.7, 9.1)	0.003†
Day length, median (IQR), min	654 (623, 682)	649 (614, 682)	657 (634, 682)	0.053‡

sd, standard deviation; IQR, interquartile range; MET, metabolic equivalent; PSQI, Pittsburgh Sleep Quality Index; UME, urinary 6-sulfatoxymelatonin excretion.

§ test (yes vs. no) after adjustment for age and gender. † test after log-transformation. ‡ test after quartile-transformation.

ation trends between light exposure and change in BMI were mostly consistent. In the fully adjusted models, BMI gain was significantly associated with evening or nighttime exposure to higher light intensity and evening exposure to a longer time above the thresholds. BMI loss was significantly associated with daytime exposure to a longer time ≥ 500 lux and nighttime exposure to a longer time below the thresholds. Additionally, daytime exposure to a longer time ≥ 500 lux and nighttime exposure to higher light intensity (≥3 lux) were independently and significantly associated with both WHtR and BMI changes in the same model (model 2, data not shown).

Additional Analysis

Sensitivity analysis using light data during the actual sleep period, as defined by actigraphy (moderate threshold: 40 counts/min), showed consistently significant associations of nighttime exposure to a longer time < 3 lux

(per min) with subsequent losses in WHtR and BMI (β , -0.009; 95% CI, -0.014 to -0.005; P < .001; and β , -0.005; 95% CI, -0.007 to -0.002; P < .001; model 2; respectively). In addition, similar results were observed in the sensitivity analysis excluding the participants with previous history of shiftwork (n = 74) (data not shown). Furthermore, in the additional analysis adjusted for sleep disturbances or UME, results were consistent with those in Table 3 (data not shown).

Independent variables, eg, the duration in bed and bedtime (Pearson's coefficient, 0.69), duration in bed and time < 3 lux (0.72), and duration in bed and time < 10 lux (0.77) were moderately correlated. The categorical data of duration in bed (≥8 or < 8 hours) had lower correlations with nighttime times < 3 and < 10 lux than the continuous data (Pearson's coefficient, 0.57 and 0.62, respectively). A significant association between WHtR loss and nighttime

Table 2. Baseline Light Exposure Characteristics

Variables	All	Follow-up status		<i>p</i> [§]
		Yes	No	
No. of participants	1110	766	344	
Mean light intensity		median (IQR), lux		
Morning (4 h)	345.9 (121.5, 796.3)	352.9 (123.9, 828.3)	315.2 (110.5, 771.1)	0.40†
Evening (4 h)	24.0 (15.9, 37.0)	23.8 (15.9, 37.1)	24.6 (16.0, 35.4)	0.32†
Daytime (All)	337.2 (165.4, 719.2)	336.9 (167.2, 702.9)	348.2 (156.9, 784.7)	0.91†
Nighttime (All)	0.7 (0.1, 3.3)	0.6 (0.1, 2.9)	1.0 (0.2, 4.4)	0.017‡
First night (1 h)	1.3 (0, 9.5)	1.2 (0, 8.3)	1.7 (0, 13.6)	0.46‡
Last night (1 h)	1.1 (0, 8.0)	0.8 (0, 6.7)	1.6 (0.02, 11.0)	0.007‡
Time below/above threshold		median (IQR), min		
Morning (4 h)				
≥500 lux	24 (9, 46)	24 (9, 46)	22 (8, 45)	0.65†
≥1000 lux	15 (5, 34)	16 (5, 35)	13 (5, 33)	0.58†
Evening (4 h)				
≥50 lux	28 (12, 53)	29 (12, 54)	28 (12, 51)	0.97†
≥100 lux	6 (1, 19)	6 (1, 19)	6 (1, 18)	0.83†
Daytime (All)				
≥500 lux	74 (40, 129)	76 (43, 128)	70 (34, 132)	0.35†
≥1000 lux	50 (25, 96)	50 (27, 97)	51 (22, 94)	0.55†
Nighttime (All)				
<3 lux	467 (420, 516)	465 (417, 509)	473 (430, 526)	0.13
<10 lux	473 (427, 521)	470 (421, 515)	481 (437, 537)	0.18

SD, standard deviation; IQR, interquartile range.

§ test (yes vs. no) after adjustment for age and gender. † test after log-transformation. ‡ test after tertile-transformation.

exposure to a longer dark exposure was observed in the models adjusted for the categorical data of duration in bed (β , -0.007 ; 95% CI, -0.012 to -0.002 ; $P = .007$; and β , -0.007 ; 95% CI, -0.013 to -0.002 ; $P = .006$; model 2; respectively).

Discussion

We found independent associations between ambient light exposure, such as increased nighttime or evening light ex-

posure and decreased morning or daytime light exposure, and subsequent increases in obesity parameters. To our knowledge, this is the first longitudinal study reporting a significant association between time-dependent ambient light levels and obesity risk in a large general population.

Nighttime exposure to higher light intensity was significantly associated with WHtR and BMI gain; conversely, a longer dark exposure during the nighttime was significantly associated with WHtR and BMI loss. Although the nighttime light levels we observed were low, our findings were consistent with previous experimental studies. Fonken et al showed that exposure to nighttime light for 8 weeks significantly increased the body mass of mice, even at a low intensity (5 lux), independently of caloric intake and physical activity (18). Kooijman et al suggested that exposure to a shorter nighttime dark period for 5 weeks increased the fat mass of mice dose-dependently through a decrease in energy expenditure by the inactivation of brown adipose tissue (19). Additionally, minimizing light exposure just before rising may be important to prevent obesity. Although median light intensity and variation were similar between the first and last hour of the nights, the obesity parameter changes were more strongly associated with light exposure during the last hour of the night than the first hour of the night. According to the phase-response curve to light (PRC) (36), early morning light advances the internal circadian phase, suggesting that light exposure during the last part of the night may cause circadian misalignment between the internal and environmental rhythms.

In the evening, increased light exposure was signifi-

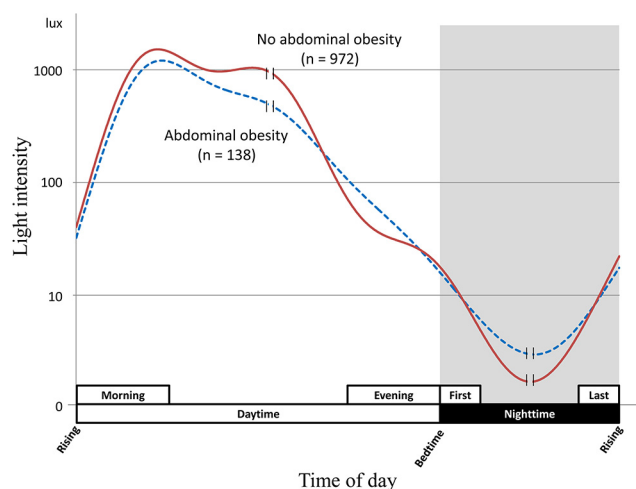


Figure 1. Cross-sectional associations between time-dependent changes in exposed light intensities and abdominal obesity at baseline. Solid line, no abdominal obesity group; dotted line, abdominal obesity group; abdominal obesity (the waist-to-height ratio ≥ 0.6); morning, 4 hours after rising; evening, 4 hours before bedtime; the first hour of the night, 1 hour after bedtime; the last hour of the night, 1 hour before rising.

Table 3. Longitudinal Association between Light Exposure and Obesity Risk using the Mixed-Effect Linear Regression Analysis

Light exposure parameters		Unadjusted			% WHtR change			Adjusted Model 2			BMI change		
		β	95% CI	P	β	95% CI	P	β	95% CI	P	β	95% CI	P
Morning (4 h)													
Mean light intensity	continuous (log lux)	-0.898	-1.472, -0.325	0.002	-0.534	-1.106, 0.039	0.07	-0.393	-0.972, 0.186	0.18	-0.143	-0.456, 0.170	0.37
Time above ≥ 500 lux	continuous (log min)	-1.275	-1.918, -0.631	<0.001	-0.897	-1.536, -0.258	0.006	-0.970	-1.798, -0.143	0.022	-0.257	-0.605, 0.091	0.15
Time above ≥ 1000 lux	continuous (log min)	-1.003	-1.607, -0.398	0.001	-0.644	-1.244, -0.044	0.035	-0.699	-1.428, 0.030	0.06	-0.148	-0.474, 0.178	0.37
Evening (4 h)													
Mean light intensity	continuous (log lux)	0.325	-0.851, 1.501	0.59	1.202	0.038, 2.365	0.043	1.209	0.026, 2.392	0.045	1.046	0.410, 1.682	0.001
Time above ≥ 50 lux	continuous (log min)	-0.034	-0.741, 0.673	0.93	0.436	-0.262, 1.134	0.22	0.506	-0.195, 1.207	0.16	0.467	0.089, 0.846	0.015
Time above ≥ 100 lux	continuous (log min)	0.253	-0.327, 0.833	0.39	0.598	0.028, 1.167	0.040	0.626	0.055, 1.196	0.032	0.452	0.145, 0.760	0.004
Daytime (All)													
Mean light intensity	continuous (log lux)	-1.176	-1.902, -0.450	0.002	-0.451	-1.120, 0.293	0.23	-0.350	-1.107, 0.408	0.37	-0.274	-0.683, 0.135	0.19
Time above ≥ 500 lux†	continuous (log min)	-1.800	-2.597, -1.003	<0.001	-1.067	-1.881, -0.252	0.010	-0.980	-1.810, -0.151	0.021	-0.540	-0.988, -0.093	0.018
Time above ≥ 1000 lux†	continuous (log min)	-1.469	-2.169, -0.769	<0.001	-0.813	-1.528, -0.098	0.026	-0.706	-1.436, 0.024	0.06	-0.432	-0.826, -0.038	0.032
Nighttime (All)													
Mean light intensity	≥ 3 vs. < 3 lux	0.783	0.033, 1.533	0.041	0.919	0.190, 1.649	0.014	0.959	0.230, 1.687	0.010	0.405	0.011, 0.799	0.044
	≥ 10 vs. < 10 lux	1.091	0.066, 2.116	0.037	1.073	0.076, 2.070	0.035	0.999	0.004, 1.993	0.049	0.391	-0.143, 0.932	0.15
Time below < 3 lux‡	continuous (per min)	-0.006	-0.012, -0.001	0.029	-0.006	-0.012, -0.0005	0.034	-0.006	-0.012, -0.001	0.023	-0.003	-0.006, -0.00002	0.048
Time below < 10 lux‡	continuous (per min)	-0.008	-0.014, -0.001	0.018	-0.007	-0.014, -0.001	0.023	-0.007	-0.013, -0.001	0.021	-0.003	-0.007, 0.00004	0.053
First night (1 h)													
Mean light intensity	T1 (low)	ref			ref			ref			ref		
	T2 (intermediate)	0.151	-0.660, 0.963	0.71	0.270	-0.521, 1.062	0.50	0.219	-0.564, 1.002	0.58	-0.048	-0.472, 0.375	0.82
	T3 (high)	0.375	-0.437, 1.187	0.37	0.408	-0.382, 1.199	0.31	0.219	-0.576, 1.013	0.59	-0.067	-0.497, 0.362	0.76
Last night (1 h)													
Mean light intensity	T1 (low)	ref			ref			ref			ref		
	T2 (intermediate)	0.534	-0.275, 1.344	0.20	0.411	-0.379, 1.200	0.31	0.423	-0.368, 1.215	0.29	0.288	-0.140, 0.717	0.19
	T3 (high)	0.935	0.125, 1.746	0.024	0.842	0.050, 1.635	0.037	0.898	0.089, 1.707	0.030	0.367	-0.071, 0.804	0.10

CI, confidence interval; WHtR, waist-to-height ratio; BMI, body mass index.

Model 1: Adjusted for age, gender, and follow-up duration.

Model 2: Adjusted for age, gender, follow-up duration, smoking and drinking status, household income, education, caloric intake, physical activity, bedtime, duration in bed, and day length.

† Adjusted for duration out of bed (continuous). ‡ Adjusted for duration in bed (continuous).

cantly associated with both WHtR and BMI gain, which may have resulted from the circadian phase delay or the shortened biological night. Although this association was insignificant in the unadjusted models, after adjusting for important confounders (ie, age and gender), this association became significant. The PRC indicated that the magnitude of phase delay is greater in the evening than in the other period (36). Moreover, previous studies suggested that evening exposure to room light < 200 lux suppressed the onset of melatonin synthesis (37) and prolonged sleep initiation (38), indicating that evening light shortened the melatonin-organized biological night and sleep duration. In our present study, the associations between light exposure and obesity parameters were independent of the total amount of nighttime melatonin secretion and subjective sleep quality.

Morning or daytime exposure to a longer time ≥ 500 lux significantly reduced the obesity parameters, which was possibly associated with the circadian alignment and enhanced sleep quality and melatonin levels. This moderate light intensity measured using wrist light meters generally originates in sunlight and would contribute to synchronization of the internal rhythms to the environmental rhythms. A previous cross-sectional study suggested that early daytime exposure to moderate light intensity ≥ 500 lux was significantly associated with lower BMI (26).

Midday bright light intervention of 2500 lux enhanced nocturnal melatonin secretion and improved sleep quality among elderly patients with insomnia (39). In our previous study (22), higher daytime ambient light exposure was associated with greater nocturnal melatonin levels, which relate to circadian alignment and may regulate energy expenditure through growing and activating brown adipose tissue (40, 41).

Cumulative effects of light exposure on the obesity risk can be estimated from our results. Higher nighttime light intensity (≥ 3 vs. < 3 lux) and increased evening light intensity from the twenty-fifth to seventy-fifth percentiles (15.9–37.0 lux) corresponded to 10.2% and 4.5% for WHtR gain, and 10.0% and 9.1% for BMI gain, respectively, over 10 years. Conversely, increased daytime exposure to time ≥ 500 lux and increased nighttime exposure to time < 3 lux from the twenty-fifth to seventy-fifth percentiles (40–129 minutes and 420–516 minutes, respectively) corresponded to 5.3% and 6.1% for WHtR loss, and 6.7% and 7.1% for BMI loss, respectively, over 10 years. In our study, nighttime light intensity and daytime light exposure had mutually independent effects on the obesity parameters. Additionally, increased nighttime light and decreased daytime light are common exposures in modern society, suggesting high population attribut-

able risks. Thus, changing daily light exposure patterns may be clinically significant for reducing the obesity risk.

Previous epidemiological studies have indicated that short sleep duration increases risk of obesity (42). In fact, inadequate sleep decreases leptin levels and increases ghrelin levels, resulting in increased appetite and obesity risk (43); however, our main results were independent of baseline caloric intake. Whereas nighttime light is a potential sleep disruptor even at low light intensity (44). Additionally, previous population-based studies suggested that the late chronotype was associated with obesity in adult and children (45, 46), and showed the late chronotype was exposed to a higher light intensity in evening and short sleep duration (47, 48). Thus, light exposure may be the potential upstream factor of this previous epidemiological evidence. Longitudinal studies investigating the associations of light exposure with sleep duration and chronotypes are needed.

This study has several limitations. First, participants were not randomly selected, possibly leading to selection bias. However, the parameters of BMI and the estimated glomerular filtration rate (GFR) were similar to the corresponding national data for Japan (49). Second, the follow-up data on obesity parameters were only available from 766 participants (69%), possibly affecting the validity of the statistical results. As shown in Table 1 and 2, participants lost to follow-up were significantly older, had lower education levels, engaged in less physical activity, spent longer durations in bed, had lower UME levels, and were exposed to higher nighttime light levels. These factors may lead to an underestimation of the detected influence because of exposure to higher nighttime light intensity and poor lifestyles leading to obesity. Third, the present cohort only included elderly participants; therefore, the generalizability of our findings to a younger population remains undetermined. Age-related cloudiness of the crystalline lens causes decreased light reception to the retina, even before cataract diagnosis, and the capacity for light reception in a 70-year-old is one-fifth of that in a teenager (50), possibly implying that light exposure has greater effects in younger individuals. Studies on the younger population are warranted. In addition, we had no information related to the incidence of chronic diseases associated with a loss of WHtR and BMI in our elderly population, so some residual confounding effect of the chronic diseases may exist. Fourth, light levels were measured only over 2 days without eye-level light meters, possibly leading to misclassification of the ambient light status. A previous study reported significant correlations between illumination at the cornea level and the wrist level ($r = 0.76$) (51). The day-to-day reproducibility of light exposure parameters were reported in our previous study

where both daytime and nighttime light intensity were moderately correlated ($r = 0.61$ – 0.70) (22). The interseasonal reproducibility was fair ($r = 0.45$ – 0.47) (39); however, the present statistical models were adjusted for day length. Furthermore, future studies measuring wave lengths would reveal more appropriate associations because shorter wave lengths are mostly sensitive to alignment of circadian biological rhythms (50).

In conclusion, ambient light exposure, such as increased nighttime or evening light exposure and decreased morning or daytime light exposure, was independently associated with subsequent increases in obesity parameters in a general elderly population. Return to a natural light exposure pattern may help prevent obesity. Further interventional studies are warranted to establish an optimal controlled lighting environment as a preventive option against obesity.

Acknowledgments

We would like to thank Sachiko Uemura, Naomi Takenaka, Keiko Nakajima, Maiko Kitagawa, Naoto Otaki, and Nobuhiro Tone for their valuable help with data collection.

Address all correspondence and requests for reprints to: Kenji Obayashi, MD, PhD, 840 Shijocho, Kashiharashi, Nara, 634–8521, Japan, Department of Community Health and Epidemiology, Nara Medical University School of Medicine, Nara, Japan, E-mail: obayashi@naramed-u.ac.jp, Phone: +81–744–29–3051, Fax: +81–744–29–5053.

This work was supported by research funding from Department of Indoor Environmental Medicine, Nara Medical University; JSPS KAKENHI (grant numbers: 24 790 774, 22 790 567, 25 860 447, 25 461 393, 15H04776, and 10 124 877); Mitsui Sumitomo Insurance Welfare Foundation; Meiji Yasuda Life Foundation of Health and Welfare; Osaka Gas Group Welfare Foundation; Japan Diabetes Foundation; Daiwa Securities Health Foundation; Japan Science and Technology Agency; YKK AP Inc.; Ushio Inc.; Nara Prefecture Health Promotion Foundation; Nara Medical University Grant-in-Aid for Collaborative Research Projects; Tokyo Electric Power Company; EnviroLife Research Institute Co., Ltd.; and Sekisui Chemical Co., Ltd. The funders had no role in the study design, data collection and analysis, decision to publish, and preparation of the manuscript.

Conflict of Interest: KO and KS received research grant from YKK AP Inc., Ushio Inc., Tokyo Electric Power Company; EnviroLife Research Institute Co., Ltd.; and Sekisui Chemical Co., Ltd.

References

1. Kopelman PG. Obesity as a medical problem. *Nature*. 2000;404:635–643.
2. Flegal KM, Carroll MD, Ogden CL, Johnson CL. Prevalence and

- trends in obesity among US adults, 1999–2000. *JAMA*. 2002;288:1723–1727.
3. Yoshiike N, Seino F, Tajima S, Arai Y, Kawano M, Furuhashi T, Inoue S. Twenty-year changes in the prevalence of overweight in Japanese adults: the National Nutrition Survey 1976–95. *Obes Rev*. 2002;3:183–90.
 4. Misra A, Khurana L. Obesity and the metabolic syndrome in developing countries. *J Clin Endocrinol Metab*. 2008;93:S9–30.
 5. Franklin SS, Pio JR, Wong ND, Larson MG, Leip EP, Vasan RS, Levy D. Predictors of new-onset diastolic and systolic hypertension: the Framingham Heart Study. *Circulation*. 2005;111:1121–1127.
 6. Meigs JB, Wilson PW, Fox CS, Vasan RS, Nathan DM, Sullivan LM, D'Agostino RB. Body mass index, metabolic syndrome, and risk of type 2 diabetes or cardiovascular disease. *J Clin Endocrinol Metab*. 2006;91:2906–2912.
 7. Wilson PW, D'Agostino RB, Sullivan L, Parise H, Kannel WB. Overweight and obesity as determinants of cardiovascular risk: the Framingham experience. *Arch Intern Med*. 2002;162:1867–1872.
 8. Calle EE, Kaaks R. Overweight, obesity and cancer: epidemiological evidence and proposed mechanisms. *Nat Rev Cancer*. 2004;4:579–591.
 9. Adams KF, Schatzkin A, Harris TB, Kipnis V, Mouw T, Ballard-Barbash R, Hollenbeck A, Leitzmann MF. Overweight, obesity, and mortality in a large prospective cohort of persons 50 to 71 years old. *N Engl J Med*. 2006;355:763–778.
 10. Ford ES, Maynard LM, Li C. Trends in mean waist circumference and abdominal obesity among US adults, 1999–2012. *JAMA*. 2014;312:1151–1153.
 11. Asher G, Schibler U. Crosstalk between components of circadian and metabolic cycles in mammals. *Cell Metab*. 2011;13:125–137.
 12. Turek FW, Joshu C, Kohsaka A, Lin E, Ivanova G, McDearmon E, Laposky A, Losee-Olson S, Easton A, Jensen DR, Eckel RH, Takahashi JS, Bass J. Obesity and metabolic syndrome in circadian Clock mutant mice. *Science*. 2005;308:1043–1045.
 13. McHill AW, Melanson EL, Higgins J, Connick E, Moehlman TM, Stothard ER, Wright KP Jr. Impact of circadian misalignment on energy metabolism during simulated nightshift work. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2014;111:17302–17307.
 14. Scheer FA, Hilton MF, Mantzoros CS, Shea SA. Adverse metabolic and cardiovascular consequences of circadian misalignment. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2009;106:4453–4458.
 15. Suwazono Y, Dochi M, Sakata K, Okubo Y, Oishi M, Tanaka K, Kobayashi E, Kido T, Nogawa K. A longitudinal study on the effect of shift work on weight gain in male Japanese workers. *Obesity*. 2008;16:1887–1893.
 16. Zeitzer JM, Dijk DJ, Kronauer R, Brown E, Czeisler C. Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. *J Physiol*. 2000;526:695–702.
 17. Fonken LK, Nelson RJ. The effects of light at night on circadian clocks and metabolism. *Endocr Rev*. 2014;35:648–670.
 18. Fonken LK, Workman JL, Walton JC, Weil ZM, Morris JS, Haim A, Nelson RJ. Light at night increases body mass by shifting the time of food intake. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2010;107:18664–18669.
 19. Kooijman S, van den Berg R, Ramkisoensing A, Boon MR, Kuipers EN, Loefer M, Zonneveld TC, Lucassen EA, Sips HC, Chatzispayrou IA, Houtkooper RH, Meijer JH, Coomans CP, Biermasz NR, Rensen PC. Prolonged daily light exposure increases body fat mass through attenuation of brown adipose tissue activity. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2015;112:6748–6753.
 20. Obayashi K, Sasaki K, Iwamoto J, Okamoto N, Tomioka K, Nezu S, Ikada Y, Kurumatani N. Exposure to light at night, nocturnal urinary melatonin excretion, and obesity/dyslipidemia in the elderly: a cross-sectional analysis of the HEIJO-KYO study. *J Clin Endocrinol Metab*. 2013;98:337–344.
 21. McFadden E, Jones ME, Schoemaker MJ, Ashworth A, Swerdlow AJ. The relationship between obesity and exposure to light at night: cross-sectional analyses of over 100,000 women in the Breakthrough Generations Study. *Am J Epidemiol*. 2014;180:245–250.
 22. Cho Y, Ryu SH, Lee BR, Kim KH, Lee E, Choi J. 2015 Effects of artificial light at night on human health: A literature review of observational and experimental studies applied to exposure assessment. *Chronobiol Int*. (in press).
 23. Obayashi K, Sasaki K, Iwamoto J, Okamoto N, Tomioka K, Nezu S, Ikada Y, Kurumatani N. Positive effect of daylight exposure on nocturnal urinary melatonin excretion in the elderly: a cross-sectional analysis of the HEIJO-KYO study. *J Clin Endocrinol Metab*. 2012;97:4166–4173.
 24. Scheuermaier K, Laffan AM, Duffy JF. Light exposure patterns in healthy older and young adults. *J Biol Rhythms*. 2010;25:113–122.
 25. Reid KJ, Santostasi G, Baron KG, Wilson J, Kang J, Zee PC. Timing and intensity of light correlate with body weight in adults. *PLoS One*. 2014;9:e92251.
 26. Obayashi K, Sasaki K, Iwamoto J, Ikada Y, Kurumatani N. Independent associations of exposure to evening light and nocturnal urinary melatonin excretion with diabetes in the elderly. *Chronobiol Int*. 2014;31:394–400.
 27. Ashwell M, Cole TJ, Dixon AK. Ratio of waist circumference to height is strong predictor of intra-abdominal fat. *BMJ*. 1996;313:559–560.
 28. Ashwell M, Gunn P, Gibson S. Waist-to-height ratio is a better screening tool than waist circumference and BMI for adult cardio-metabolic risk factors: systematic review and meta-analysis. *Obes Rev*. 2012;13:275–286.
 29. Ashwell M, Mayhew L, Richardson J, Rickayzen B. Waist-to-height ratio is more predictive of years of life lost than body mass index. *PLoS One*. 2014;9:e103483.
 30. Takahashi K, Yoshimura Y, Kaimoto T, Kunii D, Komatsu T, Yamamoto S. Validation of a food frequency questionnaire based on food groups for estimating individual nutrient intake. *Jpn J Nutr*. 2001;59:221–232. (in Japanese)
 31. Craig CL, Marshall AL, Sjöström M, Bauman AE, Booth ML, Ainsworth BE, Pratt M, Ekelund U, Yngve A, Sallis JF, Oja P. International physical activity questionnaire: 12-country reliability and validity. *Med Sci Sports Exerc*. 2003;35:1381–1395.
 32. Buysse DJ, Reynolds CF 3rd, Monk TH, Berman SR, Kupfer DJ. The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Res*. 1989;28:193–213.
 33. National Astronomical Observatory of Japan; available at: <http://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/index.html.en> (accessed on November. 30, 2015)
 34. Wood SN. 2006 Generalized additive models: an introduction with R. *Chapman and Hall/CRC*.
 35. Wood SN. Package 'mgcv'; available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/mgcv/> (accessed on November. 30, 2015)
 36. Khalsa SB, Jewett ME, Cajochen C, Czeisler CA. A phase response curve to single bright light pulses in human subjects. *J Physiol*. 2003;549:945–952.
 37. Gooley JJ, Chamberlain K, Smith KA, Khalsa SB, Rajaratnam SM, Van Reen E, Zeitzer JM, Czeisler CA, Lockley SW. Exposure to room light before bedtime suppresses melatonin onset and shortens melatonin duration in humans. *J Clin Endocrinol Metab*. 2011;96:E463–472.
 38. Obayashi K, Sasaki K, Iwamoto J, Okamoto N, Tomioka K, Nezu S, Ikada Y, Kurumatani N. Effect of exposure to evening light on sleep initiation in the elderly: a longitudinal analysis for repeated measurements in home settings. *Chronobiol Int*. 2014;31:461–467.
 39. Mishima K, Okawa M, Shimizu T, Hishikawa Y. Diminished melatonin secretion in the elderly caused by insufficient environmental illumination. *J Clin Endocrinol Metab*. 2001;86:129–134.
 40. Brzezinski A. Melatonin in humans. *N Engl J Med*. 1997;336:186–195.
 41. Cipolla-Neto J, Amaral FG, Afeche SC, Tan DX, Reiter RJ. Melatonin, energy metabolism, and obesity: a review. *J Pineal Res*. 2014;56:371–381.
 42. Patel SR, Hu FB. Short sleep duration and weight gain: a systematic review. *Obesity*. 2008;16:643–653.

43. Spiegel K, Tasali E, Penev P, Van Cauter E. Sleep curtailment in healthy young men is associated with decreased leptin levels, elevated ghrelin levels, and increased hunger and appetite. *Ann Intern Med.* 2004;141:846–850.
44. Cajochen C, Zeitzer JM, Czeisler CA, Dijk DJ. Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness. *Behav Brain Res.* 2000;115:75–83.
45. Yu JH, Yun CH, Ahn JH, Suh S, Cho HJ, Lee SK, Yoo HJ, Seo JA, Kim SG, Choi KM, Baik SH, Choi DS, Shin C, Kim NH. Evening chronotype is associated with metabolic disorders and body composition in middle-aged adults. *J Clin Endocrinol Metab.* 2015;100:1494–1502.
46. Arora T, Taheri S. Associations among late chronotype, body mass index and dietary behaviors in young adolescents. *Int J Obes.* 2015;39:39–44.
47. Staples VS, Archer SN, Arber S, Skene DJ. Daily light exposure profiles in older non-resident extreme morning and evening types. *J Sleep Res.* 2009;18:466–471.
48. Koo YS, Song JY, Joo EY, Lee HJ, Lee E, Lee SK, Jung KY. Outdoor artificial light at night, obesity, and sleep health: Cross-sectional analysis in the KoGES study. *Chronobiol Int.* 2016;33:301–314.
49. The National Health and Nutrition Survey Japan 2010; available at: <http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/eiyou/h22-houkoku.html> (in Japanese; accessed on November. 30, 2015).
50. Turner PL, Van Someren EJ, Mainster MA. The role of environmental light in sleep and health: effects of ocular aging and cataract surgery. *Sleep Med Rev.* 2010;14:269–280.
51. Okudaira N, Kripke DF, Webster JB. Naturalistic studies of human light exposure. *Am J Physiol.* 1983;245:R613–615.



Circadian and Metabolic Effects of Light: Implications in Weight Homeostasis and Health

Santiago A. Plano^{1,2}, Leandro P. Casiraghi², Paula García Moro², Natalia Paladino², Diego A. Golombek² and Juan J. Chiesa^{2*}

¹ Chronophysiology Laboratory, Institute for Biomedical Research (BIOMED – CONICET), School of Medical Sciences, Universidad Católica Argentina (UCA), Buenos Aires, Argentina, ² Laboratorio de Cronobiología, Universidad Nacional de Quilmes – CONICET, Buenos Aires, Argentina

OPEN ACCESS

Edited by:

Ahmed S. BaHamam,
King Saud University, Saudi Arabia

Reviewed by:

Timo Partonen,
National Institute for Health and
Welfare, Finland
Rhiannan Hope Williams,
Helmholtz Zentrum München
(HZ), Germany

*Correspondence:

Juan J. Chiesa
juan.chiesa@unq.edu.ar

Specialty section:

This article was submitted to
Sleep and Chronobiology,
a section of the journal
Frontiers in Neurology

Received: 30 June 2017

Accepted: 04 October 2017

Published: 19 October 2017

Citation:

Plano SA, Casiraghi LP,
García Moro P, Paladino N,
Golombek DA and Chiesa JJ (2017)
Circadian and Metabolic Effects
of Light: Implications in Weight
Homeostasis and Health.
Front. Neurol. 8:558.
doi: 10.3389/fneur.2017.00558

Daily interactions between the hypothalamic circadian clock at the suprachiasmatic nucleus (SCN) and peripheral circadian oscillators regulate physiology and metabolism to set temporal variations in homeostatic regulation. Phase coherence of these circadian oscillators is achieved by the entrainment of the SCN to the environmental 24-h light:dark (LD) cycle, coupled through downstream neural, neuroendocrine, and autonomic outputs. The SCN coordinate activity and feeding rhythms, thus setting the timing of food intake, energy expenditure, thermogenesis, and active and basal metabolism. In this work, we will discuss evidences exploring the impact of different photic entrainment conditions on energy metabolism. The steady-state interaction between the LD cycle and the SCN is essential for health and wellbeing, as its chronic misalignment disrupts the circadian organization at different levels. For instance, in nocturnal rodents, non-24 h protocols (i.e., LD cycles of different durations, or chronic jet-lag simulations) might generate forced desynchronization of oscillators from the behavioral to the metabolic level. Even seemingly subtle photic manipulations, as the exposure to a “dim light” scotophase, might lead to similar alterations. The daily amount of light integrated by the clock (i.e., the photophase duration) strongly regulates energy metabolism in photoperiodic species. Removing LD cycles under either constant light or darkness, which are routine protocols in chronobiology, can also affect metabolism, and the same happens with disrupted LD cycles (like shiftwork of jetlag) and artificial light at night in humans. A profound knowledge of the photic and metabolic inputs to the clock, as well as its endocrine and autonomic outputs to peripheral oscillators driving energy metabolism, will help us to understand and alleviate circadian health alterations including cardiometabolic diseases, diabetes, and obesity.

Keywords: photic entrainment, suprachiasmatic nucleus, metabolism, desynchronization, obesity

INTRODUCTION

The 24-h transitions between light and darkness [light:dark (LD) cycles] generated by the rotation of the Earth provide a strong temporal cue (i.e., the time giver, or *zeitgeber*) for most organisms, which display daily behavioral and physiological rhythms. In mammals, a hierarchical coordination is exerted from a central circadian clock at the suprachiasmatic nucleus (SCN) of the hypothalamus.

SCN activity orchestrates clocks in peripheral vegetative functions by endocrine and autonomic outputs [reviewed in Ref. (1, 2)], in resonance with the cyclic environmental changes. Notably, such changes affect not only core body temperature (CBT), hormonal secretion, or the timing of sleep but also the homeostatic balance of nutrients intake, processing, and energy expenditure. Indeed, most mammalian genes oscillate in cell-autonomous clocks that interact directly or indirectly with feeding-fasting cycles (3). This helps to keep daily rhythms in tissue functions, setting adequate timing for nutrient assimilation, mobilization and distribution, and metabolic waste removal. This center-to-periphery orchestration is phase stabilized by LD phototransduction at the SCN (4). A fine-tuning of this process is exerted by peripheral feedback into the SCN through behavioral, neural, and/or humoral factors, while peripheral oscillators receive entraining signals directly from systemic blood-borne metabolites (2).

Recent studies revealed that circadian disruption of this network at different levels might lead to metabolic and weight homeostasis alterations. Under normal light entraining conditions, adequate phase relationships between the LD cycle and body rhythms (e.g., activity/rest, feeding/fasting rhythms, and metabolic hormones) are achieved, even when taking into account short-term acute variations induced by exercise or feeding. Indeed, the timing of behavioral activity and peripheral rhythms is separated through endocrine and autonomic outputs ensuring a day–night variation in cardiometabolic drive (5). This also applies to metabolic rhythms that are needed to sustain and even prepare the body for adequate alertness. For instance, basal glycemia is daily regulated by insulin, glucagon, and growth hormone rhythms, while glucocorticoids regulate both glucose uptake and catabolism in muscles, brain, and adipose tissue for awakening and activity onset (6).

This article will review the role of photic entraining conditions in circadian oscillation, metabolism and energy expenditure, and body weight homeostasis, considering the lighting conditions commonly used in the laboratory for animal's studies (i.e., LD cycles, photoperiod length, constant light and darkness), as well as light pollution in urban environments, helping to understand its implications for human health alterations leading to metabolic syndrome (MS) and obesity.

THE CIRCADIAN SYSTEM

The SCN Clockwork

The circadian clock is located above the suprachiasmatic tract, receiving light information from the retina to entrain the SCN activity with LD cycles. The SCN is formed by two bilateral nuclei of ~20,000 neurons distributed into two major subregions: a ventrolateral region, receiving most retinal afferents expressing vasoactive intestinal peptide (VIP), and gamma-aminobutyric acid (GABA), and a dorsomedial region expressing arginine-vasopressin peptide, GABA, and receiving/projecting afferents/efferents from/to other hypothalamic nuclei (7). Most of the dorsomedial neurons exhibit circadian electrical activity through self-sustained transcription-translation feedback loops (TTFL) involving clock-gene expression and its post-translational

regulation (8). The transcriptional factor CLOCK and ARNTL, and ARNTL2 form heterodimers which binds to E-boxes in the promoters of their own repressors, Period (*Per1-3*) and Cryptochrome (*Cry1-2*), and of the nuclear hormone receptors Rev-erb (α and β), and *Ror* (α , β , and γ). Two additional loops control *Bmal1* expression, by REV-ERB α repression, and ROR α activation through RRE elements in its promoter (9). The TTFL molecular machinery is functional in almost all cells in peripheral tissues and is driven by direct autonomic and/or endocrine outputs of the SCN, as well as by indirect blood-borne metabolites temporally gated by the SCN (3).

Photic Entrainment of the Circadian Clock

Clock-controlled mechanisms allow anticipatory temporal organization of biological functions according to predictable changes (e.g., the daily LD cycle) and, just as importantly, a temporal segregation between conflicting or incompatible processes (e.g., feeding and sleeping). Thus, daily photic entrainment of the SCN clock, i.e., to adjust its period with that of the LD cycle, is a key organizer for such temporal homeostasis. Light stimuli synchronize the SCN through glutamatergic signaling by means of the retinohypothalamic tract (4). Ventrolateral neurons respond to photic stimulation during the subjective night in nocturnal rodents by increasing the expression of clock genes of the Period (*Per*) family, *per1* and *per2* (10–13). In turn, signaling from the retinorecipient ventrolateral neurons to the dorsomedial SCN synchronize self-sustained clock-gene oscillations. Rhythmic intercellular coupling allows the SCN to act as a tissue pacemaker with coherent circadian outputs. Such coupling occurs by neuropeptide signaling, such as VIP (through VPAC receptors), GRP-mediated communication (14, 15), and NO and GABA neurotransmission (16–20). Uncoupling the SCN neuronal network of gene and neurotransmitter activity by untimed circadian lighting generates dampened SCN outputs controlling behavior and physiology. The SCN acts as the hypothalamic link between the retina and oscillators in peripheral organs, entraining those organs to the LD cycle.

SCN Outputs That Temporize Tissue Oscillators

The SCN is a central timing structure that organizes circadian oscillators controlling metabolism, primarily by maintaining behavioral rhythms of activity/rest and feeding/fasting, through both synaptic (21) and diffusible factors (22) that couple the SCN with neuroendocrine and neural outputs. SCN neurons exhibit an endogenous rhythm of electrical activity linked to the molecular oscillator (23), driving rhythmic neurotransmitter release at their efferents (24) even under constant dark conditions (25). Many brain areas serve as effectors of the circadian clock, including projections to different targets such as the paraventricular nucleus of the hypothalamus (PVN) and other non-hypothalamic areas that gate physiologically relevant sensory information (26). One of the major outputs of the SCN is directed toward the control of hormonal secretions, by means of (1) direct contact with neuroendocrine neurons at the PVN, controlling the release of corticotropin-releasing hormone (CRH) and stimulating the

adenohypophysis for the release of adrenocorticotrophic hormone (ACTH); (2) targeting intermediate neurons, e.g., neurons of the medial preoptic nucleus, the dorsomedial hypothalamic nucleus (DMH), or the sub-PVN; (3) stimulating autonomic PVN projections to intervene into autonomic nervous system (ANS) circuits that affects endocrine organs; and finally (4) by influencing its own feedback (24). In addition, CBT rhythm is a relevant SCN output which can temporize peripheral tissues (27). **Figure 1** outlines the integration of circadian energy metabolism, by the main brain structures regulating behavioral, endocrine, and physiological outputs, and the main pathways for peripheral interactions and feedbacks.

The SCN controls several outputs driving diurnal rhythms in metabolic hormones to regulate energy homeostasis. A main SCN–CRH–ACTH output drives a rise in adrenal glucocorticoids just before activity onset. This promotes arousal and alertness by enhancing liver gluconeogenesis (from amino acids and fatty acids), promoting release of liver glucose to the blood,

and increasing its uptake in the brain and muscles. Adrenal glucocorticoids have been implicated as a peripheral humoral cue for the entrainment of oscillators such as the liver (28). Glucocorticoids can also feedback to either the SCN or its outputs driving behavioral re-entrainment to light in a model of jet-lag (29). The systemic levels of the main metabolic hormones, insulin, glucagon, and adrenalin also exhibit robust circadian rhythms controlled by the SCN (1). The circadian rhythm of glucose has a direct drive from the SCN through a sympathetic pathway that connects with the liver (30). The SCN increases insulin sensitivity through multiple pathways, resulting in an increase in glucose uptake in muscle, and simultaneously causes increased hepatic glucose production (31, 32). In addition, the SCN exerts a direct control on cardiac and glucose metabolism (24). Circadian and LD-controlled pineal melatonin release is driven by SCN output through a multisynaptic pathway relaying in the sympathetic superior cervical ganglion (33, 34), regulating metabolism in photoperiodic species (see below).

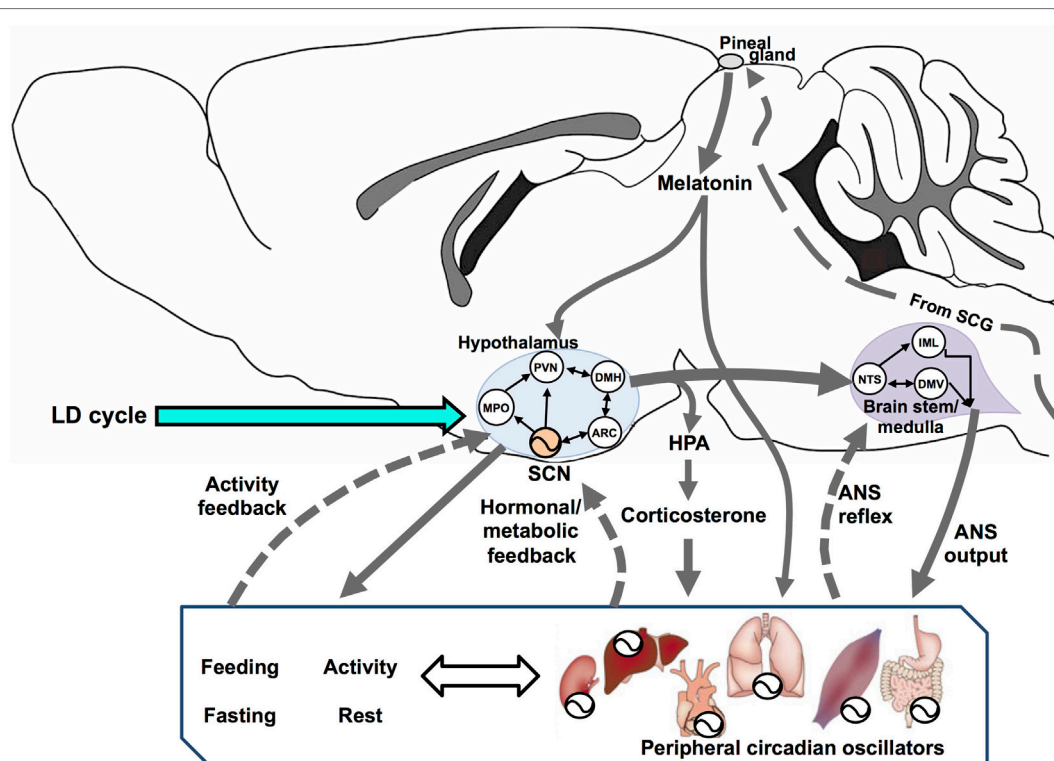


FIGURE 1 | Circadian rhythms are driven by a vast network of oscillators regulated by multiple interconnected feedback loops that, in turn, synchronize the entire organism. Here, we show a simplified system with three interconnected components: the hypothalamus, brain stem/spinal cord, and the periphery (including behavioral rhythms as feeding/fasting and activity/rest). In the hypothalamus, the suprachiasmatic nucleus (SCN) sends synchronizing signals to different hypothalamic areas such as the medial preoptic (MPO), paraventricular (PVN), dorsomedial (DMH), and the arcuate (ARC) nuclei. All these are interconnected and send feedback information to the SCN. In addition, PVN efferences connect to two main endocrine outputs: (1) a polysynaptic pathway relaying in the superior cervical ganglion (SCG) which controls the production and release of melatonin from the pineal gland *via* its sympathetic innervation and (2) the secretion of corticotrophin-releasing hormone, acting on the pituitary for the release of adrenocorticotrophic hormone (HPA axis) and controlling adrenal glucocorticoids (corticosterone in rodents). The SCN exert a circadian control on PVN outputs for most autonomic nervous system (ANS) functions, driven at the brain stem/medulla through parasympathetic motoneurons in the vagal dorsal motor nucleus (DMV), and by sympathetic motoneurons in the intermediolateral column (IML). The nucleus tractus solitarius (NTS) acts as an integrative center for signals coming from the hypothalamus, peripheral ANS reflexes transmitted to the DMN and the IML, and feedback to the hypothalamus (not shown). Blood-borne factors like glucose, feeding/fasting regulatory hormones and, factors derived from physical exercise, can modulate circadian rhythms at peripheral organs, as well as regulate the ANS feedback to the hypothalamus.

Entrainment of Peripheral Oscillators

Peripheral and central clocks are normally held in adaptive synchrony by the SCN. In particular, the central clock regulates rhythmic feeding behavior, which in turn produces rhythmic food intake generating circadian-metabolic signals in the periphery. Endocrine and autonomic SCN outputs to peripheral tissues regulating nutrients intake, processing, mobilization, usage for fuel and/or storage provide a circadian control on global energy metabolism. While the circadian activity/rest rhythm is entrained to the LD cycle, the feeding/fasting rhythm appears to affect the timing and robustness of circadian rhythms in metabolic organs. As a general rule, peripheral oscillators (like the liver) respond rapidly to cycles of food availability, while the light cycle resets the SCN more quickly than does food (35, 36). Restricting food intake during the light, resting phase in nocturnal rodents under LD, in addition to affect CBT and glucocorticoid amplitudes, completely reverses clock-gene expression in the liver, kidney, heart, and pancreas, but do not affect SCN function (37). Indeed, the expression of genes controlling peripheral clocks can be regulated directly by the circadian clock, by systemic signals from periodic food ingestion, or by a combination of both mechanisms (38, 39). While the circadian component of this regulation optimizes the anticipation of predictable fluctuations in the organ environment, the responsiveness to systemic cues adds a degree of flexibility to the system that is necessary to adapt to unpredictable changes in the environment (e.g., in times of caloric intake restriction, and/or temporal niche switching, see below).

Peripheral clocks are strongly affected by cell metabolism, the physiological and metabolic state of the surrounding tissue, and serum-borne signals. Several metabolic signals such as NADH/NAD⁺, NADPH/NADP⁺, ATP/AMP, oxygen and its reactive species, carbon monoxide, or glucose, directly affect transcriptional activity of circadian proteins (40). Peripheral oscillators such as the liver clock are additionally coupled to cellular and general physiology through energy and nutrient sensing systems, such as AMP-activated protein kinase (AMPK), PPARGC1A (also known as PGC1), metabolic feedback loops involving metabolites, such as polyamines, and nuclear hormone receptor signaling pathways.

Peripheral oscillators not only adjust their clock-genes rhythms to the master circadian clock by a mix of direct and indirect signals from the SCN but also can be differentially altered in phase by behavior (e.g., activity, or access to food) or light. While the liver clock adjusts its phase preferentially to feeding time, adrenal glands strongly respond to light input (Ishida (41, 42). Animals receiving food six times a day lose their rhythm in white adipose tissue in seven of nine tested oscillatory metabolic/adipokine genes, but not in clock genes. By contrast, abolishing the daily corticosterone peak also rendered the peripheral clock-genes arrhythmic (43).

Multiple circadian clocks drive local rhythms of cellular metabolism, synchronized by cues from the SCN as well as by other inputs. Autonomous rhythms in the mediobasal hypothalamus might contribute to metabolic homeostasis (44–49). Moreover, the DMH might play an important role as a component of the SCN-independent food entrainable oscillator (50–53). Importantly, regulation of body weight involves the integration

of multiple signals in a neural network of several interconnected hypothalamic areas, including the SCN, the arcuate nucleus (AN), the ventromedial hypothalamic nucleus (VMH), and the PVN, whose interactions control the main three factors that underlie energy balance: appetite and food intake, deposition of fat, and energy expenditure (2, 54).

Circadian and Metabolic Integrative Function in the Liver

The functions of the liver are rhythmically regulated; an analysis of transcriptions within the liver shows two peaks corresponding to the dusk and dawn oscillators, and this may reflect the differences in physiological requirements such as energy demand (55–58). The liver orchestrates rhythms in energy homeostasis, i.e., levels of glucose transporters, the glucagon receptor, and enzymes regulating the metabolism of hexose sugars were observed with peak phase of expression in accordance with the rhythm of feeding. In addition, enzymes related to lipid homeostasis such as glycerol 3-phosphate pathway (e.g., glycerol-3-phosphate acyltransferase, 1-acyl-glycerol-3-phosphate acyl-transferase, and lipins), which regulates glycerol and lipid metabolism and triglyceride accumulation, are expressed in a circadian manner (59).

The liver circadian clock acts by buffering the fluctuations of blood glucose levels originated by behavioral and feeding/fasting cycles in a circadian fashion. Specific *Bmal1* deletion in the liver reduced basal glycemia in mice during the fasting phase, mainly by altering liver glucose export (60), insulin and glucagon secretion (61, 62), and glucose production and uptake (32, 63). In addition, many clock-genes and clock-controlled genes have multiple roles in glucose metabolism. Cryptochromes regulate hepatic gluconeogenesis through interaction with G protein-coupled receptors, inhibiting cAMP storage and increasing transcription of CREB-regulated gluconeogenic genes. In addition, overexpression of *Cry1* in liver affects glucose levels in diabetic mice (64). Positive and negative regulators of the core clock oscillator control circadian regulation of the glucose metabolism. Multiple signaling pathways converge on rate-limiting enzymes of glucose anabolism and catabolism, such as phosphoenolpyruvate carboxykinase or pyruvate kinase (65). As mentioned earlier, the liver oscillator is strongly coupled to feeding/fasting cycles, and its insulin-dependent fluctuations, in addition to being regulated at the level of *Per1-2* genes (66).

LIGHTING CONDITIONS AND THEIR IMPACT ON METABOLISM AND WEIGHT HOMEOSTASIS IN ANIMAL MODELS

Murine models have long been the first choice to study the effects of environmental circadian challenges. Lighting conditions in the laboratory can be manipulated through many protocols: adjusting the LD period (i.e., generating T-cycles), determining the relative duration of light and dark intervals, regulating light intensity, applying light- or darkness-pulses, or maintaining constant routines of darkness or light. The possibility of combining all of these should also be considered, thus providing a myriad of different challenging lighting environments.

12:12 h “square” LD cycles with abrupt light–dark transitions constitute a “standard” condition in most chronobiology studies with rodents. However, it is difficult to state, from the metabolic point of view, which is the “normal” (i.e., eco-physiological) lighting condition, since it might be quite variable in the daily and/or annual photoperiodic environment. In addition, intrinsic photic features of the laboratory LD cycles, such as light intensity (i.e., the number of light hours per day, or photoperiod length), can modulate behavioral entrainment, metabolism, and weight. Spectral composition, abrupt or twilight transitions, and the irradiance contrast between light and dark portions of the LD cycle should also be considered. Several laboratories have designed “dim light at night” protocols to simulate night light pollution in urban environments, which will be discussed below (67).

Laboratory 24-h LD Cycles

LD Cycles and Temporal Niche Interaction

Besides circadian photoentrainment, and the subsequent interest in peripheral oscillators, it is interesting to consider the temporal niche of the species and the adaptive plasticity of the circadian system (68). This is a major hallmark for present and future chronobiology, since it includes the comprehension of the center-to-periphery interactions among circadian oscillators, as well as their eco-physiological interactions with environmental cycles. Indeed, temporal niche variations (i.e., “switching”) is a strategy used in several rodents during their circannual or life cycle (69). In addition, most of the chronobiological

studies utilize nocturnal rodents, and not all conclusions may be applied to understand metabolic alterations in humans, a typical diurnal mammal. Although activity/rest rhythms are 180° out of phase, diurnal and nocturnal species appear to conserve the same fundamental SCN rhythmicity: electrical activity, neurotransmission, molecular clock mechanisms, melatonin output (signaling the circadian night), and shape of the photic phase response curve are roughly equal in both cases [reviewed in Ref. (70)]. Downstream of the SCN, most hormonal rhythms reflect the changing demands in energy metabolism in coherence with the activity/rest and feeding/fasting cycles (see **Figure 2** for an overview of this phase relationships in nocturnal rodents). The same vasopressin SCN signal inhibits (in nocturnal rodents) or stimulates (in diurnal species) adrenal glucocorticoids for mobilizing glucose uptake in brain and muscles (71). Opposite effects for insulin, glycemia, ghrelin, leptin, adiponectin, and lipogenesis/lipolysis have also been reported (6, 72).

As for changes between natural and captivity conditions, while C57/BL6 mice show typical “nocturnal” activity in the laboratory, they were found to be relatively diurnal or even cathemeral in the natural environment (73). However, mice coming from the wild are strictly nocturnal when placed into laboratory conditions (74). This suggests that under artificial LD cycles, the circadian clock is able to manage the entrainment of the activity/rest pattern, which is an essential output reinforcing clock activity, but the temporal activity distribution can also be determined by direct masking of light (75). From the point of view of energy

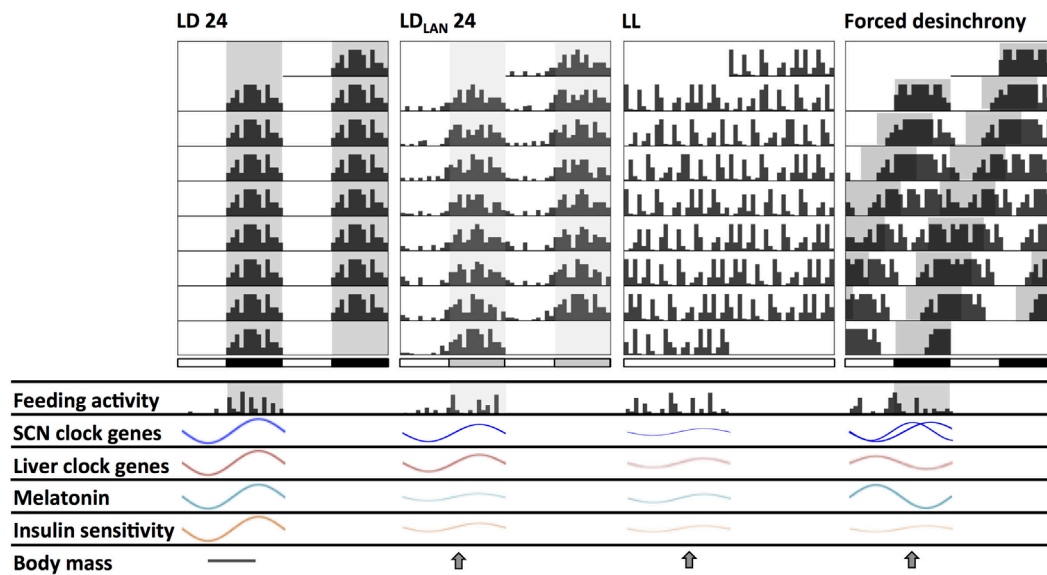


FIGURE 2 | Schematic changes found in mice and rats chronically exposed to different lighting protocols which might induce circadian and metabolic alterations. Actograms double plotted at modulo 24 h show alterations in the behavioral activity rhythm. Compared to standard light:dark (LD) conditions: (1) LD_{LAN} (light at night) promotes a dispersed rhythm increasing both general and feeding activity bouts at the light phase, together with reduced suprachiasmatic nucleus (SCN) and liver clock-genes amplitude; (2) LL generates behavioral arrhythmicity with loss of the feeding/fasting rhythm, also with dampened amplitude of SCN and liver clock-genes rhythms; (3) forced desynchrony protocols (i.e., chronic jetlag—CJL—and T cycles) generate two activity components at the behavioral and SCN clock-gene (regional) levels, with disrupted daily feeding/fasting rhythms, and with liver clock genes out of phase. Dampened melatonin rhythms occur both under LL and LD_{LAN}, while this rhythm is out of phase under forced desynchronization. All lighting protocols promote a decrease in the insulin sensitivity rhythm, and an increased weight gain respect to LD.

balance, the interaction between LD and temporal niche must optimize food intake, body mass, and energy expenditure. Indeed, locomotor activity can dramatically change to optimize food intake, and/or energy expenditure. In voles exposed to 12:12 h LD with *ad libitum* feeding, access to a running-wheel generates an entrained nocturnal locomotor and feeding pattern, with both SCN and liver clock-genes expression in appropriate phase to the LD cycle. When the voles had restricted access to a running wheel, they showed ultradian activity and feeding bouts every 2–3 h throughout the day and night, with arrhythmicity in liver clock-genes expression, while the SCN remained in phase with the LD cycle (76). A complete temporal niche switching (from nocturnal to diurnal) under 12:12 h LD was observed in mice exposed to cold and simulated food shortage (77). Again, clock-gene expression analysis shows that the underlying neuronal mechanism is downstream from or parallel to the SCN, and that the behavioral phenotype is accompanied by phase adjustment of peripheral tissues. In both examples, temporal niche and peripheral oscillators are phased to reduce metabolic costs: in voles, liver circadian rhythms are suppressed to deal with ultradian digestive demands; in mice, diurnality reduces energy expenditure in a spontaneously nocturnal animal, by reducing thermoregulatory costs, as observed in small burrowing mammals in natural conditions (78).

Photoperiod Length

The hypothalamus acts as a photoneuroendocrine integrative center, encoding the photoperiod length at the SCN by changing phase synchronization of electrical activity between individual cells through VIPergic and GABAergic communication [reviewed in Ref. (79)]. In turn, a multisynaptic pathway controls pineal melatonin nocturnal duration by a sympathetic neuronal output (80). Measuring the relative length of the photoperiod (i.e., the number of light hours per 24-h cycle) is a predictive variable for the regulation of energy metabolism in photoperiodic species. For example, the maintenance of high CBT (i.e., euthermia) becomes energetically limited during prolonged periods of cold exposure and food shortages in winter. Seasonal mammals such as the ground squirrel, European hedgehog, or hamsters reduce energy expenditure by entering periods of hypometabolism with temporary suspension of euthermia, to undergo reversible hypothermia (81). As a general view, this state of torpor last less than 24-h and is accompanied by continued foraging. Torpor bouts lasting consecutive days to several weeks occur in hibernator animals that reach lower CBT than daily heterotherms, usually do not forage, but rely on energy stores (82). These animals exhibit annual cycles of adipose tissue accumulation and body weight (83), reflecting changes in the balance between food intake and energy expenditure. The most extended strategy is to increase food intake and body fat in spring/summer, entering hibernation (and bouts of torpor/arousals) during winter by reducing appetite, glycolysis, and catabolizing stored adipose. However, seasonal changes in food intake do not seem to result from hunger/satiety responses to starvation or caloric restriction, neither involving changes in the leptin-responsive pathways in the arcuate nucleus. Although there is a strong modulation of leptin secretion by melatonin (84), the effect of photoperiod on

leptin modulation of food intake is still not clear. Plasma levels of adipose tissue hormones leptin and adiponectin respond in proportion to adiposity (85) and to photoperiodic changes in fat deposits. However, increased sensitivity to leptin-dependent mobilization of fat in short-day housed hamsters was not associated with changes in expression in either anorexic or anabolic peptides expressed in leptin-receptor rich structures in the arcuate nucleus (86). Moreover, homeostatic hypothalamic pathways that regulates short-term control of food intake involving mediobasal neuropeptide Y and pro-opiomelanocortin (87), and/or lateral orexin and melanin concentrating hormones [reviewed in Ref. (88, 89)], are likely not involved in this photoperiodic regulation.

When dealing with photoperiod-dependent changes in metabolism, it is particularly important to consider established models of hibernation in the field, including food intake and regulation in hibernating bears (90). While mammalian hibernators cease food consumption for long periods of time, there are profound changes in metabolic sensor pathways that control weight. In particular, grizzly bears exhibit a dramatic change in insulin sensitivity, become insulin-resistant during hibernation but sensitive throughout Spring and Fall (the active periods during which they feed and put on weight) (91). In addition, bears do produce leptin all year-round, but the effect of exogenous administration of the hormone was also different in the Fall (reducing food intake) and the Summer (no effect on food intake). Other hormones also exerted differential effects: ghrelin levels tended to be higher before hibernation, thus contributing to the increase in body mass, and decreased during the winter, in accordance to the low energy utilization and food intake (92). In other words, it is not only the levels of metabolic hormones—e.g., leptin—that change seasonally but also their effects on weight and glucose-sensing mechanisms that might be switched on and off to regulate metabolic rate, food intake, and body weight.

Other hormones are also instrumental in coupling environmental to metabolic pathways. Levels of thyroid hormones are essential for the photoperiodic control of basal metabolic rate and thermogenesis, mainly by sensitizing tissues for the uptake and usage of glucose. Glial tanycytes play a central role in the photoneuroendocrine pathway integrating photoperiod and metabolic state (93). Located in the ependymal layer of the third ventricle in contact with the cerebrospinal fluid, they act as glucosensors that have cellular projections to the median eminence in tight contact with the pars tuberalis of the pituitary gland, and to the arcuate nucleus, regulating their activity. Dense melatonin receptors on the pars tuberalis regulate photoperiodic synthesis and secretion of the thyroid-stimulating hormone β -subunit (TSH β), which controls tanycyte deiodinase (DIO) expression across a wide range of seasonal mammals (94). During long photoperiods, higher levels of TSH β and DIO2 favors the conversion of thyroxine (T4) to triiodothyronine (T3), increasing energy expenditure and basal metabolic rate. Lower, short-photoperiod levels of TSH β promote dominant DIO3 activity, which convert T4 to both inactive reverse T3 and diiodothyronine T2, increasing food intake and adipose deposits (89). In addition, melatonin participates in the phase control of the glucocorticoid rhythm and modulates glucose homeostasis according to photoperiod-dependent metabolic state (95).

Melatonin and Metabolism

The importance of melatonin in photoperiodic responses leads to the notion that the pineal hormone is also a key regulator of several metabolic processes. Indeed, early reports revealed that both pinealectomy and the administration of pineal extracts significantly changed glucose levels and utilization in different tissues (96–98). The lack of melatonin can lead to glucose intolerance and insulin resistance (99, 100). Such changes can be reverted by melatonin administration. In particular, melatonin regulates pancreatic function affecting both glucagon and insulin biosynthesis (101, 102). The pineal hormone acts by MT-1 and MT-2 receptor-related mechanisms on the insulin-signaling pathway (103) and, in addition, affects adipose tissue and therefore influences many aspects of metabolism (104–106).

The role of melatonin in the circadian control of energy metabolism has also been demonstrated by several studies that include pinealectomy and melatonin administration or replacement (107, 108). In general, the rhythm in melatonin secretion and plasma levels might influence the so-called “predictive homeostasis,” i.e., the preparation of tissues for optimized responses to internal (e.g., other hormones) and environmental (e.g., diurnal and photoperiodic changes) stimulation. In addition, there are some intriguing results indicating that melatonin might prevent obesity in animal models, presumably through its effect on adipocytes and/or, as indicated above, by affecting thyroid hormones (109, 110).

In summary, the pineal hormone not only couples circadian and seasonal cues to many body functions but might also be a key player in the regulation of metabolic rate. Indeed, changes in melatonin profiles—both experimental and induced by environmental disturbances related to human chronobiological disruptions—might reflect and even produce alterations in metabolism that could be overcome by the appropriate ambient or pharmacological interventions.

Light at Night (LAN)

Completely dark nights are set in LD cycles as standard laboratory conditions in most chronobiological studies. However, reducing lighting contrast in LD cycles by dimly illuminated nights demonstrated to be a relevant feature for the circadian clock. The chronic (i.e., more than 1 week) exposure to dim LAN as comparable to moonlight levels (~5 lux), and to levels of night lighting in urban areas, are sufficient to cause important effects on the circadian system of both nocturnal rodents and humans. The effects of LAN were first described at the behavioral level, since it potentiates clock entrainment in Syrian hamsters using different protocols (111–113). Compared to controls exposed to nocturnal darkness, chronic exposure to LAN reduces PER1-2 amplitude at the SCN level, as well as changes in the amplitude of glucocorticoid and melatonin cycles in the Siberian hamster (114). Reduced *Rev-Erb alpha* amplitude, but slight changes in *Bmal1*, *Cry1-2*, and *Per1-2* amplitudes were found in murine white adipose and liver tissues, without concomitant changes in both general behavioral activity and glucocorticoid rhythms (115, 116). However, both studies in mice demonstrate that LAN increased body mass and epididymal fat and reduced glucose tolerance. Although daily food consumption was similar to LD

controls, LAN reduced the amplitude of the LD feeding rhythm, by increasing food consumption during the light phase (115). The main changes found due to LAN exposure in nocturnal rodents are depicted in the **Figure 2**.

Since it was shown that mice fed during the day increase their body weight when compared with animals fed *ad libitum* (117), and restricting food access to the night in LAN-exposed mice restores the LD phenotype, this change in the feeding pattern seems to be an important factor for these alterations. Time-restricted feeding (TRF) to the dominant behavioral phase (i.e., night in nocturnal rodents) restoring weight homeostasis was also observed in other protocols (118) and is now being considered an important manipulation to regulate metabolic alterations (119), as discussed below. In addition, placing back the mice in dark nights after exposure to LAN partially reversed the increases in body mass, suggesting that the effects of LAN on metabolism are not permanent (120).

As a completely different approach, it is interesting that artificial nocturnal light might have profound consequences on our ecosystem, not only our physiology. Indeed, a recent study has demonstrated that LAN completely disrupts nocturnal pollination which adds to the expanding list of human activities that threaten ecological relationships in the planet (121).

Acute Nocturnal Light Exposure

A single, brief (5–60 min) light-pulse exposure is a typical environmental stimulus used for chronobiological research studying non-parametric photoentrainment (i.e., the acute effects of light on phase-shifting mechanisms of the circadian clock). Moreover, in nocturnal rodents, other behavioral and physiological effects of light are equally important. Acute nocturnal light exposure typically abolishes behavioral activity (i.e., negative masking) for a brief, fixed interval (independent from the stimulus duration but dependent on irradiance) (122). It also induces somnolence and a rapid drop in CBT as well as reduces pineal NAT activity and melatonin synthesis (123, 124), perhaps through a common input pathway to the SCN (125). However, photic masking responses seem to be different between diurnal and nocturnal species (126); for example, such responses persisted after bilateral SCN lesions in the diurnal Nile grass rat (127). It is speculated that locomotor suppression by light in nocturnal rodents is part of the integrative response of the SCN enhancing light effects for the phase-shifting mechanisms (125).

At the peripheral level, the effects of acute nocturnal light on circadian genes has been shown to be fast and directly coupled to metabolic hormonal functions. Light received at ipRGC melanopsin-expressing cells is necessary for the entrainment of corticosterone rhythm to LD (128). Acute LAN processed at the SCN increase corticosterone surge in rats (129) and mice (41) *via* the ANS to rapidly increase *Per1* expression, and also of several genes involved in corticosterone synthesis in adrenal glands (41). Also, exposure to a light pulse at circadian time 15 increases PER1-2 expression in the liver in rats, which is abolished with autonomic denervation (130). Apart from this hierarchical control, using targeted SCN *Bmal1* deletions that preserve neural SCN output circuitry (131), or temporally dissecting the sensitive-specific SCN-photic effects (42), provide intriguing evidence suggesting

that light can synchronize peripheral clocks in the kidney, liver, heart, and adrenals, through a retinohypothalamic SCN clock-independent pathway.

Constant Conditions

The chronic absence of LD cycles is an abnormal condition for most organisms, except those living in extreme latitudes during winter such as the arctic ground squirrel (132) or the reindeer (133). Reindeers suppress their daily activity/rest pattern being active for most of the 24 h during the polar summer day in which constant lighting is present. On the other hand, the constant darkness observed during polar winter day diminished activity bouts and also generates arrhythmicity in reindeer species living at higher latitudes. During the polar Summer day, when constant light occurs, the daily rest/activity patterns of reindeers are suppressed to permit near 24 h active behavior. By contrast, during the polar Winter, constant darkness reduces the activity bouts of reindeers and can lead to arrhythmicity in reindeer living at higher latitudes (but LD rhythms are kept at lower latitudes). Weak circadian (but not photic) control was found for reindeer melatonin levels, as well as for fibroblasts transduced with *Bmal1:luc* or *Per2:luc* reporters (134), and is proposed to be a rule particular to polar resident arctic mammals. Still, there are no data on energy metabolism for these species living in such extreme conditions.

Constant Light

Chronic exposure to light (LL) is a typical strategy to induce circadian arrhythmicity in nocturnal rodents or to study the circadian free-running period in diurnal species. LL gradually increases the circadian period of motor activity rhythm (in proportion to irradiance) in nocturnal rodents (Aschoff), resulting in arrhythmicity in rat and mice (112, 115, 135). Besides behavioral activity, the circadian feeding and drinking rhythm are also lost under LL (136, 137), and SCN-physiological outputs such as heart rate and CBT also exhibit arrhythmicity (138). Uncoupling of neuronal SCN oscillators (139), altered SCN expression of clock- and clock-controlled genes (135, 140, 141), as well as reduced amplitude of SCN electrical activity rhythms (142) are functional correlates of the circadian behavioral and physiological arrhythmicity. However, *in vivo* imaging of *PER2:LUC* oscillations in mice under LL showed peripheral rhythms in the liver, kidney, and submandibular glands with decreased amplitudes, and distribution of peak phases irrespective of the state of behavioral rhythmicity (143). This internal desynchronization due to LL is associated with several metabolic disturbances that, to some extent, resemble those observed with dim LAN protocols (see above). In mice, studies have shown that different LL protocols can induce abnormally high levels of body mass and fat tissue, alterations in energy expenditure, develop insulin resistance, and disrupt glucose metabolism, among other problems (115, 142–144). Increased adiposity in mice under LL was also attributed to decreased energy expenditure, by reduced sympathetic β_3 -adrenergic input to brown adipose tissue for the uptake of fatty acids and glucose for oxidation (145). Studies in rats have reported similar effects, also describing alterations in circulating levels of cholesterol,

melatonin, glucose, and corticosterone (137, 146, 147). **Figure 2** shows circadian changes under chronic LL exposure in nocturnal rodents, and **Table 1** supply references and additional details.

Constant Darkness

Laboratory studies are usually performed under chronic constant darkness conditions (DD) to measure the spontaneous (i.e., free-running) circadian period in nocturnal rodents. In addition, activity/rest patterns in mice and hamsters chronically (i.e., months) exposed to DD are not necessarily stable, evolving in most cases from a consolidated activity bout to fragmented locomotion and eventually into crepuscular bouts (personal observations). Despite this, evidences on regulation of energy metabolism under chronic DD conditions are scant. One study with C57BL/6J mice (172) suggested that DD could be considered a cue triggering metabolic changes for hibernation, since hibernating mammals will seasonally encounter DD conditions inside a den. Although the mouse is not a true hibernator, it can undergo torpor under caloric or thermal restriction, a hibernator-like behavior, entering brief sleep periods lowering CBT down to $\sim 30^\circ\text{C}$ (173). Zhang et al. (172) found that mice exposed to 2 days under DD, or rendered torpid by food deprivation, increased circadian gene expression and activity of fat catabolic enzymes in peripheral metabolic tissues, together with elevated blood 5'-AMP, a typical metabolic switcher acting intracellularly *via* AMP kinase to stimulate fatty acid oxidation, a necessary adaptation when glucose supplies are short. Indeed, a synthetic form of 5'-AMP in LD exposed mice induces the hypothermic torpid state and expression of fat catabolic enzymes. The authors also reported that mice maintained under DD for a week consumed less food and water [similar to rats (174)], decrease body weight, rapidly re-directed metabolic status and showed higher non-esterified fatty acids and lower glucose blood levels compared to mice kept under LD. This is surprising in laboratory mice, which are not usually photoperiodic and are routinely exposed to DD in circadian studies without reported weight loss or metabolic changes. Zhang et al. (172) also reported that peripheral circadian gene expression under DD reverses 5 h after re-exposure to LD, which emphasizes the complex effect of environmental light on peripheral physiology and metabolism. The authors did not assess other indirect effects as putative (acute) increased activity bouts in mice when transferred from LD to DD, increasing energy demand and thus 5'-AMP levels under DD [discussed in: Hastings and Loudon (175)]. In addition, photoperiodic coding by melatonin is absent in C57BL/6J mice, with a mutated gene for serotonin *N*-acetyltransferase (176). Also, it is intriguing that these acute responses to DD found in mice are consistent with how short photoperiods or darkness induce hibernal hypometabolism in photoperiodic species, which are programmed over months (83).

Chronic Jet-Lag Simulations and T-Cycle Protocols

Protocols of chronic phase-shifting of the 24-h LD cycle (i.e., chronic jet-lag, CJL), or LD schedules with periods different from 24 h (i.e., T-cycles) that affect steady-state

TABLE 1 | Abnormal light:dark conditions and metabolic alterations in animal models.

Manipulation	Species	Alterations	Reference
Constant light	Mouse	– Increased body weight	Fonken et al. (115)
		– Altered feeding patterns	
		– Reduced glucose tolerance	
	Rat	– Increased body weight	Coomans et al. (142)
		– Greater food intake	
		– Decreased energy expenditure	
Light at night	Mouse	– Loss pattern of insulin sensitivity	Hamaguchi et al. (143)
		– Reduced amplitude of liver and kidneys clock-genes rhythms	
		– Increased fat accumulation in response to high fat diet	
	Rat	– Reduced food and water intake	Wideman and Murphy (137)
		– Increased adiposity	
		– Increased circulating cholesterol levels	
Chronic phase shifting	Mouse	– Disrupted patterns of plasma melatonin, glucose, lactic acid, and corticosterone	Dauchy et al. (146)
		– Altered rhythms of glucocorticoid release	
		– Altered clock-gene expression in liver and adipose tissue	
	Rat	– Reduced glucose tolerance	Oppenhuizen et al. (151)
		– Increased body weight	
		– Increased body fat	
T-cycles	Mouse	– Higher levels of triglycerides	Casiraghi et al. (118)
		– Altered adipocytes morphology	
		– Increased body weight	
	Rat	– Increased white adipose tissues	Oike et al. (152)
		– Altered liver metabolic genes expression	
		– Altered liver clock-genes expression	
Ultradian light cycle	Mouse	– Suppression of glucocorticoid and melatonin receptors expression in the liver	Iwamoto et al. (153)
		– Increased progression of colitis	
		– Increased insulin resistance	
	Rat	– Increased fat accumulation	Zhu et al. (155)
		– Increased body fat	
		– Decreased serum insulin, leptin, and glucose levels	
Sleep disruption	Mouse	– Altered profiles of liver metabolism gene expression	Herrero et al. (156)
		– Increased body weight	
		– Higher fasting glucose levels	
	Rat	– Increased body weight	McDonald et al. (157)
		– Reduced activity	
		– Increased food consumption	
Sleep disruption	Mouse	– Lower plasma insulin levels	Bartol-Munier et al. (159)
		– Increased fat in response to a high-fat diet	
		– Increased body weight	
	Rat	– Increased leptin and insulin levels	Karatsoreos et al. (160)
		– Reduced corticosterone levels	
		– Increased body weight	
Sleep disruption	Mouse	– Reduced activity	Oishi and Higo-Yamamoto (162)
		– Disrupted lipid metabolism gene expression	
		– Increased liver and serum fatty acids	
	Rat	– Altered feeding behavior	Ferrell and Chiang (163)
		– Global disruption of liver metabolic transcriptome	
		– Impaired gluconeogenic capacity and glycogen storage rhythms	

(Continued)

TABLE 1 | Continued

Manipulation	Species	Alterations	Reference
	Rat	– Reduced glucose tolerance	Jha et al. (165)
		– Increased body weight	Salgado-Delgado et al. (166, 167)
		– Altered feeding patterns	
		– Liver clock-genes desynchronization	
		– Disrupted rhythms of plasma glucose and triacylglycerols	
Mistimed feeding schedules	Mouse	– Increased body weight	Marti et al. (168)
		– Hyperphagia	Yasumoto et al. (169)
		– Induced leptin resistance	
		– Higher levels of plasma insulin	
		– Increased accumulation of cholesterol, triglycerides, and fatty acids in the liver	
	Rat	– Increased body weight	Bray et al. (170)
		– Increased calorie intake	
		– Increased respiratory exchange ratio	
		– Altered liver and other peripheral organs clock- and metabolic genes expression	
		– Disrupted daily hormones variations	
	Rat	– Increased body weight	Opperhuizen et al. (171)
		– Desynchronization of liver rhythms	

entrainment of the SCN clock, demonstrate to be a disruptive condition generating the internal desynchronization of the whole circadian system. It ranges from behavior (177, 178), ventrolateral-dorsomedial uncoupling of *Per1* and *Bmal1* SCN expression (177), to peripheral regulatory outputs as CBT and sleep stages (179) and melatonin secretion (180). Thus, it is not surprising that this chronic misalignment of the circadian clock with the photic cycles leads to metabolic alterations (see **Figure 2** and **Table 1**). Exposing mice to chronic 6-h advances of the LD cycles every 2 days (i.e., CJL by advances) induces weight gain, increases body fat, plasma triglycerides, and adipocyte size, yet without a concomitant increase in food consumption (118). Interestingly, these effects were not observed when applying a similar CJL delaying schedule, which allowed behavioral entrainment. Similar CJL protocols consisting of two 6-h advances on a weekly basis, or of 8-h advances every 2 days also reported disrupted genes expression in the liver (152, 153). Some groups have tested protocols of alternating advances and delays of the LD cycle in rats and found increases in total body weight and adipose tissue along with alterations in metabolic hormones and liver function (156).

Rats exposed to T-cycles of similar length to their endogenous period (T25 and T26) show decreased body weight, food consumption, and less weight gain/food grams when compared with those exposed to shorter T-cycles (181). This experiment provides an interesting hypothesis of circadian-metabolic resonance, in which light cycles very similar to the circadian period efficiently couple SCN-peripheral entrainment to nutrient intake/delivery with energy output. In agreement, mice exposed to shortened T-cycles of 20 h display high body weight, increased leptin, insulin, and insulin/glucose ratio (160). Together, the studies using CJL and T-cycle protocols indicate that chronically forcing the clock to entrain by advances is the worse condition for the body energy metabolism and weight regulation.

LIGHTING ENVIRONMENTS IN HUMANS

Photic Responses of the Human Clock

Although social cues also act as relevant zeitgebers, the human circadian clock responds in a canonical way to light, similar to other diurnal mammals. It exhibits the main sensitivity to light in the late biological day/early biological night, delaying up to 3 h the clock phase, a phase advance region (~2-h shifts) in the early biological day, small phase shifts during the middle of the biological day, and a transition point toward the end of the biological night (182). Importantly, this timed response to light is of functional significance for the entrainment of the human clock by natural daylight, shifting its phase (mid-sleep time on free days) to the time of dawn at different latitudes (183). It could be generalized that human rhythms, such as activity/rest and melatonin secretion, become significantly earlier and shift to the natural crepuscules when exposed to strong (“natural”) zeitgebers composed of bright daylight and absence of artificial nightlight (184, 185). Indeed, light pollution in urban areas, i.e., the artificial lighting during the biological night, might have induced a shift of human activity toward the night and is emerging as a negative factor for health increasing the risk for metabolic disorders (186). Altered exposure to the natural LD cycle by attenuated exposure to daylight within buildings or increased exposure to artificial nightlight is one of the mechanisms leading to insufficient sleep (187). This is the so-called social jet-lag, i.e., the situation in which the body’s biological clock and the actual sleep schedules do not match, and which can be quantified as the difference between mid-sleep time on work days and mid-sleep time on free days (188). Poor (self-reported) lighting exposure, together with metabolic factors (changes in weight and appetite) of the seasonal variations in mood, is a key to the MS in the Finland population (189). In addition, irregular activity-rest patterns with higher interdaily

stability was also associated in older (81.6 ± 7.5 years) adults with MS (190), although photic effects on the daily patterns were not determined in this study.

Light intensity of ~ 200 lux is able to shift the human circadian clock (191) and even very dim light can decrease plasma melatonin levels (192), which indicates that subjects under typical indoor illumination can receive enough irradiance at night to affect their circadian system. Higher levels of LAN exposure (>3 lux) in elder people, resulted in higher body weight and body mass index (BMI), elevated triglyceride, and LDL-cholesterol levels independent of demographic and socioeconomic parameters, and without changing melatonin levels (193). Using satellite images of night time illumination, and clinical data on countries worldwide, a statistical significant association has been found between the exposure to LAN and being overweight (194). A similar study in Korean urban areas also found this association together with delayed and disrupted sleep (195). Taking together, the data from Wright et al. (184), de la Iglesia et al. (185), and Roenneberg and Merrow (188), it could be hypothesized that humans living in urban areas with access to electrical light likely experience LAN, delaying its biological clock, and therefore generating social jet-lag. Remarkably, a large-scale epidemiological study has demonstrated that social jet-lag is a key factor increasing BMI and obesity, independently of sleep duration (196). Greater social jet-lag associated positively with triglycerides, fasting insulin, insulin resistance, waist circumference, and BMI, and negatively with HDL cholesterol (197).

Our current 24-h society requires an increasing number of employees to work nightshifts and, as a result, millions of people worldwide work during the evening or night for a certain period of their life. Most epidemiological studies indicate that LAN is a key factor in shift workers to develop metabolic impairments (198), and the risk of MS increases in health-care personnel working night shifts (199). However, the establishment of a direct link between LAN affecting the circadian clock and metabolic disease in shiftworkers has been prevented by a lack of consistent, quantitative methods for measuring LAN supplying contradictory results [reviewed in Ref. (200)]. Moreover, nightworkers switch their temporal niche by a 180° shift of the activity/rest rhythm, imposing a circadian misalignment in the timing of energy metabolism for a diurnal mammal. The SCN clock tends to entrain to the LD cycle driving endocrine and autonomic outputs for diurnality, as for instance peaking insulin sensitivity at noon in subcutaneous adipose tissue (201). Night work forces the circadian system for repetitive arousals during the night, to sleep during the day, and to eat at abnormal circadian times. To simulate circadian misalignment due to shiftwork in laboratory conditions, imposing an activity/rest pattern different from 24 h during 7 days generates eating and sleeping ~ 12 h out of phase from habitual times (202). This misalignment systematically decreases leptin, increases glucose despite increased insulin, increases postprandial glucose, completely reverses the daily cortisol rhythm, increases blood pressure, and reduces sleep efficiency. Similar studies also showed decreased insulin sensitivity (without insulin increase) (203) and altered rhythm of energy expenditure (168). This forced desynchronization protocols showed how changing the feeding pattern and timing

of metabolic signals for only a week, leads to cardiometabolic alterations and a prediabetic state. In a 3-day study of 12-h simulated shiftwork, the misalignment between the endogenous circadian system and daily environmental/behavioral rhythms with nighttime feeding, affected glucose tolerance, by elevating postprandial glucose level. These changes in glucose metabolism are related to different insulin mechanisms: a decreased pancreatic β -cell function and decreased insulin sensitivity (204). Sleep deprivation and melatonin disruption are also observed in subjects chronically subjected to shiftwork (205), where sleeping less than 6 h daily was associated with weight gain and an increase in BMI (206).

Shiftwork exposure has been hypothesized to increase the risk of chronic diseases, including cancer, cardiovascular disease, MS, and diabetes (198). Several epidemiological studies have evaluated the association between shiftwork and MS. This syndrome is a cluster of risk factors including central obesity, elevated blood pressure, elevated triglycerides, lowered high-density lipoprotein cholesterol, and elevated fasting glucose, which are often seen simultaneously in an individual, and is a risk factor for cardiovascular diseases. **Table 2** summarizes information regarding the association between night shiftwork and the different parameters of this syndrome. In addition, these data indicate an association of shiftwork schedules with low concentrations of HDL cholesterol, higher diastolic and/or systolic arterial blood pressure, fasting glucose, insulin, and/or triglycerides. Some of these reports also show an increased risk factor of MS associated with a longer period of time working at night or in rotating schedules (207, 208). Moreover, these associations are stronger in females than in males (207, 209), and indeed it has recently been shown that the risk of obesity in shift workers was not related to these factors in males (210).

A dysregulation in the mechanism of hunger/satiety control and in energy expenditure may be related to the increase of BMI associated with night shift work. First, meal distribution during shiftwork is different. Shift workers tend to have smaller meals for breakfast and lunch but increase their snacking behavior. In the afternoon or nighttime, the frequency of snacking increases, with a tendency for a higher consumption of carbohydrates (199), which is indicative of obesity-related eating behaviors (213, 216). Second, a study including 14 adults in a 6-day simulated shiftwork protocol, showed decreased total daily energy expenditure in nightshift days compared with baseline, driven predominantly by a decrease during the sleep time (217). Third, there was an increase of fat utilization, together with a decrease of carbohydrate and protein, with similar levels of the hunger-stimulating hormone ghrelin and decreased levels of the satiety hormones leptin and peptide YY.

Other Protocols of Circadian/Metabolic Disruption

While light is the most potent zeitgeber, the availability of non-photic cues such as food and exercise, may alter the internal circadian clock independently. Instead of modifying the environmental cues, researchers force the timing of otherwise naturally entrained behaviors or physiological variables. Two simple

TABLE 2 | MS symptoms in people working at night or in rotating shift.

n	Population	Age (years)	Gender (F/M)	Country	Years of shiftwork	Schedule	Hours worked per shift/started at	Alteraciones	Reference
27,485	nd	30–50 years	F/M	Sweden	nd	Self-reported	nd	Obesity, high triglycerides, and low HDL cholesterol	Karlsson et al. (211)
437 DW, 246 SW	Factory employers	34–38 years	M	Argentina (European Ancestry)	nd	4 days, 3 rest, 2 nights, 3 rest, 4 nights, 3 rest, 2 days, 3 rest	12 h/06:00 h and 18:00 h	High waist-hip ratio, diastolic arterial blood pressure, fasting glucose and insulin, HOMA index, and triglycerides	Sookoian (212)
98 DW, 100 SW	Petrochemical plant employers	39–60 years	M	France	>10 years	1–2 days, 1–2 afternoon, 12 night, 3–4 rest	8h/05:00, 13:00, and 21:00 h for SW, 08:00 for DW	Rise triglycerides, free fatty acids, and gGTP and lower HDL cholesterol	Esquirol et al. (213)
1220 DW, 309 SW	Employers of public administrations, private companies and a bank	35–59 years	M	Belgian	>20 years	Two rotating shifts	nd	High body mass index (BMI), waist circumference, systolic and diastolic blood pressure, low HDL cholesterol	De Bacquer et al. (214)
336 DW, 402 SW	Nurses	37–40 years	F/M	nd	>1 year	4 nights per month	nd	High BMI. Predictors of MS: sedentariness and SW (4-year follow-up: 9 vs 1.8%)	Pietroiusti et al. (199)
125 DW, 165 eSW, 102 pSW	Workers of an electronic manufacturing company	25–31 years	F	Taiwanese	>5 years	6 days, 3 rest, 6 night, 3 rest	12 h/07:30 h and 19:30 h	Increased percentage of development of MS in pRSW (5 years follow-up). Obesity and elevated blood pressure in pRSW	Lin et al. (215)
26,382	Dongfeng Motor Corporation's employers	Retired workers (average 63.6 years)	F/M	Chinese	1–10, 11–19, or >20 years	2 shifts, 3 shifts or 4 shifts	12, 8, and 6 h, respectively	Long-term shift work associated with MS in females. High blood pressure, waist circumference and glucose levels	Guo et al. (207)
2,661 DW, 656 SW	nd	20–40 years	F/M	South Korean	nd	Self-reported	nd	Shift work was associated with MS in females	Yu et al. (209)
370 DW, 354 SW	Nurses and midwives	40–60 years	F	Poland	<10, 10–20, or >20 years	2–7, or >8 night per month	12 h/7 p.m.	Increased BMI, waist circumference and obesity in women reporting >8 night shifts per month	Pietroiusti et al. (199)

MS, metabolic syndrome; DW, day workers; NW, night workers; SW, rotating shift workers; eSW, ever rotating shiftwork; pSW, persistent SW.

behavioral interventions are to manipulate the timing of wake/sleep and to schedule feeding times. These behaviors represent both controlled outputs of the clock and feedback mechanisms or inputs to the system. Because of this, altering the phase of such events in relation to the light cycle (like when humans work night shifts) can have a profound effect on biological rhythms and hence in metabolism (see **Table 2**).

Sleep deprivation in mice has profound consequences on liver activity from the gene transcription level to metabolism of fatty acids and other metabolites and also alters feeding patterns (218, 219). Instead of simply preventing sleep, researchers have developed a “forced work” protocol to keep rats awake by forcing them to remain active by placing them in constantly rotating running wheels. Under this protocol, rats develop obesity, show altered feeding behavior, and glucose and triglycerides levels, as well as desynchronization of clock-genes expression in the liver (166, 167).

Timing of food intake affects the rhythms of clock-gene expression in the liver (37, 39), the dorsomedial hypothalamus and the paraventricular nuclei, and the pituitary gland tissues, but not in the SCN (220). In consequence, feeding during the “wrong time” (e.g., the resting light phase in nocturnal animals) can internally desynchronize the circadian system, leading to disease. Studies have shown that forcing mice or rats to feed during the light phase leads to increased body weight and food consumption, variations in hormonal and metabolite levels in plasma, fat accumulation, alterations in the liver, and MS (169–171, 220, 221).

Strategies to Overcome Metabolic Effects of Circadian Disruption

The unconstrained capacity to manipulate housing lighting conditions in the laboratory might be considered a prerequisite to test potential therapeutic tools. For that reason, researchers have sought model animals to develop strategies that may either overcome or alleviate the symptoms associated with situations of disruption of the circadian-metabolic system.

Behavioral interventions appear as easy alternatives in this sense and represent translatable potential tools for further research in human populations. The main objective of such protocols is either to reinforce entrainment to the LD or other experimental cycle or to provide a different entraining cue that may reorganize rhythms in a way to avoid possible alterations. Scheduling feeding regimes can be as deleterious when “wrongly” timed as can be beneficial under certain challenging conditions. Many studies have shown that TRF can be beneficial, for example, to counter the effects of obesity-inducing diets (222, 223). But it also can help to combat the consequences of protocols that disrupt the biological rhythms and metabolism.

Time-restricted feeding to a favorable circadian timing, i.e., when caloric intake can manage to balance anabolic and catabolic processes with energy expenditure, represents a therapeutic (and experimental) tool preventing metabolic alterations leading to weight homeostasis alterations (119). Some of the reported benefits in rodents include improved glucose tolerance, reduced triglyceride, reduced cholesterol, reduced

systemic inflammation, and improved endurance. Forced-desynchronized mice under CJL can keep control weight values when fed only during the dark phases, with no changes in food intake (118). Rats that gain weight under the previously described “forced work” protocol during the rest phase can be phenotypically rescued by preventing feeding during that period and allowing it during the dark phase (166). TRF can be such a strong key that is able to reinstate the *Rev-erba* and *Bmal1* (but not *Per1-2*) gene expression rhythms at the SCN in behaviorally arrhythmic mice under LL (141).

Wehrens et al. measured the effect of a 5-h meal delay on the human circadian system and observed that late meals delay rhythms of plasma glucose and adipose PER2 clock-gene expression, suggesting that meal timing may help to reset the circadian system in cases of shift work (224). A 16-year longitudinal study reported a 27% higher risk of coronary heart disease (measured by BMI, hypertension, hypercholesterolemia, and diabetes) in men who skipped breakfast and a 55% higher risk in men who ate late at night, in comparison with men who eat normally. However, no association was observed between eating frequency (times/day) and risk of coronary heart disease (225). In addition, a recent study using a smartphone app to monitor eating time in healthy adults revealed a daily eating pattern highly variable from day to day, indicating that more than 50% of adults spread their daily caloric intake over 15 h or longer. Interestingly, this report showed that reducing the daily eating duration to 10–11 h for 16 weeks, without decreasing calories or change nutrition quality, induced weight loss and improved sleep (226). This observation, together with previously mentioned data recorded in animal models, suggests an important role of eating patterns in metabolic diseases.

Running-wheel activity has been shown to represent a strong feedback mechanism to the circadian system, and as such represents a potential therapeutic tool for chronodisruption models. Voluntary wheel running enlarges the boundaries of behavioral entrainment to T-cycles (227) and increases the amplitude of SCN electrical activity rhythm (228). It was found that wheel access in mice modulates CBT and heart rate rhythm waveforms (i.e., increase these variables during or after energy demand for exercise) and couples the PER2:luc phase of adrenal and liver oscillators driving cardiometabolic output (229). In this direction, we demonstrated that the availability of a running wheel allowed for correct entrainment and prevented the elevated body weight gain observed in mice under the desynchronizing CJL schedule. We also found that social contact, achieved by housing mice in groups, is a successful intervention to alleviate metabolic symptoms in this model (118).

Of course, pharmacological tools have also been tested. One approach is to try to replace or substitute the action of disrupted hormonal function. For example, melatonin administration during the subjective night prevents MS-like symptoms in rats under LL (147). Another study showed that metabolic alterations derived from CJL protocols were prevented by treatment with estrogens (155). Yet, another type of pharmacological approach that requires further research is the application of drugs with the ability to induce or reinforce entrainment to environmental cycles and its changes.

DISCUSSION

Potential Pathways Linking Photic Environmental Challenges to Metabolic Disease

Protocols with photic alterations in nocturnal rodents (such as LAN and LL) provide evidences to approximate metabolic alterations due to circadian disruptions elicited by nocturnal light pollution in humans. Receiving LAN appears to be a common disrupting factor for both nocturnal and diurnals. The main limitations for these approaches, however, are that temporal niche determines a 180° difference between nocturnal rodents and humans, also regarding the regulation of metabolic variables and energy expenditure for behavioral activity. In addition, nocturnal rodents are more sensitive to nocturnal light than humans. Behavioral and feeding pattern misalignment with lighting schedule seems to be a key factor for most alterations, as discussed below.

Endocrine pathways directly modulated by light can play a role in photic-related metabolic alterations. Melatonin is released by the pineal gland and its nocturnal production is sensitive to light exposure during the circadian night (230). Its roles in metabolism go from participating in insulin production and secretion, synchronizing feeding with the organism's optimal metabolic state [reviewed in Ref. (108)], and regulation of leptin rhythm (95) photoperiodic resistance (see above). Also, melatonin rhythm disruption correlates with that of adipokines and obesity, and its exogenous administration reverse this phenotype (84). Because of this, it is tempting to speculate that disruption of the melatonin pathway under challenging light conditions (see **Table 1**) may underlie metabolic dysfunction and obesity. Indeed, LL and LAN protocols could be integrated by the SCN and melatonin signal as a "lengthened" photoperiod, thus encoding a summer-like metabolic state, increasing food intake and adipose deposits (see above). However, there is evidence that animals lacking melatonin still suffer LAN-induced metabolic alterations and loss of weight homeostasis (115, 144), and the link of melatonin with leptin in human obesity is still inconsistent (84). Thus, photic melatonin disruption *per se* does not appear to be a factor linked to obesity neither in nocturnal rodents nor in humans.

Glucocorticoid hormones are key to the regulation of metabolism and are also tightly linked to the circadian system (231), and as such, can also be considered as an underlying cause for metabolic disease in conditions of biological rhythms disruption. Alterations in the 24-h rhythm of glucocorticoid levels may promote circadian misalignment and its adverse health consequences. Multiple studies have shown that the 24-h profile of cortisol concentrations does not adapt rapidly to acute shifts in light–dark, activity–rest, and/or feeding cycles, as occurs in jet lag and shift work rotations, although its amplitude may be reduced under some conditions (232). But the revision of the literature on animal models (67) and human subjects summarized in the previous sections shows that under the different disrupting light conditions, glucocorticoids are impaired, increased, or not affected at all. A study in humans has found that light effects on cortisol are strongly dependent on light intensity, which can

explain the seemingly contradictory reports in both humans and laboratory animals (233).

Figure 2 depicts a scheme of the main circadian changes found using protocols of photic desynchronization in nocturnal rodent models (mice and rats), to help the construction of a generalized framework. It seems that photic hormonal pathways alterations *per se* cannot be considered the sole triggers of metabolic disturbances under disrupting lighting conditions. Photic inputs to the SCN can directly and indirectly affect physiological responses given the presence of multiple pathways regulating peripheral oscillators (see above). Importantly, peripheral synchronization for metabolic organs such as the liver is achieved mainly by SCN entrainment of the feeding/fasting pattern, and derived entraining signals can act indirectly of photic effects (234) through blood-borne nutrients assimilated and/or metabolites (3). In this sense, a desynchronized feeding/fasting pattern with temporal niche driven by LD cycles can be considered as a main factor for most metabolic alterations.

Desynchronization of Feeding Patterns

We will now focus on behavioral effects of light disruption that have also metabolic implications: meal time shift, activity levels, and sleep disruption. To distribute feed bouts or meals during the rest phase, tending to the abolishment of the feeding/fasting pattern, results a common feature of most the aforementioned lighting protocols in rodents (dim LAN, LL, or CJL) (see **Figure 2**). Indeed, most metabolic disruptions are reversed by scheduled feeding (see Strategies to Overcome Metabolic Effects of Circadian Disruption), restoring normal weight homeostasis under CJL, even while gross locomotor activity remains desynchronized with the LD cycle (118). The same can be said of decreased or disrupted locomotor activity levels and rhythms, or even the sleep/wake pattern (235, 236).

Postprandial glycemia is under circadian control (71). In humans, there is a decreased glucose tolerance during the evening and night as result of a reduced insulin secretion, as well as peripheral and hepatic insulin resistance. This pattern is independent of both the sleep/wake and feeding/fasting rhythms (204, 237) but depends on glucocorticoid rhythm (238). Moreover, increased caloric intake when the body is not able to manage it (i.e., to storage, mobilize, or fuel) is a key factor to develop insulin resistance, MS, and obesity (239, 240).

Circadian misalignment due to behavioral and/or photic desynchronization (e.g., shiftwork or CJL) alters endocrine and autonomic pathways set to manage metabolic fuels needed for energy demand (i.e., glucose, fatty acids, or ketone bodies under chronic starvation). **Figure 3** schematizes the main disruptions that can be generalized in nocturnal rodents and nightworkers. First, the daily amount of food intake seems to be the same among day and shiftworkers. Wrongly timed circadian feeding leads to postprandial glucose increase, first due to misaligned circadian glucose sensitivity at the pancreas, both in nocturnal rodents (6) and humans (202, 204). Importantly, eating at night during simulated shiftwork reduced total daily energy expenditure during nightshift schedules (217). Thus, impairments in glucose uptake (i.e., a prediabetic state) can be chronically

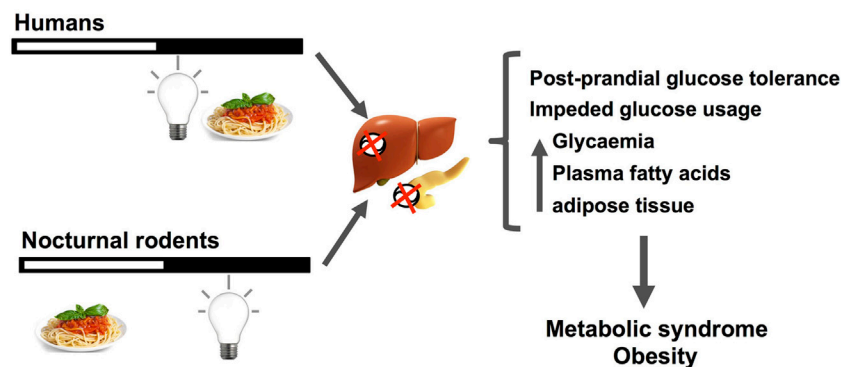


FIGURE 3 | The figure schematizes how nocturnal light exposure, together with a misaligned feeding pattern with respect to the regular activity/rest rhythm, generate metabolic disruptions in nocturnal rodents and human subjects. Humans under nightwork schedules tend to invert by 180° their activity/rest rhythm, increasing nocturnal feeding and light exposure during the night. When receiving light at night, nocturnal rodents alter their feeding pattern increasing episodes throughout the day. These changes desynchronize pancreatic and liver circadian functions regulating nutrient balance and caloric usage/storage, mainly by reducing postprandial glucose tolerance, and decreasing glucose usage. As main outcomes of these alterations, increased basal glycemia, free fatty acids, and adipose tissue are generally observed. When chronically established, this misalignment between the circadian clock activity, its photic inputs, and behavioral/physiological/metabolic outputs can lead to metabolic syndrome and obesity.

established due to changing the set point for glycemia, leading to further insulin insensitivity, and hyperglycemia. It is conceivable that, starting from reduced nighttime postprandial glucose tolerance, chronic dysregulation in the uptake and/or usage of glucose can lead to further increased usage of fatty acids from triglycerides stores in the liver and adipose tissue. This misbalance between carbohydrates/triglycerides usage can lead to dyslipidemia and hypertriglyceridemia (i.e., increased free fatty acid levels) found in most animal and human studies described above and increased caloric storage. In addition, these alterations in caloric intake and storage, were also attributed to negative energy balance imposed by sleep debt (217, 241). Thus, eating, and being awake at the wrong time, i.e., when the circadian clock promotes sleep, is a risk factor for MS, weight gain, and obesity.

CONCLUSION

We have covered a vast amount of evidence from laboratory rodent models and human studies of the diverse effects of lighting environments challenging biological rhythmicity on metabolism. While there are several features and alterations which repeatedly appear under the environmental conditions studied, no single pathway capable of explaining the disrupted metabolic can be clearly identified. We conclude that no particular alteration can be considered as the unique determinant pathway for metabolic disease caused by abnormal lighting protocols. Our hypothesis considers an accumulation of different disturbances at various levels, adding up to a global metabolic disruption, and further

leading to disease. The combination and the level of specific alterations will depend on the features of circadian disruption, which is tied to the specific protocol, be it LL, LAN, or CJL. Circadian disruption, including photic effects on the circadian physiology, forced temporal niche shifting of behavioral and feeding patterns (i.e., by LAN, or shiftworking) could therefore represent the fundamental origin of metabolic alterations under abnormal lighting conditions. Although a complex scenario, to better understand how a pathological metabolic state occurs, we must first determine which pathways drive and integrate the interactions between circadian and metabolic homeostasis.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

SP, LC, PM, NP, DG, and JC had made substantial contributions for this work, contributing with the reviewed data and its interpretation in all the sections of the manuscript, drafting the work and revising it critically, approving the final version, and agreeing for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work were appropriately investigated and resolved.

FUNDING

The authors are funded by the Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), and from grants from de Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (MINCyT, PICT 2099-2014) and from the Universidad Nacional de Quilmes.

REFERENCES

- Challet E. Keeping circadian time with hormones. *Diabetes Obes Metab* (2015) 17(Suppl 1):76–83. doi:10.1111/dom.12516
- Buijs FN, Leon-Mercado L, Guzman-Ruiz M, Guerrero-Vargas NN, Romo-Nava F, Buijs RM. The circadian system: a regulatory feedback network of periphery and brain. *Physiology (Bethesda)* (2016) 31(3):170–81. doi:10.1152/physiol.00037.2015
- Panda S. Circadian physiology of metabolism. *Science* (2016) 354(6315):1008–15. doi:10.1126/science.aah4967
- Golombek DA, Rosenstein RE. Physiology of circadian entrainment. *Physiol Rev* (2010) 90(3):1063–102. doi:10.1152/physrev.00009.2009

5. Kalsbeek A, Buijs RM. Output pathways of the mammalian suprachiasmatic nucleus: coding circadian time by transmitter selection and specific targeting. *Cell Tissue Res* (2002) 309(1):109–18. doi:10.1007/s00441-002-0577-0
6. Kumar Jha P, Challet E, Kalsbeek A. Circadian rhythms in glucose and lipid metabolism in nocturnal and diurnal mammals. *Mol Cell Endocrinol* (2015) 418(Pt 1):74–88. doi:10.1016/j.mce.2015.01.024
7. Moore RY. Organization and function of a central nervous system circadian oscillator: the suprachiasmatic hypothalamic nucleus. *Fed Proc* (1983) 42(11):2783–9.
8. Partch CL, Green CB, Takahashi JS. Molecular architecture of the mammalian circadian clock. *Trends Cell Biol* (2014) 24(2):90–9. doi:10.1016/j.tcb.2013.07.002
9. Preitner N, Damiola F, Lopez-Molina L, Zakany J, Duboule D, Albrecht U, et al. The orphan nuclear receptor REV-ERB α controls circadian transcription within the positive limb of the mammalian circadian oscillator. *Cell* (2002) 110(2):251–60. doi:10.1016/S0092-8674(02)00825-5
10. Yan L, Takekida S, Shigeyoshi Y, Okamura H. Per1 and Per2 gene expression in the rat suprachiasmatic nucleus: circadian profile and the compartment-specific response to light. *Neuroscience* (1999) 94(1):141–50. doi:10.1016/S0306-4522(99)00223-7
11. Hamada T, LeSauter J, Venuti JM, Silver R. Expression of period genes: rhythmic and nonrhythmic compartments of the suprachiasmatic nucleus pacemaker. *J Neurosci* (2001) 21(19):7742–50.
12. Yan L, Okamura H. Gradients in the circadian expression of Per1 and Per2 genes in the rat suprachiasmatic nucleus. *Eur J Neurosci* (2002) 15(7):1153–62. doi:10.1046/j.1460-9568.2002.01955.x
13. Yan L, Silver R. Resetting the brain clock: time course and localization of mPER1 and mPER2 protein expression in suprachiasmatic nuclei during phase shifts. *Eur J Neurosci* (2004) 19(4):1105–9. doi:10.1111/j.1460-9568.2004.03189.x
14. Maywood ES, Reddy AB, Wong GK, O'Neill JS, O'Brien JA, McMahon DG, et al. Synchronization and maintenance of timekeeping in suprachiasmatic circadian clock cells by neuropeptidergic signaling. *Curr Biol* (2006) 16(6):599–605. doi:10.1016/j.cub.2006.02.023
15. Maywood ES, O'Neill JS, Reddy AB, Chesham JE, Prosser HM, Kyriacou CP, et al. Genetic and molecular analysis of the central and peripheral circadian clockwork of mice. *Cold Spring Harb Symp Quant Biol* (2007) 72:85–94. doi:10.1101/sqb.2007.72.005
16. Liu C, Reppert SM. GABA synchronizes clock cells within the suprachiasmatic circadian clock. *Neuron* (2000) 25(1):123–8. doi:10.1016/S0896-6273(00)80876-4
17. Michel S, Colwell CS. Cellular communication and coupling within the suprachiasmatic nucleus. *Chronobiol Int* (2001) 18(4):579–600. doi:10.1081/CBI-100106074
18. Plano SA, Agostino PV, Golombek DA. Extracellular nitric oxide signaling in the hamster biological clock. *FEBS Lett* (2007) 581(28):5500–4. doi:10.1016/j.febslet.2007.10.058
19. Vosko AM, Schroeder A, Loh DH, Colwell CS. Vasoactive intestinal peptide and the mammalian circadian system. *Gen Comp Endocrinol* (2007) 152(2–3):165–75. doi:10.1016/j.ygcen.2007.04.018
20. Plano SA, Golombek DA, Chiesa JJ. Circadian entrainment to light-dark cycles involves extracellular nitric oxide communication within the suprachiasmatic nuclei. *Eur J Neurosci* (2010) 31(5):876–82. doi:10.1111/j.1460-9568.2010.07120.x
21. de la Iglesia HO, Meyer J, Schwartz WJ. Lateralization of circadian pacemaker output: activation of left- and right-sided luteinizing hormone-releasing hormone neurons involves a neural rather than a humoral pathway. *J Neurosci* (2003) 23(19):7412–4.
22. Silver R, LeSauter J, Tresco PA, Lehman MN. A diffusible coupling signal from the transplanted suprachiasmatic nucleus controlling circadian locomotor rhythms. *Nature* (1996) 382(6594):810–3. doi:10.1038/382810a0
23. Colwell CS. Linking neural activity and molecular oscillations in the SCN. *Nat Rev Neurosci* (2011) 12(10):553–69. doi:10.1038/nrn3086
24. Buijs RM, Kalsbeek A. Hypothalamic integration of central and peripheral clocks. *Nat Rev Neurosci* (2001) 2(7):521–6. doi:10.1038/35081582
25. Hastings MH. m(6)A mRNA methylation: a new circadian pacesetter. *Cell* (2013) 155(4):740–1. doi:10.1016/j.cell.2013.10.028
26. Buijs RM, Escobar C, Swaab DF. The circadian system and the balance of the autonomic nervous system. *Handb Clin Neurol* (2013) 117:173–91. doi:10.1016/B978-0-444-53491-0.00015-8
27. Brown SA, Zumbrunn G, Fleury-Olela F, Preitner N, Schibler U. Rhythms of mammalian body temperature can sustain peripheral circadian clocks. *Curr Biol* (2002) 12(18):1574–83. doi:10.1016/S0960-9822(02)01145-4
28. Pezuk P, Mohawk JA, Wang LA, Menaker M. Glucocorticoids as entraining signals for peripheral circadian oscillators. *Endocrinology* (2012) 153(10):4775–83. doi:10.1210/en.2012-1486
29. Kiessling S, Eichele G, Oster H. Adrenal glucocorticoids have a key role in circadian resynchronization in a mouse model of jet lag. *J Clin Invest* (2010) 120(7):2600–9. doi:10.1172/JCI11192
30. Cailotto C, La Fleur SE, Van Heijningen C, Wortel J, Kalsbeek A, Feenstra M, et al. The suprachiasmatic nucleus controls the daily variation of plasma glucose via the autonomic output to the liver: are the clock genes involved? *Eur J Neurosci* (2005) 22(10):2531–40. doi:10.1111/j.1460-9568.2005.04439.x
31. la Fleur SE, Kalsbeek A, Wortel J, Buijs RM. A suprachiasmatic nucleus generated rhythm in basal glucose concentrations. *J Neuroendocrinol* (1999) 11(8):643–52. doi:10.1046/j.1365-2826.1999.00373.x
32. la Fleur SE, Kalsbeek A, Wortel J, Fekkes ML, Buijs RM. A daily rhythm in glucose tolerance: a role for the suprachiasmatic nucleus. *Diabetes* (2001) 50(6):1237–43. doi:10.2337/diabetes.50.6.1237
33. Kalsbeek A, Garidou ML, Palm IF, Van Der Vliet J, Simonneaux V, Pevet P, et al. Melatonin sees the light: blocking GABA-ergic transmission in the paraventricular nucleus induces daytime secretion of melatonin. *Eur J Neurosci* (2000) 12(9):3146–54. doi:10.1046/j.1460-9568.2000.00202.x
34. Perreau-Lenz S, Kalsbeek A, Pevet P, Buijs RM. Glutamatergic clock output stimulates melatonin synthesis at night. *Eur J Neurosci* (2004) 19(2):318–24. doi:10.1111/j.0953-816X.2003.03132.x
35. Stokkan KA, Yamazaki S, Tei H, Sakaki Y, Menaker M. Entrainment of the circadian clock in the liver by feeding. *Science* (2001) 291(5503):490–3. doi:10.1126/science.291.5503.490
36. Schibler U. Circadian rhythms. Liver regeneration clocks on. *Science* (2003) 302(5643):234–5. doi:10.1126/science.1090810
37. Damiola F, Le Minh N, Preitner N, Kornmann B, Fleury-Olela F, Schibler U. Restricted feeding uncouples circadian oscillators in peripheral tissues from the central pacemaker in the suprachiasmatic nucleus. *Genes Dev* (2000) 14(23):2950–61. doi:10.1101/gad.183500
38. Kornmann B, Schaad O, Bujard H, Takahashi JS, Schibler U. System-driven and oscillator-dependent circadian transcription in mice with a conditionally active liver clock. *PLoS Biol* (2007) 5(2):e34. doi:10.1371/journal.pbio.0050034
39. Vollmers C, Gill S, DiTacchio L, Pulivarthy SR, Le HD, Panda S. Time of feeding and the intrinsic circadian clock drive rhythms in hepatic gene expression. *Proc Natl Acad Sci U S A* (2009) 106(50):21453–8. doi:10.1073/pnas.0909591106
40. Aguilar-Arnal L, Sassone-Corsi P. The circadian epigenome: how metabolism talks to chromatin remodeling. *Curr Opin Cell Biol* (2013) 25(2):170–6. doi:10.1016/j.ccb.2013.01.003
41. Ishida A, Mutoh T, Ueyama T, Bando H, Masubuchi S, Nakahara D, et al. Light activates the adrenal gland: timing of gene expression and glucocorticoid release. *Cell Metab* (2005) 2(5):297–307. doi:10.1016/j.cmet.2005.09.009
42. Kiessling S, Sollars PJ, Pickard GE. Light stimulates the mouse adrenal through a retinohypothalamic pathway independent of an effect on the clock in the suprachiasmatic nucleus. *PLoS One* (2014) 9(3):e92959. doi:10.1371/journal.pone.0092959
43. Su Y, Foppen E, Zhang Z, Fliers E, Kalsbeek A. Effects of 6-meals-a-day feeding and 6-meals-a-day feeding combined with adrenalectomy on daily gene expression rhythms in rat epididymal white adipose tissue. *Genes Cells* (2016) 21(1):6–24. doi:10.1111/gtc.12315
44. Bernardis LL, Bellinger LL. The dorsomedial hypothalamic nucleus revisited: 1998 update. *Proc Soc Exp Biol Med* (1998) 218(4):284–306. doi:10.3181/00379727-218-44296
45. Sahu A. Minireview: a hypothalamic role in energy balance with special emphasis on leptin. *Endocrinology* (2004) 145(6):2613–20. doi:10.1210/en.2004-0032
46. Kalsbeek A, Palm IF, La Fleur SE, Scheer FA, Perreau-Lenz S, Ruiter M, et al. SCN outputs and the hypothalamic balance of life. *J Biol Rhythms* (2006) 21(6):458–69. doi:10.1177/0748730406293854
47. Sellix MT, Egli M, Poletini MO, McKee DT, Bosworth MD, Fitch CA, et al. Anatomical and functional characterization of clock gene expression in neuroendocrine dopaminergic neurons. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* (2006) 290(5):R1309–23. doi:10.1152/ajpregu.00555.2005

48. Duncan MJ. Circannual prolactin rhythms: calendar-like timer revealed in the pituitary gland. *Trends Endocrinol Metab* (2007) 18(7):259–60. doi:10.1016/j.tem.2007.07.001
49. Guilding C, Hughes AT, Brown TM, Namvar S, Piggins HD. A riot of rhythms: neuronal and glial circadian oscillators in the mediobasal hypothalamus. *Mol Brain* (2009) 2:28. doi:10.1186/1756-6606-2-28
50. Gooley JJ, Schomer A, Saper CB. The dorsomedial hypothalamic nucleus is critical for the expression of food-entrainable circadian rhythms. *Nat Neurosci* (2006) 9(3):398–407. doi:10.1038/nn1651
51. Landry GJ, Simon MM, Webb IC, Mistlberger RE. Persistence of a behavioral food-anticipatory circadian rhythm following dorsomedial hypothalamic ablation in rats. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* (2006) 290(6):R1527–34. doi:10.1152/ajpregu.00874.2005
52. Landry GJ, Yamakawa GR, Webb IC, Mear RJ, Mistlberger RE. The dorsomedial hypothalamic nucleus is not necessary for the expression of circadian food-anticipatory activity in rats. *J Biol Rhythms* (2007) 22(6):467–78. doi:10.1177/0748730407307804
53. Moriya T, Aida R, Kudo T, Akiyama M, Doi M, Hayasaka N, et al. The dorsomedial hypothalamic nucleus is not necessary for food-anticipatory circadian rhythms of behavior, temperature or clock gene expression in mice. *Eur J Neurosci* (2009) 29(7):1447–60. doi:10.1111/j.1460-9568.2009.06697.x
54. Morton GJ, Cummings DE, Baskin DG, Barsh GS, Schwartz MW. Central nervous system control of food intake and body weight. *Nature* (2006) 443(7109):289–95. doi:10.1038/nature05026
55. Akhtar RA, Reddy AB, Maywood ES, Clayton JD, King VM, Smith AG, et al. Circadian cycling of the mouse liver transcriptome, as revealed by cDNA microarray, is driven by the suprachiasmatic nucleus. *Curr Biol* (2002) 12(7):540–50. doi:10.1016/S0960-9822(02)00759-5
56. Panda S, Antoch MP, Miller BH, Su AI, Schook AB, Straume M, et al. Coordinated transcription of key pathways in the mouse by the circadian clock. *Cell* (2002) 109(3):307–20. doi:10.1016/S0092-8674(02)00722-5
57. Storch KF, Lipan O, Leykin I, Viswanathan N, Davis FC, Wong WH, et al. Extensive and divergent circadian gene expression in liver and heart. *Nature* (2002) 417(6884):78–83. doi:10.1038/nature744
58. Zhang R, Lahens NF, Ballance HI, Hughes ME, Hogenesch JB. A circadian gene expression atlas in mammals: implications for biology and medicine. *Proc Natl Acad Sci U S A* (2014) 111(45):16219–24. doi:10.1073/pnas.1408886111
59. Adamovich Y, Roussio-Noori L, Zwihaft Z, Neufeld-Cohen A, Golik M, Kraut-Cohen J, et al. Circadian clocks and feeding time regulate the oscillations and levels of hepatic triglycerides. *Cell Metab* (2014) 19(2):319–30. doi:10.1016/j.cmet.2013.12.016
60. Lamia KA, Storch KF, Weitz CJ. Physiological significance of a peripheral tissue circadian clock. *Proc Natl Acad Sci U S A* (2008) 105(39):15172–7. doi:10.1073/pnas.0806717105
61. Boden G, Ruiz J, Urbain JL, Chen X. Evidence for a circadian rhythm of insulin secretion. *Am J Physiol* (1996) 271(2 Pt 1):E246–52.
62. Ruiter M, La Fleur SE, van Heijningen C, van der Vliet J, Kalsbeek A, Buijs RM. The daily rhythm in plasma glucagon concentrations in the rat is modulated by the biological clock and by feeding behavior. *Diabetes* (2003) 52(7):1709–15. doi:10.2337/diabetes.52.7.1709
63. Bolli G, De Feo P, Perriello G, De Cosmo S, Compagnucci P, Santeusano F, et al. Mechanisms of glucagon secretion during insulin-induced hypoglycemia in man. Role of the beta cell and arterial hyperinsulinemia. *J Clin Invest* (1984) 73(4):917–22. doi:10.1172/JCI11315
64. Zhang EE, Liu Y, Dentin R, Pongsawakul PY, Liu AC, Hirota T, et al. Cryptochrome mediates circadian regulation of cAMP signaling and hepatic gluconeogenesis. *Nat Med* (2010) 16(10):1152–6. doi:10.1038/nm.2214
65. Reinke H, Asher G. Circadian clock control of liver metabolic functions. *Gastroenterology* (2016) 150(3):574–80. doi:10.1053/j.gastro.2015.11.043
66. Oishi K, Yasumoto Y, Higo-Yamamoto S, Yamamoto S, Ohkura N. Feeding cycle-dependent circulating insulin fluctuation is not a dominant Zeitgeber for mouse peripheral clocks except in the liver: differences between endogenous and exogenous insulin effects. *Biochem Biophys Res Commun* (2017) 483(1):165–70. doi:10.1016/j.bbrc.2016.12.173
67. Fonken LK, Nelson RJ. The effects of light at night on circadian clocks and metabolism. *Endocr Rev* (2014) 35(4):648–70. doi:10.1210/er.2013-1051
68. Hut RA, Kronfeld-Schor N, van der Vinne V, de la Iglesia H. In search of a temporal niche: environmental factors. *Prog Brain Res* (2012) 199:281–304. doi:10.1016/B978-0-444-59427-3.00017-4
69. Mrosovsky N, Hattar S. Diurnal mice (*Mus musculus*) and other examples of temporal niche switching. *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol* (2005) 191(11):1011–24. doi:10.1007/s00359-005-0017-1
70. Challet E. Minireview: entrainment of the suprachiasmatic clockwork in diurnal and nocturnal mammals. *Endocrinology* (2007) 148(12):5648–55. doi:10.1210/en.2007-0804
71. Kalsbeek A, Foppen E, Schallij I, Van Heijningen C, van der Vliet J, Fliers E, et al. Circadian control of the daily plasma glucose rhythm: an interplay of GABA and glutamate. *PLoS One* (2008) 3(9):e3194. doi:10.1371/journal.pone.0003194
72. Shostak A, Husse J, Oster H. Circadian regulation of adipose function. *Adipocyte* (2013) 2(4):201–6. doi:10.4161/adip.26007
73. Daan S, Spoelstra K, Albrecht U, Schmutz I, Daan M, Daan B, et al. Lab mice in the field: unorthodox daily activity and effects of a dysfunctional circadian clock allele. *J Biol Rhythms* (2011) 26(2):118–29. doi:10.1177/0748730410397645
74. Sans-Fuentes MA, Lopez-Fuster MJ, Ventura J, Diez-Noguera A, Cambras T. Effect of Robertsonian translocations on the motor activity rhythm in the house mouse. *Behav Genet* (2005) 35(5):603–13. doi:10.1007/s10519-005-5375-5
75. Redlin U, Mrosovsky N. Nocturnal activity in a diurnal rodent (*Arvicanthis niloticus*): the importance of masking. *J Biol Rhythms* (2004) 19(1):58–67. doi:10.1177/0748730403260371
76. van der Veen DR, Minh NL, Gos P, Arneric M, Gerkema MP, Schibler U. Impact of behavior on central and peripheral circadian clocks in the common vole *Microtus arvalis*, a mammal with ultradian rhythms. *Proc Natl Acad Sci U S A* (2006) 103(9):3393–8. doi:10.1073/pnas.0507825103
77. van der Vinne V, Riede SJ, Gorter JA, Eijer WG, Sellix MT, Menaker M, et al. Cold and hunger induce diurnality in a nocturnal mammal. *Proc Natl Acad Sci U S A* (2014) 111(42):15256–60. doi:10.1073/pnas.1413135111
78. van der Vinne V, Gorter JA, Riede SJ, Hut RA. Diurnality as an energy-saving strategy: energetic consequences of temporal niche switching in small mammals. *J Exp Biol* (2015) 218(Pt 16):2585–93. doi:10.1242/jeb.119354
79. Ramkisoensing A, Meijer JH. Synchronization of biological clock neurons by light and peripheral feedback systems promotes circadian rhythms and health. *Front Neurol* (2015) 6:128. doi:10.3389/fneur.2015.00128
80. Moore RY. Neural control of the pineal gland. *Behav Brain Res* (1996) 73(1–2):125–30. doi:10.1016/0166-4328(96)00083-6
81. Bartness TJ. Dual innervation of white adipose tissue: some evidence for parasympathetic nervous system involvement. *J Clin Invest* (2002) 110(9):1235–7. doi:10.1172/JCI17047
82. Ruf T, Geiser F. Daily torpor and hibernation in birds and mammals. *Biol Rev Camb Philos Soc* (2015) 90(3):891–926. doi:10.1111/brv.12137
83. Dark J. Annual lipid cycles in hibernators: integration of physiology and behavior. *Annu Rev Nutr* (2005) 25:469–97. doi:10.1146/annurev.nutr.25.050304.092514
84. Szewczyk-Golec K, Wozniak A, Reiter RJ. Inter-relationships of the chronobiotic, melatonin, with leptin and adiponectin: implications for obesity. *J Pineal Res* (2015) 59(3):277–91. doi:10.1111/jppi.12257
85. Ahima RS, Flier JS. Adipose tissue as an endocrine organ. *Trends Endocrinol Metab* (2000) 11(8):327–32. doi:10.1016/S1043-2760(00)00301-5
86. Rousseau K, Atcha Z, Loudon AS. Leptin and seasonal mammals. *J Neuroendocrinol* (2003) 15(4):409–14. doi:10.1046/j.1365-2826.2003.01007.x
87. Reddy AB, Cronin AS, Ford H, Ebling FJ. Seasonal regulation of food intake and body weight in the male Siberian hamster: studies of hypothalamic orexin (hypocretin), neuropeptide Y (NPY) and pro-opiomelanocortin (POMC). *Eur J Neurosci* (1999) 11(9):3255–64. doi:10.1046/j.1460-9568.1999.00746.x
88. Parker JA, Bloom SR. Hypothalamic neuropeptides and the regulation of appetite. *Neuropharmacology* (2012) 63(1):18–30. doi:10.1016/j.neuropharm.2012.02.004
89. Ebling FJ. Hypothalamic control of seasonal changes in food intake and body weight. *Front Neuroendocrinol* (2015) 37:97–107. doi:10.1016/j.yfrne.2014.10.003
90. Florant GL, Healy JE. The regulation of food intake in mammalian hibernators: a review. *J Comp Physiol B* (2012) 182(4):451–67. doi:10.1007/s00360-011-0630-y
91. Rigano KS, Gehring JL, Evans Hutzenbiller BD, Chen AV, Nelson OL, Vella CA, et al. Life in the fat lane: seasonal regulation of insulin sensitivity, food intake, and adipose biology in brown bears. *J Comp Physiol B* (2017) 187(4):649–76. doi:10.1007/s00360-016-1050-9

92. Gardi J, Nelson OL, Robbins CT, Szentirmai E, Kapas L, Krueger JM. Energy homeostasis regulatory peptides in hibernating grizzly bears. *Gen Comp Endocrinol* (2011) 172(1):181–3. doi:10.1016/j.ygcen.2010.12.015
93. Lewis JE, Ebling FJ. Tanycytes as regulators of seasonal cycles in neuroendocrine function. *Front Neurol* (2017) 8:79. doi:10.3389/fneur.2017.00079
94. Ebling FJ, Barrett P. The regulation of seasonal changes in food intake and body weight. *J Neuroendocrinol* (2008) 20(6):827–33. doi:10.1111/j.1365-2826.2008.01721.x
95. Chakir I, Dumont S, Pevet P, Ouarour A, Challet E, Vuille P. Pineal melatonin is a circadian time-giver for leptin rhythm in Syrian hamsters. *Front Neurosci* (2015) 9:190. doi:10.3389/fnins.2015.00190
96. Diaz B, Blazquez E. Effect of pinealectomy on plasma glucose, insulin and glucagon levels in the rat. *Horm Metab Res* (1986) 18(4):225–9. doi:10.1055/s-2007-1012279
97. Mellado C, Rodriguez V, de Diego JG, Alvarez E, Blazquez E. Effect of pinealectomy and of diabetes on liver insulin and glucagon receptor concentrations in the rat. *J Pineal Res* (1989) 6(4):295–306. doi:10.1111/j.1600-079X.1989.tb00425.x
98. Rodriguez V, Mellado C, Alvarez E, De Diego JG, Blazquez E. Effect of pinealectomy on liver insulin and glucagon receptor concentrations in the rat. *J Pineal Res* (1989) 6(1):77–88. doi:10.1111/j.1600-079X.1989.tb00405.x
99. Lima FB, Machado UF, Bartol I, Seraphim PM, Sumida DH, Moraes SM, et al. Pinealectomy causes glucose intolerance and decreases adipose cell responsiveness to insulin in rats. *Am J Physiol* (1998) 275(6 Pt 1):E934–41.
100. Nogueira TC, Lellis-Santos C, Jesus DS, Taneda M, Rodrigues SC, Amaral FG, et al. Absence of melatonin induces night-time hepatic insulin resistance and increased gluconeogenesis due to stimulation of nocturnal unfolded protein response. *Endocrinology* (2011) 152(4):1253–63. doi:10.1210/en.2010-1088
101. Picinato MC, Haber EP, Carpinelli AR, Cipolla-Neto J. Daily rhythm of glucose-induced insulin secretion by isolated islets from intact and pinealectomized rat. *J Pineal Res* (2002) 33(3):172–7. doi:10.1034/j.1600-079X.2002.02925.x
102. Bahr I, Muhlbauer E, Schucht H, Peschke E. Melatonin stimulates glucagon secretion in vitro and in vivo. *J Pineal Res* (2011) 50(3):336–44. doi:10.1111/j.1600-079X.2010.00848.x
103. Anhe GF, Caperuto LC, Pereira-Da-Silva M, Souza LC, Hirata AE, Velloso LA, et al. In vivo activation of insulin receptor tyrosine kinase by melatonin in the rat hypothalamus. *J Neurochem* (2004) 90(3):559–66. doi:10.1111/j.1471-4159.2004.02514.x
104. Brydon L, Petit L, Delagrange P, Strosberg AD, Jockers R. Functional expression of MT2 (Mel1b) melatonin receptors in human PAZ6 adipocytes. *Endocrinology* (2001) 142(10):4264–71. doi:10.1210/endo.142.10.8423
105. Alonso-Vale MI, Anhe GF, Borges-Silva C, Andreotti S, Peres SB, Cipolla-Neto J, et al. Pinealectomy alters adipose tissue adaptability to fasting in rats. *Metabolism* (2004) 53(4):500–6. doi:10.1016/j.metabol.2003.11.009
106. Alonso-Vale MI, Andreotti S, Borges-Silva C, Mukai PY, Cipolla-Neto J, Lima FB. Intermittent and rhythmic exposure to melatonin in primary cultured adipocytes enhances the insulin and dexamethasone effects on leptin expression. *J Pineal Res* (2006) 41(1):28–34. doi:10.1111/j.1600-079X.2006.00328.x
107. la Fleur SE, Kalsbeek A, Wortel J, van der Vliet J, Buijs RM. Role for the pineal and melatonin in glucose homeostasis: pinealectomy increases night-time glucose concentrations. *J Neuroendocrinol* (2001) 13(12):1025–32. doi:10.1046/j.1365-2826.2001.00717.x
108. Cipolla-Neto J, Amaral FG, Afeche SC, Tan DX, Reiter RJ. Melatonin, energy metabolism, and obesity: a review. *J Pineal Res* (2014) 56(4):371–81. doi:10.1111/jpi.12137
109. Prunet-Marcassus B, Desbazeille M, Bros A, Louche K, Delagrange P, Renard P, et al. Melatonin reduces body weight gain in Sprague Dawley rats with diet-induced obesity. *Endocrinology* (2003) 144(12):5347–52. doi:10.1210/en.2003-0693
110. Tan DX, Manchester LC, Fuentes-Broto L, Paredes SD, Reiter RJ. Significance and application of melatonin in the regulation of brown adipose tissue metabolism: relation to human obesity. *Obes Rev* (2011) 12(3):167–88. doi:10.1111/j.1467-789X.2010.00756.x
111. Evans JA, Elliott JA, Gorman MR. Circadian entrainment and phase resetting differ markedly under dimly illuminated versus completely dark nights. *Behav Brain Res* (2005) 162(1):116–26. doi:10.1016/j.bbr.2005.03.014
112. Chiesa JJ, Angles-Pujolras M, Diez-Noguera A, Cambras T. History-dependent changes in entrainment of the activity rhythm in the Syrian hamster (*Mesocricetus auratus*). *J Biol Rhythms* (2006) 21(1):45–57. doi:10.1177/0748730405283654
113. Evans JA, Elliott JA, Gorman MR. Dim nighttime illumination accelerates adjustment to timezone travel in an animal model. *Curr Biol* (2009) 19(4):R156–7. doi:10.1016/j.cub.2009.01.023
114. Bedrosian TA, Aubrecht TG, Kaugars KE, Weil ZM, Nelson RJ. Artificial light at night alters delayed-type hypersensitivity reaction in response to acute stress in Siberian hamsters. *Brain Behav Immun* (2013) 34:39–42. doi:10.1016/j.bbi.2013.05.009
115. Fonken LK, Workman JL, Walton JC, Weil ZM, Morris JS, Haim A, et al. Light at night increases body mass by shifting the time of food intake. *Proc Natl Acad Sci U S A* (2010) 107(43):18664–9. doi:10.1073/pnas.1008734107
116. Fonken LK, Aubrecht TG, Melendez-Fernandez OH, Weil ZM, Nelson RJ. Dim light at night disrupts molecular circadian rhythms and increases body weight. *J Biol Rhythms* (2013) 28(4):262–71. doi:10.1177/0748730413493862
117. Kohsaka A, Bass J. A sense of time: how molecular clocks organize metabolism. *Trends Endocrinol Metab* (2007) 18(1):4–11. doi:10.1016/j.tem.2006.11.005
118. Casiraghi LP, Alzamendi A, Giovambattista A, Chiesa JJ, Golombek DA. Effects of chronic forced circadian desynchronization on body weight and metabolism in male mice. *Physiol Rep* (2016) 4(8):e12743. doi:10.14814/physr.12743
119. Melkani GC, Panda S. Time-restricted feeding for prevention and treatment of cardiometabolic disorders. *J Physiol* (2017) 595(12):3691–700. doi:10.1113/JP273094
120. Fonken LK, Lieberman RA, Weil ZM, Nelson RJ. Dim light at night exaggerates weight gain and inflammation associated with a high-fat diet in male mice. *Endocrinology* (2013) 154(10):3817–25. doi:10.1210/en.2013-1121
121. Knop E, Zoller L, Ryser R, Gerpe C, Horler M, Fontaine C. Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature* (2017) 548(7666):206–9. doi:10.1038/nature23288
122. Studholme KM, Gompf HS, Morin LP. Brief light stimulation during the mouse nocturnal activity phase simultaneously induces a decline in core temperature and locomotor activity followed by EEG-determined sleep. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* (2013) 304(6):R459–71. doi:10.1152/ajpregu.00460.2012
123. Illnerova H, Vanecek J. Response of rat pineal serotonin N-acetyltransferase to one min light pulse at different night times. *Brain Res* (1979) 167(2):431–4. doi:10.1016/0006-8993(79)90841-2
124. Reiter RJ, Joshi BN, Heinzeller T, Nurnberger F. A single 1- or 5-second light pulse at night inhibits hamster pineal melatonin. *Endocrinology* (1986) 118(5):1906–9. doi:10.1210/endo-118-5-1906
125. Morin LP. Nocturnal light and nocturnal rodents: similar regulation of disparate functions? *J Biol Rhythms* (2013) 28(2):95–106. doi:10.1177/0748730413481921
126. Shuboni DD, Cramm S, Yan L, Nunez AA, Smale L. Acute behavioral responses to light and darkness in nocturnal *Mus musculus* and diurnal *Arvicanthis niloticus*. *J Biol Rhythms* (2012) 27(4):299–307. doi:10.1177/0748730412449723
127. Gall AJ, Shuboni DD, Yan L, Nunez AA, Smale L. Suprachiasmatic nucleus and subparaventricular zone lesions disrupt circadian rhythmicity but not light-induced masking behavior in Nile grass rats. *J Biol Rhythms* (2016) 31(2):170–81. doi:10.1177/0748730415626251
128. Kofuji P, Mure LS, Massman LJ, Purrier N, Panda S, Engeland WC. Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells (ipRGCs) are necessary for light entrainment of peripheral clocks. *PLoS One* (2016) 11(12):e0168651. doi:10.1371/journal.pone.0168651
129. Mohawk JA, Pargament JM, Lee TM. Circadian dependence of corticosterone release to light exposure in the rat. *Physiol Behav* (2007) 92(5):800–6. doi:10.1016/j.physbeh.2007.06.009
130. Cailotto C, Lei J, van der Vliet J, van Heijningen C, van Eden CG, Kalsbeek A, et al. Effects of nocturnal light on (clock) gene expression in peripheral organs: a role for the autonomic innervation of the liver. *PLoS One* (2009) 4(5):e5650. doi:10.1371/journal.pone.0005650
131. Husse J, Leliavski A, Tsang AH, Oster H, Eichele G. The light-dark cycle controls peripheral rhythmicity in mice with a genetically ablated suprachiasmatic nucleus clock. *FASEB J* (2014) 28(11):4950–60. doi:10.1096/fj.14-256594

132. Williams CT, Barnes BM, Yan L, Buck CL. Entraining to the polar day: circadian rhythms in arctic ground squirrels. *J Exp Biol* (2017) 220:3095–102. doi:10.1242/jeb.159889
133. van Oort BE, Tyler NJ, Gerkema MP, Folkow L, Blix AS, Stokkan KA. Circadian organization in reindeer. *Nature* (2005) 438(7071):1095–6. doi:10.1038/4381095a
134. Lu W, Meng QJ, Tyler NJ, Stokkan KA, Loudon AS. A circadian clock is not required in an arctic mammal. *Curr Biol* (2010) 20(6):533–7. doi:10.1016/j.cub.2010.01.042
135. Sudo M, Sasahara K, Moriya T, Akiyama M, Hamada T, Shibata S. Constant light housing attenuates circadian rhythms of mPer2 mRNA and mPER2 protein expression in the suprachiasmatic nucleus of mice. *Neuroscience* (2003) 121(2):493–9. doi:10.1016/S0306-4522(03)00457-3
136. Moriya T, Takahashi S, Ikeda M, Suzuki-Yamashita K, Asai M, Kadotani H, et al. N-methyl-D-aspartate receptor subtype 2C is not involved in circadian oscillation or photic entrainment of the biological clock in mice. *J Neurosci Res* (2000) 61(6):663–73. doi:10.1002/1097-4547(20000915)61:6<663::AID-JNRI10>3.0.CO;2-M
137. Wideman CH, Murphy HM. Constant light induces alterations in melatonin levels, food intake, feed efficiency, visceral adiposity, and circadian rhythms in rats. *Nutr Neurosci* (2009) 12(5):233–40. doi:10.1179/147683009X423436
138. Warren WS, Champney TH, Cassone VM. The suprachiasmatic nucleus controls the circadian rhythm of heart rate via the sympathetic nervous system. *Physiol Behav* (1994) 55(6):1091–9. doi:10.1016/0031-9384(94)90392-1
139. Ohta H, Yamazaki S, McMahon DG. Constant light desynchronizes mammalian clock neurons. *Nat Neurosci* (2005) 8(3):267–9. doi:10.1038/nn1395
140. Munoz M, Peirson SN, Hankins MW, Foster RG. Long-term constant light induces constitutive elevated expression of mPER2 protein in the murine SCN: a molecular basis for Aschoff's rule? *J Biol Rhythms* (2005) 20(1):3–14. doi:10.1177/0748730404272858
141. Tapia-Osorio A, Salgado-Delgado R, Angeles-Castellanos M, Escobar C. Disruption of circadian rhythms due to chronic constant light leads to depressive and anxiety-like behaviors in the rat. *Behav Brain Res* (2013) 252:1–9. doi:10.1016/j.bbr.2013.05.028
142. Coomans CP, van den Berg SA, Houben T, van Klinken JB, van den Berg R, Pronk AC, et al. Detrimental effects of constant light exposure and high-fat diet on circadian energy metabolism and insulin sensitivity. *FASEB J* (2013) 27(4):1721–32. doi:10.1096/fj.12-210898
143. Hamaguchi Y, Tahara Y, Hitosugi M, Shibata S. Impairment of circadian rhythms in peripheral clocks by constant light is partially reversed by scheduled feeding or exercise. *J Biol Rhythms* (2015) 30(6):533–42. doi:10.1177/0748730415609727
144. Shi SQ, Ansari TS, McGuinness OP, Wasserman DH, Johnson CH. Circadian disruption leads to insulin resistance and obesity. *Curr Biol* (2013) 23(5):372–81. doi:10.1016/j.cub.2013.01.048
145. Kooijman S, van den Berg R, Ramkisoensing A, Boon MR, Kuipers EN, Loefer M, et al. Prolonged daily light exposure increases body fat mass through attenuation of brown adipose tissue activity. *Proc Natl Acad Sci U S A* (2015) 112(21):6748–53. doi:10.1073/pnas.1504239112
146. Dauchy RT, Dauchy EM, Tirrell RP, Hill CR, Davidson LK, Greene MW, et al. Dark-phase light contamination disrupts circadian rhythms in plasma measures of endocrine physiology and metabolism in rats. *Comp Med* (2010) 60(5):348–56.
147. Vinogradova IA, Anisimov VN, Bukalev AV, Ilyukha VA, Khizhkin EA, Lotosh TA, et al. Circadian disruption induced by light-at-night accelerates aging and promotes tumorigenesis in young but not in old rats. *Aging (Albany NY)* (2010) 2(2):82–92. doi:10.18632/aging.100120
148. Lilley TR, Wotus C, Taylor D, Lee JM, de La Iglesia HO. Circadian regulation of cortisol release in behaviorally split golden hamsters. *Endocrinology* (2012) 153(2):732–8. doi:10.1210/en.2011-1624
149. Borniger JC, Maurya SK, Periasamy M, Nelson RJ. Acute dim light at night increases body mass, alters metabolism, and shifts core body temperature circadian rhythms. *Chronobiol Int* (2014) 31(8):917–25. doi:10.3109/07420528.2014.926911
150. Aubrecht TG, Jenkins R, Nelson RJ. Dim light at night increases body mass of female mice. *Chronobiol Int* (2015) 32(4):557–60. doi:10.3109/07420528.2014.986682
151. Opperhuizen A-L, Stenvers DJ, Jansen RD, Foppen E, Fliers E, Kalsbeek A. Light at night acutely impairs glucose tolerance in a time-, intensity- and wavelength-dependent manner in rats. *Diabetologia* (2017) 60(7):1333–43. doi:10.1007/s00125-017-4262-y
152. Oike H, Sakurai M, Ippoushi K, Kobori M. Time-fixed feeding prevents obesity induced by chronic advances of light/dark cycles in mouse models of jet-lag/shift work. *Biochem Biophys Res Commun* (2015) 465(3):556–61. doi:10.1016/j.bbrc.2015.08.059
153. Iwamoto A, Kawai M, Furuse M, Yasuo S. Effects of chronic jet lag on the central and peripheral circadian clocks in CBA/N mice. *Chronobiol Int* (2014) 31(2):189–98. doi:10.3109/07420528.2013.837478
154. Preuss F, Tang Y, Laposky AD, Arble D, Keshavarzian A, Turek FW. Adverse effects of chronic circadian desynchronization in animals in a “challenging” environment. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* (2008) 295(6):R2034–40. doi:10.1152/ajpregu.00118.2008
155. Zhu L, Zou F, Yang Y, Xu P, Saito K, Othrell Hinton A Jr, et al. Estrogens prevent metabolic dysfunctions induced by circadian disruptions in female mice. *Endocrinology* (2015) 156(6):2114–23. doi:10.1210/en.2014-1922
156. Herrero L, Valcarcel L, da Silva CA, Albert N, Diez-Noguera A, Cambras T, et al. Altered circadian rhythm and metabolic gene profile in rats subjected to advanced light phase shifts. *PLoS One* (2015) 10(4):e0122570. doi:10.1371/journal.pone.0122570
157. McDonald RJ, Zelinski EL, Keeley RJ, Sutherland D, Fehr L, Hong NS. Multiple effects of circadian dysfunction induced by photoperiod shifts: alterations in context memory and food metabolism in the same subjects. *Physiol Behav* (2013) 118:14–24. doi:10.1016/j.physbeh.2013.04.010
158. Tsai L-L, Tsai Y-C, Hwang K, Huang Y-W, Tzeng J-E. Repeated light-dark shifts speed up body weight gain in male F344 rats. *Am J Physiol Endocrinol Metab* (2005) 289(2):E212–7. doi:10.1152/ajpendo.00603.2004
159. Bartol-Munier I, Gourmelen S, Pevet P, Challet E. Combined effects of high-fat feeding and circadian desynchronization. *Int J Obes* (2006) 30(1):60–7. doi:10.1038/sj.ijo.0803048
160. Karatsoreos IN, Bhagat S, Bloss EB, Morrison JH, McEwen BS. Disruption of circadian clocks has ramifications for metabolism, brain, and behavior. *Proc Natl Acad Sci U S A* (2011) 108(4):1657–62. doi:10.1073/pnas.1018375108
161. Sollars PJ, Weiser MJ, Kudwa AE, Bramley JR, Ogilvie MD, Spencer RL, et al. Altered entrainment to the day/night cycle attenuates the daily rise in circulating corticosterone in the mouse. *PLoS One* (2014) 9(11):e111944. doi:10.1371/journal.pone.0111944
162. Oishi K, Higo-Yamamoto S. Disrupted daily light–dark cycles induce physical inactivity and enhance weight gain in mice depending on dietary fat intake. *Neuroreport* (2014) 27(4 Pt 1):1. doi:10.1097/WNR.0000000000000202
163. Ferrell JM, Chiang JYL. Short-term circadian disruption impairs bile acid and lipid homeostasis in mice. *Cell Mol Gastroenterol Hepatol* (2015) 1(6):664–77. doi:10.1016/j.jcmgh.2015.08.003
164. Barclay JL, Husse J, Bode B, Naujokat N, Meyer-Kovac J, Schmid SM, et al. Circadian desynchrony promotes metabolic disruption in a mouse model of shiftwork. *PLoS One* (2012) 7(5):e37150. doi:10.1371/journal.pone.0037150
165. Jha PK, Foppen E, Kalsbeek A, Challet E. Sleep restriction acutely impairs glucose tolerance in rats. *Physiol Rep* (2016) 4(12):e12839. doi:10.14814/phys2.12839
166. Salgado-Delgado RC, Sadari N, Basualdo Mdel C, Guerrero-Vargas NN, Escobar C, Buys RM. Shift work or food intake during the rest phase promotes metabolic disruption and desynchrony of liver genes in male rats. *PLoS One* (2013) 8(4):e60052. doi:10.1371/journal.pone.0060052
167. Salgado-Delgado R, Angeles-Castellanos M, Buys MR, Escobar C. Internal desynchronization in a model of night-work by forced activity in rats. *Neuroscience* (2008) 154(3):922–31. doi:10.1016/j.neuroscience.2008.03.066
168. Marti AR, Meerlo P, Gronli J, van Hasselt SJ, Mordal J, Pallesen S, et al. Shift in food intake and changes in metabolic regulation and gene expression during simulated night-shift work: a rat model. *Nutrients* (2016) 8(11). doi:10.3390/nu8110712
169. Yasumoto Y, Hashimoto C, Nakao R, Yamazaki H, Hiroyama H, Nemoto T, et al. Short-term feeding at the wrong time is sufficient to desynchronize peripheral clocks and induce obesity with hyperphagia, physical inactivity and metabolic disorders in mice. *Metabolism* (2016) 65(5):714–27. doi:10.1016/j.metabol.2016.02.003
170. Bray MS, Ratcliffe WF, Grenett MH, Brewer RA, Gamble KL, Young ME. Quantitative analysis of light-phase restricted feeding reveals metabolic

- dyssynchrony in mice. *Int J Obes (Lond)* (2013) 37(6):843–52. doi:10.1038/ijo.2012.137
171. Opperhuizen AL, Wang D, Foppen E, Jansen R, Boudzovitch-Surovtseva O, de Vries J, et al. Feeding during the resting phase causes profound changes in physiology and desynchronization between liver and muscle rhythms of rats. *Eur J Neurosci* (2016) 44(10):2795–806. doi:10.1111/ejn.13377
 172. Zhang J, Kaasik K, Blackburn MR, Lee CC. Constant darkness is a circadian metabolic signal in mammals. *Nature* (2006) 439(7074):340–3. doi:10.1038/nature04368
 173. Overton JM, Williams TD. Behavioral and physiologic responses to caloric restriction in mice. *Physiol Behav* (2004) 81(5):749–54. doi:10.1016/j.physbeh.2004.04.025
 174. Stoynev AG, Ikononov OC. Effect of constant light and darkness on the circadian rhythms in rats: I. Food and water intake, urine output and electrolyte excretion. *Acta Physiol Pharmacol Bulg* (1983) 9(3):58–64.
 175. Hastings MH, Loudon AS. Metabolic regulation: fasting in the dark. *Curr Biol* (2006) 16(7):R254–5. doi:10.1016/j.cub.2006.03.004
 176. Roseboom PH, Namboodiri MA, Zimonjic DB, Popescu NC, Rodriguez IR, Gastel JA, et al. Natural melatonin 'knockdown' in C57BL/6J mice: rare mechanism truncates serotonin N-acetyltransferase. *Brain Res Mol Brain Res* (1998) 63(1):189–97. doi:10.1016/S0169-328X(98)00273-3
 177. de la Iglesia HO, Cambras T, Schwartz WJ, Diez-Noguera A. Forced desynchronization of dual circadian oscillators within the rat suprachiasmatic nucleus. *Curr Biol* (2004) 14(9):796–800. doi:10.1016/j.cub.2004.04.034
 178. Casiraghi LP, Oda GA, Chiesa JJ, Friesen WO, Golombek DA. Forced desynchronization of activity rhythms in a model of chronic jet lag in mice. *J Biol Rhythms* (2012) 27(1):59–69. doi:10.1177/0748730411429447
 179. Cambras T, Weller JR, Angles-Pujoras M, Lee ML, Christopher A, Diez-Noguera A, et al. Circadian desynchronization of core body temperature and sleep stages in the rat. *Proc Natl Acad Sci U S A* (2007) 104(18):7634–9. doi:10.1073/pnas.0702424104
 180. Schwartz MD, Wotus C, Liu T, Friesen WO, Borjigin J, Oda GA, et al. Dissociation of circadian and light inhibition of melatonin release through forced desynchronization in the rat. *Proc Natl Acad Sci U S A* (2009) 106(41):17540–5. doi:10.1073/pnas.0906382106
 181. Vilaplana J, Madrid JA, Sanchez-Vazquez J, Campuzano A, Cambras T, Diez-Noguera A. Influence of period length of light/dark cycles on the body weight and food intake of young rats. *Physiol Behav* (1995) 58(1):9–13. doi:10.1016/0031-9384(95)00021-A
 182. Duffy JF, Czeisler CA. Effect of light on human circadian physiology. *Sleep Med Clin* (2009) 4(2):165–77. doi:10.1016/j.jsmc.2009.01.004
 183. Roenneberg T, Mrosovsky M. Entrainment of the human circadian clock. *Cold Spring Harb Symp Quant Biol* (2007) 72:293–9. doi:10.1101/sqb.2007.72.043
 184. Wright KP Jr, McHill AW, Birks BR, Griffin BR, Rusterholz T, Chinoy ED. Entrainment of the human circadian clock to the natural light-dark cycle. *Curr Biol* (2013) 23(16):1554–8. doi:10.1016/j.cub.2013.06.039
 185. de la Iglesia HO, Fernandez-Duque E, Golombek DA, Lanza N, Duffy JF, Czeisler CA, et al. Access to electric light is associated with shorter sleep duration in a traditionally hunter-gatherer community. *J Biol Rhythms* (2015) 30(4):342–50. doi:10.1177/0748730415590702
 186. Fonken LK, Nelson RJ. Illuminating the deleterious effects of light at night. *Fl1000 Med Rep* (2011) 3:18. doi:10.3410/M3-18
 187. de la Iglesia HO, Moreno C, Lowden A, Louzada F, Marqueze E, Levandovski R, et al. Ancestral sleep. *Curr Biol* (2016) 26(7):R271–2. doi:10.1016/j.cub.2016.01.071
 188. Roenneberg T, Mrosovsky M. The circadian clock and human health. *Curr Biol* (2016) 26(10):R432–43. doi:10.1016/j.cub.2016.04.011
 189. Grimaldi S, Englund A, Partonen T, Haukka J, Pirkola S, Reunanen A, et al. Experienced poor lighting contributes to the seasonal fluctuations in weight and appetite that relate to the metabolic syndrome. *J Environ Public Health* (2009) 2009:165013. doi:10.1155/2009/165013
 190. Sohail S, Yu L, Bennett DA, Buchman AS, Lim AS. Irregular 24-hour activity rhythms and the metabolic syndrome in older adults. *Chronobiol Int* (2015) 32(6):802–13. doi:10.3109/07420528.2015.1041597
 191. Boivin DB, Duffy JF, Kronauer RE, Czeisler CA. Dose-response relationships for resetting of human circadian clock by light. *Nature* (1996) 379(6565):540–2. doi:10.1038/379540a0
 192. Brainard GC, Lewy AJ, Menaker M, Fredrickson RH, Miller LS, Weleber RG, et al. Dose-response relationship between light irradiance and the suppression of plasma melatonin in human volunteers. *Brain Res* (1988) 454(1–2):212–8. doi:10.1016/0006-8993(88)90820-7
 193. Obayashi K, Saeki K, Iwamoto J, Ikada Y, Kurumatani N. Exposure to light at night and risk of depression in the elderly. *J Affect Disord* (2013) 151(1):331–6. doi:10.1016/j.jad.2013.06.018
 194. Rybnikova NA, Haim A, Portnov BA. Does artificial light-at-night exposure contribute to the worldwide obesity pandemic? *Int J Obes (Lond)* (2016) 40(5):815–23. doi:10.1038/ijo.2015.255
 195. Koo YS, Song JY, Joo EY, Lee HJ, Lee E, Lee SK, et al. Outdoor artificial light at night, obesity, and sleep health: cross-sectional analysis in the KoGES study. *Chronobiol Int* (2016) 33(3):301–14. doi:10.3109/07420528.2016.1143480
 196. Roenneberg T, Allebrandt KV, Mrosovsky M, Vetter C. Social jetlag and obesity. *Curr Biol* (2012) 22(10):939–43. doi:10.1016/j.cub.2012.03.038
 197. Wong PM, Hasler BP, Kamarck TW, Muldoon MF, Manuck SB. Social jetlag, chronotype, and cardiometabolic risk. *J Clin Endocrinol Metab* (2015) 100(12):4612–20. doi:10.1210/jc.2015-2923
 198. Wang XS, Armstrong ME, Cairns BJ, Key TJ, Travis RC. Shift work and chronic disease: the epidemiological evidence. *Occup Med (Lond)* (2011) 61(2):78–89. doi:10.1093/occmed/kqr001
 199. Pietrouisti A, Neri A, Somma G, Coppeta L, Iavicoli I, Bergamaschi A, et al. Incidence of metabolic syndrome among night-shift healthcare workers. *Occup Environ Med* (2010) 67(1):54–7. doi:10.1136/oem.2009.046797
 200. Hunter CM, Figueiro MG. Measuring light at night and melatonin levels in shift workers: a review of the literature. *Biol Res Nurs* (2017) 19(4):365–74. doi:10.1177/1099800417714069
 201. Carrasco-Benso MP, Rivero-Gutierrez B, Lopez-Minguez J, Anzola A, Diez-Noguera A, Madrid JA, et al. Human adipose tissue expresses intrinsic circadian rhythm in insulin sensitivity. *FASEB J* (2016) 30(9):3117–23. doi:10.1096/fj.201600269RR
 202. Scheer FA, Hilton MF, Mantzoros CS, Shea SA. Adverse metabolic and cardiovascular consequences of circadian misalignment. *Proc Natl Acad Sci U S A* (2009) 106(11):4453–8. doi:10.1073/pnas.0808180106
 203. Leproult R, Holmback U, Van Cauter E. Circadian misalignment augments markers of insulin resistance and inflammation, independently of sleep loss. *Diabetes* (2014) 63(6):1860–9. doi:10.2337/db13-1546
 204. Morris CJ, Purvis TE, Mistretta J, Scheer FA. Effects of the internal circadian system and circadian misalignment on glucose tolerance in chronic shift workers. *J Clin Endocrinol Metab* (2016) 101(3):1066–74. doi:10.1210/jc.2015-3924
 205. Touitou Y, Reinberg A, Touitou D. Association between light at night, melatonin secretion, sleep deprivation, and the internal clock: health impacts and mechanisms of circadian disruption. *Life Sci* (2017) 173:94–106. doi:10.1016/j.lfs.2017.02.008
 206. van Drongelen A, Boot CR, Merkus SL, Smid T, van der Beek AJ. The effects of shift work on body weight change – a systematic review of longitudinal studies. *Scand J Work Environ Health* (2011) 37(4):263–75. doi:10.5271/sjweh.3143
 207. Guo Y, Rong Y, Huang X, Lai H, Luo X, Zhang Z, et al. Shift work and the relationship with metabolic syndrome in Chinese aged workers. *PLoS One* (2015) 10(3):e0120632. doi:10.1371/journal.pone.0120632
 208. Peplonska B, Bukowska A, Sobala W. Association of rotating night shift work with BMI and abdominal obesity among nurses and midwives. *PLoS One* (2015) 10(7):e0133761. doi:10.1371/journal.pone.0133761
 209. Yu KH, Yi YH, Kim YJ, Cho BM, Lee SY, Lee JG, et al. Shift work is associated with metabolic syndrome in young female Korean workers. *Korean J Fam Med* (2017) 38(2):51–6. doi:10.4082/kjfm.2017.38.2.51
 210. Haus E, Reinberg A, Mauvieux B, Le Floch N, Sackett-Lundeen L, Touitou Y. Risk of obesity in male shift workers: a chronophysiological approach. *Chronobiol Int* (2016) 33(8):1018–36. doi:10.3109/07420528.2016.1167079
 211. Karlsson B, Knutsson A, Lindahl B. Is there an association between shift work and having a metabolic syndrome? Results from a population based study of 27,485 people. *Occup Environ Med* (2001) 58(11):747–52. doi:10.1136/oem.58.11.747
 212. Sookoian S, Gemma C, Gianotti TF, Burgueno A, Alvarez A, Gonzalez CD, et al. Serotonin and serotonin transporter gene variant in rotating shift workers. *Sleep* (2007) 30(8):1049–53.
 213. Esquirol Y, Bongard V, Mabile L, Jonnier B, Soulat JM, Perret B. Shift work and metabolic syndrome: respective impacts of job strain, physical activity,

- and dietary rhythms. *Chronobiol Int* (2009) 26(3):544–59. doi:10.1080/07420520902821176
214. De Bacquer D, Van Risseghem M, Clays E, Kittel F, De Backer G, Braeckman L. Rotating shift work and the metabolic syndrome: a prospective study. *Int J Epidemiol* (2009) 38(3):848–54. doi:10.1093/ije/dyn360
 215. Lin YC, Hsiao TJ, Chen PC. Persistent rotating shift-work exposure accelerates development of metabolic syndrome among middle-aged female employees: a five-year follow-up. *Chronobiol Int* (2009) 26(4):740–55. doi:10.1080/07420520902929029
 216. Yoshizaki T, Kawano Y, Noguchi O, Onishi J, Teramoto R, Sunami A, et al. Association of eating behaviours with diurnal preference and rotating shift work in Japanese female nurses: a cross-sectional study. *BMJ Open* (2016) 6(11):e011987. doi:10.1136/bmjopen-2016-011987
 217. McHill AW, Melanson EL, Higgins J, Connick E, Moehlman TM, Stothard ER, et al. Impact of circadian misalignment on energy metabolism during simulated nightshift work. *Proc Natl Acad Sci U S A* (2014) 111(48):17302–7. doi:10.1073/pnas.1412021111
 218. Barclay JL, Tsang AH, Oster H. Interaction of central and peripheral clocks in physiological regulation. *Prog Brain Res* (2012) 199:163–81. doi:10.1016/B978-0-444-59427-3.00030-7
 219. Ferrell JM, Chiang JY. Circadian rhythms in liver metabolism and disease. *Acta Pharm Sin B* (2015) 5(2):113–22. doi:10.1016/j.apsb.2015.01.003
 220. Mukherji A, Kobiita A, Chambon P. Shifting the feeding of mice to the rest phase creates metabolic alterations, which, on their own, shift the peripheral circadian clocks by 12 hours. *Proc Natl Acad Sci U S A* (2015) 112(48):E6683–90. doi:10.1073/pnas.1519735112
 221. Opperhuizen AL, van Kerkhof LW, Proper KI, Rodenburg W, Kalsbeek A. Rodent models to study the metabolic effects of shiftwork in humans. *Front Pharmacol* (2015) 6:50. doi:10.3389/fphar.2015.00050
 222. Hatori M, Vollmers C, Zarrinpar A, DiTacchio L, Bushong EA, Gill S, et al. Time-restricted feeding without reducing caloric intake prevents metabolic diseases in mice fed a high-fat diet. *Cell Metab* (2012) 15(6):848–60. doi:10.1016/j.cmet.2012.04.019
 223. Chaix A, Zarrinpar A, Miu P, Panda S. Time-restricted feeding is a preventative and therapeutic intervention against diverse nutritional challenges. *Cell Metab* (2014) 20(6):991–1005. doi:10.1016/j.cmet.2014.11.001
 224. Wehrens SMT, Christou S, Isherwood C, Middleton B, Gibbs MA, Archer SN, et al. Meal timing regulates the human circadian system. *Curr Biol* (2017) 27(12):1768–75.e1763. doi:10.1016/j.cub.2017.04.059
 225. Cahill LE, Chiuev SE, Mekary RA, Jensen MK, Flint AJ, Hu FB, et al. Prospective study of breakfast eating and incident coronary heart disease in a cohort of male US health professionals. *Circulation* (2013) 128(4):337–43. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.113.001474
 226. Gill S, Panda S. A smartphone app reveals erratic diurnal eating patterns in humans that can be modulated for health benefits. *Cell Metab* (2015) 22(5):789–98. doi:10.1016/j.cmet.2015.09.005
 227. Chiesa JJ, Diez-Noguera A, Cambras T. Effects of transient and continuous wheel running activity on the upper and lower limits of entrainment to light-dark cycles in female hamsters. *Chronobiol Int* (2007) 24(2):215–34. doi:10.1080/07420520701282240
 228. van Oosterhout F, Lucassen EA, Houben T, vanderLeest HT, Antle MC, Meijer JH. Amplitude of the SCN clock enhanced by the behavioral activity rhythm. *PLoS One* (2012) 7(6):e39693. doi:10.1371/journal.pone.0039693
 229. Schroeder AM, Truong D, Loh DH, Jordan MC, Roos KP, Colwell CS. Voluntary scheduled exercise alters diurnal rhythms of behaviour, physiology and gene expression in wild-type and vasoactive intestinal peptide-deficient mice. *J Physiol* (2012) 590(23):6213–26. doi:10.1113/jphysiol.2012.233676
 230. Brainard GC, Rollag MD, Hanifin JP. Photic regulation of melatonin in humans: ocular and neural signal transduction. *J Biol Rhythms* (1997) 12(6):537–46. doi:10.1177/074873049701200608
 231. Dickmeis T, Weger BD, Weger M. The circadian clock and glucocorticoids – interactions across many time scales. *Mol Cell Endocrinol* (2013) 380(1–2):2–15. doi:10.1016/j.mce.2013.05.012
 232. Oster H, Challet E, Ott V, Arvat E, Ronald, de Kloet E, et al. The functional and clinical significance of the 24-hour rhythm of circulating glucocorticoids. *Endocr Rev* (2017) 38(1):3–45. doi:10.1210/er.2015-1080
 233. Jung CM, Khalsa SB, Scheer FA, Cajochen C, Lockley SW, Czeisler CA, et al. Acute effects of bright light exposure on cortisol levels. *J Biol Rhythms* (2010) 25(3):208–16. doi:10.1177/0748730410368413
 234. Guo H, Brewer JM, Lehman MN, Bittman EL. Suprachiasmatic regulation of circadian rhythms of gene expression in hamster peripheral organs: effects of transplanting the pacemaker. *J Neurosci* (2006) 26(24):6406–12. doi:10.1523/JNEUROSCI.4676-05.2006
 235. Sephton SE, Dhabhar FS, Keuroghlian AS, Giese-Davis J, McEwen BS, Ison AC, et al. Depression, cortisol, and suppressed cell-mediated immunity in metastatic breast cancer. *Brain Behav Immun* (2009) 23(8):1148–55. doi:10.1016/j.bbi.2009.07.007
 236. Leproult R, Van Cauter E. Role of sleep and sleep loss in hormonal release and metabolism. *Endocr Dev* (2010) 17:11–21. doi:10.1159/000262524
 237. Saad A, Dalla Man C, Nandy DK, Levine JA, Bharucha AE, Rizza RA, et al. Diurnal pattern to insulin secretion and insulin action in healthy individuals. *Diabetes* (2012) 61(11):2691–700. doi:10.2337/db11-1478
 238. Yuen KC, Chong LE, Riddle MC. Influence of glucocorticoids and growth hormone on insulin sensitivity in humans. *Diabet Med* (2013) 30(6):651–63. doi:10.1111/dme.12184
 239. Morgan K, Newland L. Global maps for GIS. *Environ Sci Pollut Res Int* (1999) 6(1):59–60. doi:10.1007/BF02987122
 240. Bo S, Musso G, Beccuti G, Fadda M, Fedele D, Gambino R, et al. Consuming more of daily caloric intake at dinner predisposes to obesity. A 6-year population-based prospective cohort study. *PLoS One* (2014) 9(9):e108467. doi:10.1371/journal.pone.0108467
 241. Eckel RH, Depner CM, Perreault L, Markwald RR, Smith MR, McHill AW, et al. Morning circadian misalignment during short sleep duration impacts insulin sensitivity. *Curr Biol* (2015) 25(22):3004–10. doi:10.1016/j.cub.2015.10.011

Conflict of Interest Statement: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2017 Plano, Casiraghi, García Moro, Paladino, Golombek and Chiesa. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/50419956>

Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance

Article in *Journal of Applied Physiology* · March 2011

DOI: 10.1152/japplphysiol.00165.2011 · Source: PubMed

CITATIONS

229

READS

483

9 authors, including:



Christian Cajochen

Universitäre Psychiatrische Kliniken Basel

309 PUBLICATIONS 10,841 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Silvia Frey

OceanCare

34 PUBLICATIONS 565 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Doreen Anders

Universitäre Psychiatrische Kliniken Basel

7 PUBLICATIONS 254 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Jakub Späti

National Center of Neurology and Psychiatry

16 PUBLICATIONS 393 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



VR-HYPERSPACE [View project](#)



Influence of Caffeine Consumption on the Human Circadian System: Neurobehavioral, Hormonal and Cerebral Mechanisms [View project](#)

Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance

Christian Cajochen, Sylvia Frey, Doreen Anders, Jakub Späti, Matthias Bues, Achim Pross, Ralph Mager, Anna Wirz-Justice and Oliver Stefani

J Appl Physiol 110:1432-1438, 2011. First published 17 March 2011;

doi: 10.1152/jappphysiol.00165.2011

You might find this additional info useful...

This article cites 31 articles, 10 of which you can access for free at:

<http://jap.physiology.org/content/110/5/1432.full#ref-list-1>

Updated information and services including high resolution figures, can be found at:

<http://jap.physiology.org/content/110/5/1432.full>

Additional material and information about *Journal of Applied Physiology* can be found at:

<http://www.the-aps.org/publications/jappl>

This information is current as of September 2, 2012.

Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance

Christian Cajochen,¹ Sylvia Frey,¹ Doreen Anders,¹ Jakub Späti,¹ Matthias Bues,² Achim Pross,² Ralph Mager,³ Anna Wirz-Justice,¹ and Oliver Stefani²

Centres for ¹Chronobiology and ³Applied Technologies in Neuroscience, Psychiatric Hospitals of the University of Basel, Basel, Switzerland; and ²Competence Team Visual Technologies, Fraunhofer IAO/University Stuttgart IAT, Stuttgart, Germany

Submitted 7 February 2011; accepted in final form 14 March 2011

Cajochen C, Frey S, Anders D, Späti J, Bues M, Pross A, Mager R, Wirz-Justice A, Stefani O. Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. *J Appl Physiol* 110: 1432–1438, 2011. First published March 17, 2011; doi:10.1152/japphysiol.00165.2011.—Many people spend an increasing amount of time in front of computer screens equipped with light-emitting diodes (LED) with a short wavelength (blue range). Thus we investigated the repercussions on melatonin (a marker of the circadian clock), alertness, and cognitive performance levels in 13 young male volunteers under controlled laboratory conditions in a balanced crossover design. A 5-h evening exposure to a white LED-backlit screen with more than twice as much 464 nm light emission {irradiance of 0,241 Watt/(steradian $\times$ m²) [W/(sr $\times$ m²)], 2.1×10^{13} photons/(cm² $\times$ s), in the wavelength range of 454 and 474 nm} than a white non-LED-backlit screen [irradiance of 0,099 W/(sr $\times$ m²), 0.7×10^{13} photons/(cm² $\times$ s), in the wavelength range of 454 and 474 nm] elicited a significant suppression of the evening rise in endogenous melatonin and subjective as well as objective sleepiness, as indexed by a reduced incidence of slow eye movements and EEG low-frequency activity (1–7 Hz) in frontal brain regions. Concomitantly, sustained attention, as determined by the GO/NOGO task; working memory/attention, as assessed by “explicit timing”; and declarative memory performance in a word-learning paradigm were significantly enhanced in the LED-backlit screen compared with the non-LED condition. Screen quality and visual comfort were rated the same in both screen conditions, whereas the non-LED screen tended to be considered brighter. Our data indicate that the spectral profile of light emitted by computer screens impacts on circadian physiology, alertness, and cognitive performance levels. The challenge will be to design a computer screen with a spectral profile that can be individually programmed to add timed, essential light information to the circadian system in humans.

nonvisual effects of light; spectral analysis; shift work; melatonin; alertness

THE WORLD IS ONLINE. Over 2 billion people use the internet, and this number is rapidly increasing. In 2010, 1.6 billion computers, television sets, and cellular phones were sold globally (www.worldometers.info), which illustrates the numbers of individuals who spend time in front of computer screens, video game consoles, or other video monitors. Newer computers and TV screens are now frequently equipped with light-emitting diodes (LED), which peak in the short-wavelength region (i.e., the blue range at $\sim$ 460 nm). There is ample evidence that a novel, short-wavelength-sensitive photoreceptor system is pri-

marily responsible for a variety of nonvisual light responses, in particular, resetting the timing of the circadian pacemaker, suppressing melatonin production, improving alertness and performance, and elevating brain activation, as assessed from EEG-derived correlates of arousal (5, 6, 8, 17, 18, 24, 28, 31). Furthermore, bright light exposure and exposure to monochromatic blue light in the evening lengthens sleep latency and reduces initial EEG delta activity, a marker of slow-wave sleep (7, 20). Thus the frequent use of LED sources could have ramifications on human behavior, since light is the most important synchronizer of our biological clock. The circadian pacemaker responds differentially to the resetting effects of light, depending on the circadian phase of light exposure. Phase delays occur when light exposure is centered prior to the core body temperature minimum, whereas circadian-phase advances can be elicited by light exposures centered after the core body temperature minimum, which normally occurs in the second half of the biological night (14). This means that exposure to artificial light in the evening, when our circadian timing system is most vulnerable to light, has the capacity to modify rhythms and thus sleep and neurobehavioral function. While acute light exposure in the evening may, for instance, help night workers to become more alert and perform better, the repercussions of chronic, inappropriate-timed exposure could lead to circadian misalignment and thus eventually to sleep problems (23), depression (19), and even the cardiovascular diseases seen in shift workers (27).

Here, we investigated the impact of a LED-backlit computer screen (enhanced in the short-wavelength region, i.e., 460 nm) in comparison with a LED-free computer screen on a wide range of measures in human physiology and behavior, such as melatonin levels, cognitive performance, and the EEG during wakefulness. Our main prediction was that a 5-h evening exposure to a LED-backlit computer screen, in comparison with a non-LED computer screen, would suppress the evening increase in melatonin levels and evoke an alerting response with concomitant improvement in cognitive performance.

METHODS

Healthy, young male volunteers (19–35 years) were recruited via advertisements at the University of Basel (Switzerland). Potential study participants filled out questionnaires about their general health, sleep quality [Pittsburgh sleep quality index (PSQI)], and sleep-wake behavior [Munich chronotype questionnaire (MCTQ) (34)]. Volunteers with good sleep quality (PSQI score <5), no extreme chronotype (>3 and <6 points on the MCTQ questionnaire), and good general health underwent a medical examination carried out by the physician in charge and an ophthalmologic examination by a certified optometrist to exclude volunteers with visual impairments, such as color blindness, diminished pupil

Address for reprint requests and other correspondence: C. Cajochen, Centre for Chronobiology, Psychiatric Hospital of the University of Basel, Wilhelm Kleinstr. 27, CH-4012 Basel, Switzerland (e-mail: christian.cajochen@upkbs.ch).

reaction to light, and a reduced visual field. Participants were not excluded if they wore glasses or contact lenses. Exclusion criteria were smoking, medication or drug consumption, shift work within the last 3 mo, and transmeridian flights up to 3 mo prior to the study. Thirteen volunteers (mean age: 23.8 years $\pm$ 5.0 SD; mean body mass index: 22.6 $\pm$ 1.7 SD) were then selected for the study. All subjects gave written, informed consent. The study protocol, screening questionnaires, and consent form were approved by the local ethics committee and conformed to the Declaration of Helsinki.

During the entire study protocol, which comprised a total of 2 wk, participants were instructed to keep a regular sleep-wake schedule (bed times and wake times within ± 30 min of self-selected target time). Compliance was verified by sleep logs and ambulatory activity measurements (Actiwatch-L, Cambridge Neurotechnology, Cambridge, UK). The “in laboratory” part of the study was carried out in Switzerland between the end of September and beginning of November. In a 25-m² room, two cubicles were installed in such a way that

they were completely light shielded, and only the light emitted by the computer screen fell onto the volunteers' eyes at a distance of ~ 60 cm. Two different computer screens were compared: a LED-illuminated liquid crystal display screen (HP LP2480zx) and a cold cathode fluorescent lamp (CCFL)-illuminated screen (HP LP2475w), both with a screen diagonal of 24 in. and a resolution of 1920 $\times$ 1200 pixels adjusted to the identical luminance of 250 nits (nits as 1 cd/m²). Spectral measurements were carried out using a Konica Minolta CS-1000 (Konica Minolta Sensing, Osaka, Japan). Both computer screens were set to a white background with a color temperature of 6,953 K for the LED-illuminated and 4,775 K for the CCFL-illuminated screen, thus reducing the amount of blue light from one-half to approximately one-third in the LED compared with the non-LED, CCFL-illuminated screen. The irradiance between 400 nm and 480 nm of the LED-illuminated computer screen was 0,241 Watt/(steradian $\times$ m²) [W/(sr $\times$ m²)] and 0,099 W/(sr $\times$ m²) for the non-LED, CCFL-illuminated computer screen (Fig. 1). Although the difference

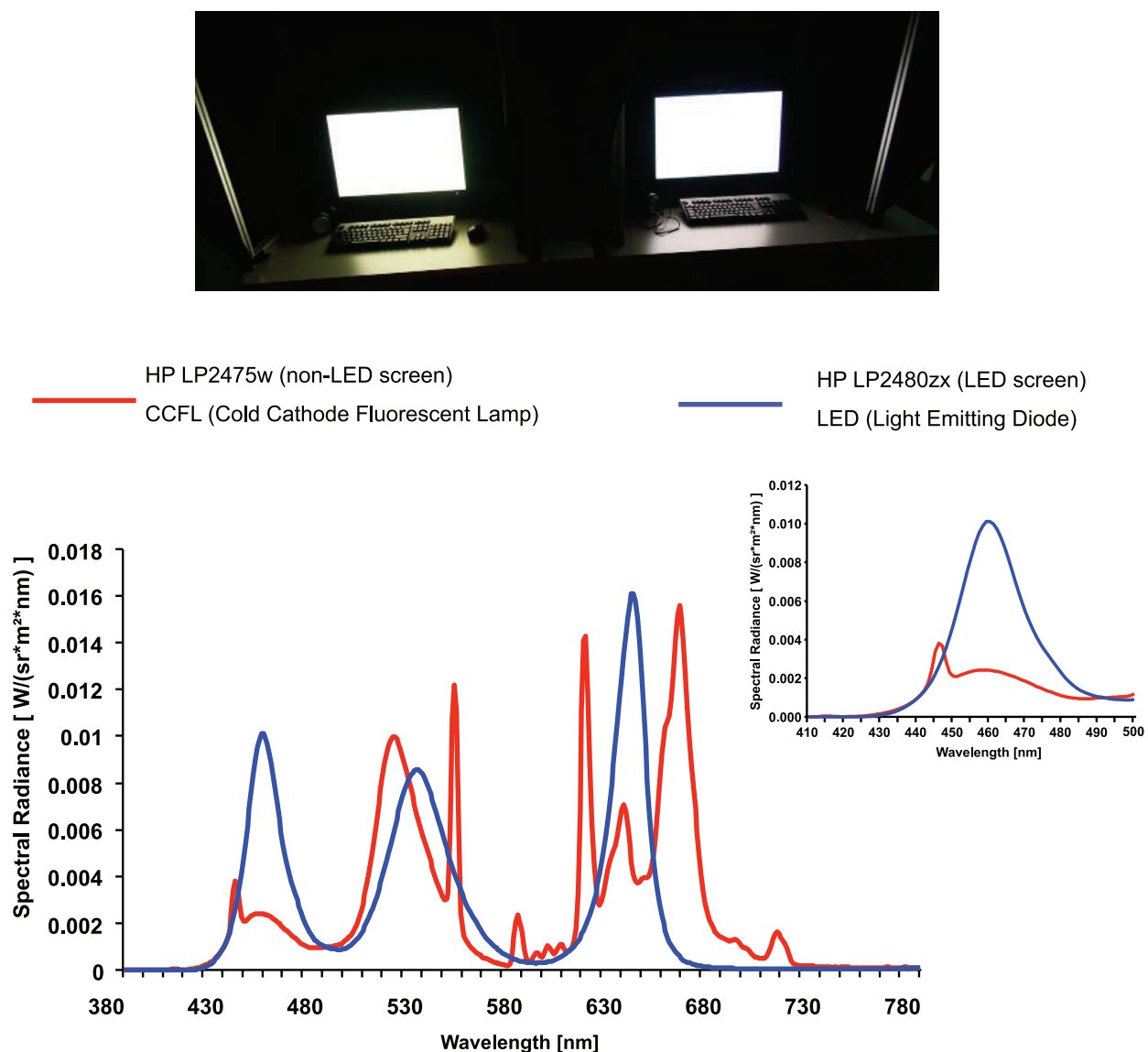


Fig. 1. *Top, left*: photograph of the non-light-emitting diodes (non-LED) computer screen [HP LP2475w cold cathode fluorescent lamp (CCFL)]; *right*: photograph of the LED computer screen (HP LP2480zx LED). *Lower*: spectral composition {light wavelength by irradiance = Watt/(steradian $\times$ m² $\times$ nm) [W/(sr $\times$ m² $\times$ nm)]} of light emitted from the LED computer screen (blue line) and the non-LED screen (red line). *Inset*: blow-up of the spectral composition in the wavelength range of 410–500 nm. The photon flux for the LED-backlit screen was 2.1×10^{13} photons/(cm² $\times$ s) in the wavelength range of 454 and 474 nm and 0.7×10^{13} photons/(cm² $\times$ s) in the wavelength range of 454 and 474 nm for the non-LED-backlit screen.

in color temperature was visible, the study volunteers did not notice this difference after 1 wk when they changed to the other computer screen, because the two displays were arranged in such a way that the participants could only view one (their "own") monitor at a time. During the entire study protocol, the study volunteers were in a seated position in front of the computer screen with an ambient temperature of 22°C, air humidity of 60%, and ambient lighting conditions <4 lux. The volunteers reported 6 h (on average, at ~17.30 h) prior to usual bed time, which was on average, 23.35 h $\pm$ 22 min, to the Chronobiology Laboratory of the Psychiatric Hospitals of the University of Basel, where they were equipped with electrodes and sensors for the physiological recordings. Afterward, volunteers were trained on the different cognitive tasks and were acquainted with the study room. Four and one-half hours prior to usual bed time (on average, at 19:00 h), volunteers were dark adapted for 30 min and thus sat in a very dim-light (<4 lux, red light) environment. After dark adaptation (on average, at ~20:00 h), they were asked to sit in front of their computer screen in their cubicles and to start the 5-h screen exposure episode. During these 5 h, the study participants were asked to complete the following tasks: in half-hourly intervals, saliva collection and the Karolinska Sleepiness Scale (12); and in hourly intervals, the Karolinska Drowsiness Test (KDT) (1). Every hour before and after the relaxing movie (see below in this paragraph), the GO/NOGO task (3), time estimation task (30), word-pair learning task (26), and visual comfort and effort scale (4) were completed. Every 50 min, the volunteers were asked to take a short break for 10 min under dim-light red conditions in the same room. Furthermore, after the first 2 h of sitting in the cubicle, a relaxing, 20-min movie was displayed on the computer screen, which contained scenes with snowy environments (i.e., white light). The volunteers were instructed to watch the movie at a distance of ~1 m to ensure constant exposure to the computer screen light without other ongoing activities (which accentuates light's effects on alertness and attention). One hour after the usual bed time (on average, at 00:30 h), the 5-h laboratory protocol ended, and the volunteers were allowed to go home. One week later, the entire study procedure was repeated with the other computer screen type. The order of the computer screens was balanced and crossed over to avoid potential sequence effects.

Saliva collections were scheduled every 30 min. A direct double-antibody radioimmunoassay was used for the melatonin assay (validated by GC-MS with an analytical least detectable dose of 0.65 pg/ml; Bühlmann Laboratory, Schönenbuch, Switzerland) (32). The minimum detectable dose of melatonin (analytical sensitivity) was determined to be 0.2 pg/ml.

To objectively quantify sleepiness, 3-min KDT (1) artifact-free EEG samples were recorded, once during dim light and hourly during the 5 h of light exposure. The Visual Comfort Scale (4), a 100-mm visual analogue scale, comprises: 1) screen quality (to read, see patterns, and optical reflection); 2) visual well-being and comfort; and 3) glare and brightness. Glare and brightness are probed as, respectively, "Does the light have less glare or more?" and "Is the light too dark or too bright?" More glare and brightness are conceived as helping to visualize patterns and/or to read, although high levels of glare and brightness can point to potentially less comfortable light perception in a given environmental light setting (9).

The GO/NOGO task (3) was used to measure the capacity for sustained attention and response control. Participants had to press the space bar within 0.5 s if the letter "M" were shown on the screen. If the letter "W" were shown, participants were instructed not to press any buttons. A total of 80% of M letters were shown in a quasi-random sequence. Approximately 200 M letters were shown during 8 min.

Interval timing was sampled via the concurrent use of two standard methods of timing research, temporal production, and temporal reproduction. For duration estimations, production target durations were displayed in conventional units (number of seconds to be produced) centrally on a computer display using black Arabic digits on a gray

background. The participant's task was to identify the target duration and immediately begin holding down the space bar on the computer keyboard, stopping to depress the space bar after a duration that subjectively matched the defined target duration. Reproduction target durations were given via a "carrier stimulus," i.e., via temporally delimited display of a black square on gray background centrally on a computer display. Participants were instructed to hold down the space bar on the computer keyboard as soon as possible upon the extinction of the target stimulus and to release the space bar after a duration, subjectively corresponding to the target duration, had elapsed. Interval timing sessions consisted of either 15 (production; three target durations, each presented five times in random order) or 25 (reproduction; five target durations, each presented five times in random order) (30).

Declarative memory performance was tested via a word-pair learning task, which consisted of 60 word pairs of semantically unrelated words. For each of the four test sessions, a new set of 120 words or 60 word pairs, respectively, was used. To allow the creation of multiple word-pair lists with different words but similar psycholinguistic properties, the software EQUIWORD (16) was used. Each pair of words was displayed on the screen for 6 s, followed by a white-centered fixation cross for 5 s, during which subjects were instructed to visually imagine a relationship between the two words of the pair in the aim to render mnemonic strategies more comparable across volunteers (11, 26). Immediately after the end of the encoding session, the recall of the word pairs was conducted. Thereby, 50% of the previously learned word pairs (=30 word pairs) were shown again, although in a different order, and the remaining 60 words were newly arranged to 30 word pairs. Hence, similar to the encoding session, the recall session comprised 60 word pairs, but 30 of them were newly arranged. For each word pair, the volunteers were asked to answer in the following manner: 1) it was a known (old) word pair (100% sure), 2) it was never displayed before (new; 100% sure), or 3) it is likely but not 100% sure to be a known (old) word pair. The assessment of declarative memory performance was based on the percentage of correctly remembered "old" word pairs and correctly identified "new" word pairs.

EEGs were calculated offline from a continuous, 6-referential EEG recording. All signals were online digitized (16 bit analog-to-digital converter, 0.021 μ V/bit; storage sampling rate at 512 Hz Varioport digital recorder, Becker Meditec, Karlsruhe Germany). The raw signals were stored online on a memory card (SanDisk, Milpitas, CA) and downloaded offline to a personal computer hard drive. EEG data collected during the 3-min KDT were scored for artifacts and subjected to a Fast Fourier Transform (FFT) routine (Vitaport paperless sleep-scoring software). Two-second epochs were offline subjected to spectral analysis using a FFT (10% cosine window), resulting in a 0.5-Hz bin resolution. For data reduction, artifact-free, 2-s epochs were averaged over 20-s epochs. Next, the 20-s epochs were further reduced by averaging them over each 3-min KDT. EEG power spectra during each 3-min KDT were calculated for the derivations Fz, FCz, Cz, CPz, Pz, and Oz in the range of 0.5 to 25 Hz. The electrodes for the electrooculogram (EOG) were placed at the outer canthi of each eye, one slightly above the canthomeatal plane and the other slightly below. All EOG recordings were inspected visually, and slow eye movements (SEMs) were scored in 20-s epochs. Other eye movements (i.e., saccadic and mixed patterns) were not considered for analysis. Each 20-s epoch during the study protocol was scored as to whether at least one SEM occurred, and the presence of more than one SEM in an epoch did not influence the scoring criteria. SEMs were scored regardless of their amplitude, but SEMs that occurred during body movements were not included in the analysis.

For all analyses, the statistical package SAS (Version 9.1, SAS Institute, Cary, NC) was used. Statistical analyses were carried out for each variable (subjective sleepiness, GO/NOGO, declarative memory, time estimation, wake-EEG activity, and salivary melatonin) with a repeated measure ANOVA (rANOVA) using a general linear model.

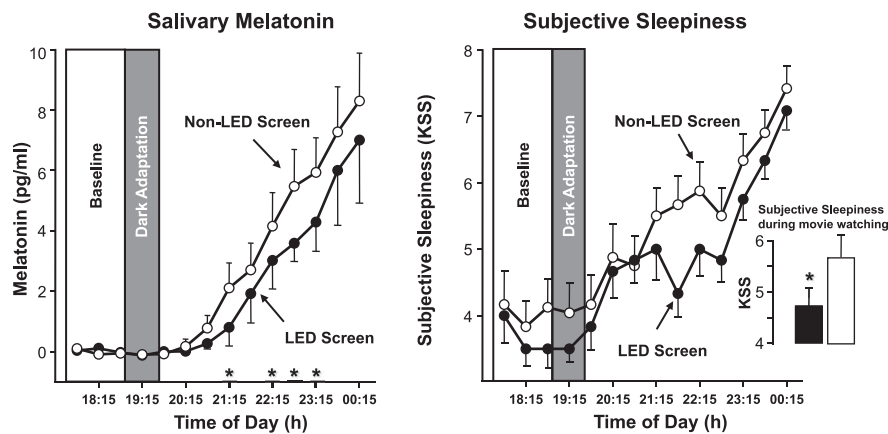


Fig. 2. Time course of salivary melatonin (left) and subjective sleepiness levels (right) during baseline, dark adaptation, and the screen exposure episode (30 min; mean values $\pm$ SE; $n = 13$). Inset, right: Karolinska Sleepiness Scale (KSS) levels during the presentation of the movie from 21:45–22:15 h. Results of the LED computer screen condition (●); data of the non-LED computer screen condition (○). *Significant post hoc comparisons when the interaction screen $\times$ time of day yielded significance.

Factors in this model included “screen type” (LED vs. non-LED-backlit computer screen), “time of day,” and for the wake-EEG activity, it included factor “derivation” (frontal, central, parietal, and occipital derivations).

P values were based on corrected degrees of freedom, but the original degrees of freedom are reported. Post hoc comparisons were performed using two-sided Duncan’s multiple range tests or paired t -tests. Since salivary melatonin and subjective sleepiness were also collected during baseline and dark adaptation, these data were included in the analyses. For all of the cognitive tasks, data from the 5-h computer light exposure were included in the analysis. For the analysis of visual comfort, the five time points when it was carried out were averaged to provide a global comparison between the two light settings.

RESULTS

Salivary melatonin levels followed during baseline, dark adaptation, and a 5-h screen exposure episode yielded a significant effect for screen ($F_{1,11} = 5.9$; $P = 0.045$), time of day ($F_{12,132} = 137.5$; $P < 0.0001$), and the interaction screen versus time of day ($F_{12,132} = 3.0$; $P = 0.041$; Fig. 2, left). The evening increase in endogenous melatonin levels was suppressed and rose later under exposure to the LED screen compared with the non-LED screen, significant at the following time points: 21:15 h, 22:15 h, 22:45 h, and 23:15 h (post hoc comparisons; P at least < 0.04). Subjective sleepiness ratings taken at the same time intervals as for the salivary melatonin assessments yielded a significant effect of time of

day ($F_{12,132} = 25.9$; $P < 0.0001$; Fig. 2, right) but no significant effect for screen or for the interaction screen versus time of day. However, a separate analysis of subjective sleepiness confined to the period when the participants were asked to take a break and watch the movie (see METHODS) revealed significantly lower sleepiness levels when the movie was displayed on the LED screen compared with the non-LED screen (Fig. 2, inset, right, $P < 0.04$). Analysis of the incidence of SEMs, an objective marker for sleepiness derived from the EOGs, revealed significant differences for main factors “screen” and “night,” although the interaction was not significant (screen: $F_{1,11} = 26.2$; $P < 0.0004$; time of day: $F_{11,44} = 7.8$; $P < 0.0001$; screen vs. time of day: not significant; Fig. 3, left). A two-way rANOVA for spectral EEG power density during the KDTs revealed a significant interaction between the factors screen and EEG derivation in the frequency bins ranging from 1 to 7 Hz (P at least 0.05). Thus EEG power density in these frequency bins were collapsed into a frequency band of 1–7 Hz and further analyzed with a three-way rANOVA, which yielded a significant factor for screen ($F_{1,20} = 6.7$; $P < 0.02$) and derivation ($F_{5,50} = 124.2$; $P < 0.0001$), a significant interaction screen versus EEG derivation ($F_{5,50} = 2.6$; $P < 0.05$), and a significant interaction EEG derivation versus time of day ($F_{20,200} = 2.9$; $P < 0.02$). Accordingly, exposure to the LED screen resulted in an attenuation of frontal EEG activity in the range 1–7 Hz (Fig. 3, right), which was not observed in other derivations.

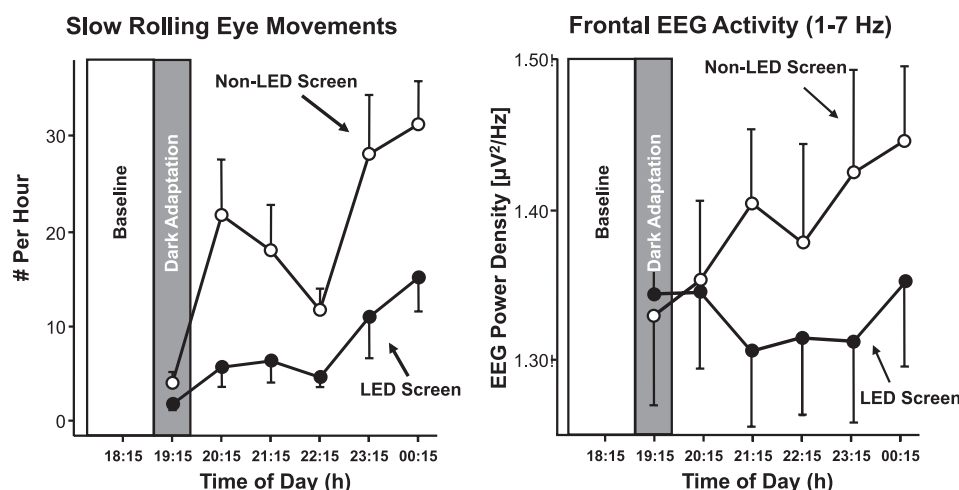


Fig. 3. Time course of the incidence of slow rolling eye movements derived from the electrooculogram (left) and frontal low-frequency EEG activity in the range of 1–7 Hz (right) during dark adaptation and the screen exposure episode (20:00–00:15 h; mean values $\pm$ SE; $n = 13$). Results of the LED computer screen condition (●); data of the non-LED computer screen condition (○).

Similarly, sustained attention (as indexed by reaction times in the GO/NOGO performance) was significantly improved in the LED screen compared with the non-LED screen condition, as indicated by a significant effect of screen ($F_{1,11} = 12.2$; $P < 0.04$), time of day ($F_{11,44} = 7.8$; $P < 0.02$), and the interaction term screen versus time ($F_{12,132} = 3.0$; $P = 0.041$; post hoc comparisons at 22:15 h and 23:15 h: $P < 0.04$; Fig. 4, *left*). The time course of the participant's performance in the time reproduction task for the 10-s interval is illustrated in Fig. 4, *middle*. A significant factor screen ($F_{1,11} = 5.8$; $P < 0.04$), time interval (5, 10, 15 s; $F_{2,22} = 81.4$; $P < 0.0001$), and the interaction screen versus time of day ($F_{3,33} = 3.7$; $P < 0.03$) were elicited. Post hoc testing revealed a significantly faster reproduction (i.e., a more pronounced underestimation of reproducible time intervals) under the LED screen condition at 21:30 h ($P < 0.04$). Similar results as for time reproduction were found for time production (data not shown). In the learning task, the percentage of correctly recognized old word pairs did not significantly differ between the LED and the non-LED screen (data not shown). Interestingly, volunteers identified more newly introduced word pairs during the recall session under the LED screen condition compared with the non-LED screen condition, as indicated by a significant interaction screen versus time of day ($F_{3,30} = 3.6$; $P < 0.03$), with a significant post hoc comparison at 21:30 h ($P < 0.02$; Fig. 4, *right*).

Finally, subjective ratings of screen quality and visual comfort did not reveal any differences between the two screens, whereas the non-LED screen tended to be considered to provide more glare and brightness ($P < 0.1$; see Supplemental figure).

DISCUSSION

Evening exposure to a LED-backlit computer screen resulted in attenuated salivary melatonin and sleepiness levels with a concomitant increase in cognitive performance associated with sustained attention and with working and declarative memory. Given that the measured illuminance levels and the subjective ratings of visual comfort of both LED and non-LED screens

were very similar, we assume that the disparity of the light's spectral composition emitted by the LEDs was the major factor contributing to the observed effects. Indeed, the LED-backlit screen emitted 3.32 times more light in the blue range between 440 and 470 nm than the non-LED-backlit screen. Our data correspond with previous observations that human circadian physiology and alertness levels are particularly sensitive to short-wavelength light (5, 6, 8, 9, 17, 18, 24, 28, 31). New in the current findings is that this effect occurs with nonmonochromatic light sources at relatively low light levels and that it impinges on sustained attention and performance during higher cognitive tasks involving working and declarative memory systems. Whether the observed faster estimation of time and the better recognition of new, interspersed word-pair items during the recall session are related to the enhanced alertness levels or represent an effect on brain structures involved in memory per se need to be further explored by functional imaging data. In any event, we could not find a significant correlation between alertness and memory performance levels, which rather points to a weak association between these two measures. Recent functional MRI experiments have shown that light independently affects alertness-related subcortical structures in the brain stem as well as higher-order cortical areas, including the fronto-polar, lateral prefrontal cortex, premotor cortex, intraparietal sulcus, insula, cerebellum, and thalamus, all of which are known to be involved in executive control and working memory (29). Interestingly, many of these brain structures play an important role in "duration estimation" or explicit timing in the supra-second range (10), as well as in performance requiring more long-term memory stores for declarative learning (21, 33). We may speculate that blue-enriched light emitted by the LED-backlit screen had beneficial effects on working memory demands, as indexed by a faster production and reproduction of time intervals in the supra-second range (5–15 s), as well as on declarative memory, as indexed by a better recognition of newly acquired word pairs. Thus our effects point to a superiority of the LED-backlight screen in terms of enhancing alertness and cognitive performance in the evening.

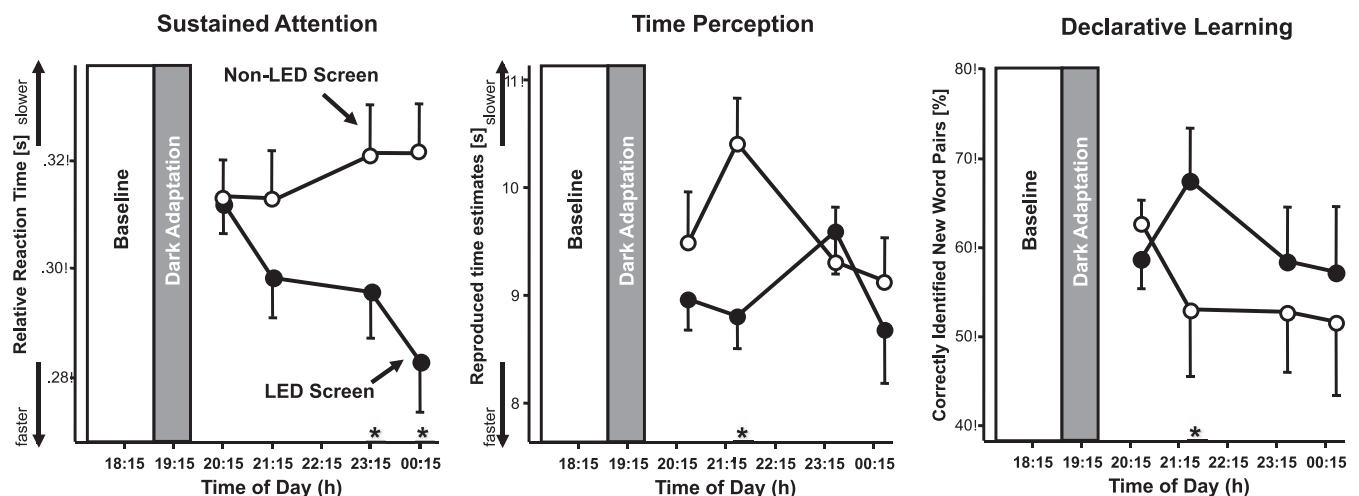


Fig. 4. Time course of cognitive performance during the screen exposure episode: sustained attention, as assessed by the GO/NOGO paradigm; working memory/attention, as assessed by a time perception task; and declarative memory, as assessed by a word-pair learning task (mean values $\pm$ SE; $n = 13$). Results of the LED computer screen condition (●); data of the non-LED computer screen condition (○). *Significant post hoc comparisons when the interaction screen $\times$ time of day yielded significance.

Since the endogenous evening rise in melatonin occurred later in the LED-backlight condition, the circadian pacemaker located in the suprachiasmatic nuclei most likely received a longer “day” signal, which could have induced a phase delay. Although, we did not assess the circadian phase shift the day after light exposure, this shift would be predicted to be moderate (ca. 30 min).

However, any delay in the melatonin rise has consequences for the parallel rise in sleep propensity. The increased alertness is useful for working but late at night, not for falling asleep. Thus the findings are double edged. The exposure duration used in our study (i.e., a single session of 5 h) was rather modest. When one considers a recent national survey in the United States, 8- to 18-year-olds devote today an average of 7 h and 38 min to using entertainment media across a typical day [more than 53 h/wk (25)]. Children and adolescents spend their leisure time in front of gaming consoles, televisions, and cell phones, and in fact, many adolescents do “multi-screening,” which means that they use more than one screen at a time. If one assumes that they spend part of this time in front of a computer screen, particularly during the evening, this behavior and our results here could contribute to answering the question of why an increasing number of sleep problems, particularly delayed sleep phase, are reported for this age group (22). Indeed, we could recently show that evening exposure to monochromatic light at 464 nm can significantly reduce EEG slow-wave activity (SWA) during non-rapid eye movement (NREM) sleep in the first sleep cycle, which was compensated by an intra-night rebound of SWA in the last NREM sleep episode (20).

If one evening can result in later sleep times, as might be predicted from our data, then continued daily computer use may delay sleep times more often. Whether computer screens contribute to a late chronotype requires further investigation (13, 15). Indeed, although the chronic use of LED screens immediately prior to sleep may result in circadian phase shifts and alterations in sleep, we have insufficient studies that have looked at these long-term effects. Thus possible detrimental effects of LED screens are as yet unclear. Our data suggest that rather short exposures (5 h) at low-light intensities (<100 lux, at a distance of 50 cm) with a relative high amount of short-wavelength LED light can evoke circadian melatonin responses and behavioral changes, as measured in alertness levels and cognitive performance. However, this should be viewed with caution, since the spectral profiles of the two screens varied in ways other than just short-wavelength emission. Another study limitation is the fact that this study was conducted only on men. This was mainly due to the fact that menstrual phase and use of oral contraceptives could alter, for instance, melatonin secretion [for a review, see ref. (2)]. Future studies are needed to investigate these effects in women. Furthermore, technical progress is needed to build LED devices, which may adapt their emitted light spectrum dynamically according to the time of day, such as the f.lux program (stereopsis.com), and even better, to the user's sleep-wake timing. Ideally, computer screens would therefore not only be an interface for electronic information exchange but also help to provide essential light information to the circadian timing system by positively supporting circadian alignment with individually timed backlight changes of the spectral profile of the computer screen.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank Claudia Renz, Giovanni Balestrieri, Marie-France Dattler, and Marielle Kappeler for their help in data acquisition, Dr. Sarah Chellappa for critical comments on the manuscript, and the volunteers for participating.

GRANTS

This study was supported by grants from the Daimler-Benz-Foundation (ClockKWORK) and by the EU 6th Framework Project EUCLOCK (#018741).

DISCLOSURES

No conflicts of interest, financial or otherwise, are declared by the author(s).

REFERENCES

- Åkerstedt T, Gillberg M. Subjective and objective sleepiness in the active individual. *Int J Neurosci* 52: 29–37, 1990.
- Baker FC, Driver HS. Circadian rhythms, sleep, and the menstrual cycle. *Sleep Med* 8: 613–622, 2007.
- Barry RJ, de Pascalis V, Hodder D, Clarke AR, Johnstone SJ. Preferred EEG brain states at stimulus onset in a fixed interstimulus interval auditory oddball task, and their effects on ERP components. *Int J Psychophysiol* 47: 187–198, 2003.
- Boyce PR. Lighting research for interiors: the beginning of the end or the end of the beginning. *Lighting Res Technol* 36: 283–294, 2004.
- Brainard G, Hanifin JP, Rollag MD, Greeson J, Byrne B, Glickman G, Gerner E, Sanford B. Human melatonin regulation is not mediated by the three cone photopic visual system. *J Clin Endocrinol Metab* 86: 433–436, 2001.
- Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E, Rollag MD. Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *J Neurosci* 21: 6405–6412, 2001.
- Cajochen C, Dijk DJ, Borbély AA. Dynamics of EEG slow-wave activity and core body temperature in human sleep after exposure to bright light. *Sleep* 15: 337–343, 1992.
- Cajochen C, Münch M, Kobialka S, Kräuchi K, Steiner R, Oelhafen P, Orgül S, Wirz-Justice A. High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation and heart rate to short wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab* 90: 1311–1316, 2005.
- Chellappa SL, Steiner R, Blattner P, Oelhafen P, Götz T, Cajochen C. Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: can blue-enriched light keep us alert? *PLoS One* 6: 2011.
- Coull JT, Cheng RK, Meck WH. Neuroanatomical and neurochemical substrates of timing. *Neuropsychopharmacology* 36: 3–25, 2011.
- Gais S, Mölle M, Helms K, Born J. Learning-dependent increases in sleep spindle density. *J Neurosci* 22: 6830–6834, 2002.
- Gillberg M, Kecklund G, Åkerstedt T. Relations between performance and subjective ratings of sleepiness during a night awake. *Sleep* 17: 236–241, 1994.
- Higuchi S, Motohashi Y, Liu Y, Ahara M, Kaneko Y. Effects of VDT tasks with a bright display at night on melatonin, core temperature, heart rate, and sleepiness. *J Appl Physiol* 94: 1773–1776, 2003.
- Khalsa SBS, Jewett ME, Cajochen C, Czeisler CA. A phase response curve to single bright light pulses in human subjects. *J Physiol* 549: 945–952, 2003.
- Kohyama J. A newly proposed disease condition produced by light exposure during night: asynchronization. *Brain Dev* 31: 255–273, 2009.
- Lahl O, Pietrowsky R. EQUIWORD: a software application for the automatic creation of truly equivalent word lists. *Behav Res Methods* 38: 146–152, 2006.
- Lockley SW, Brainard GC, Czeisler CA. High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab* 88: 4502–4505, 2003.
- Lockley SW, Evans EE, Scheer FA, Brainard GC, Czeisler CA, Aeschbach D. Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans. *Sleep* 29: 161–168, 2006.
- Monteleone P, Martiadis V, Maj M. Circadian rhythms and treatment implications in depression. *Prog Neuropsychopharmacol Biol Psychiatry*; doi: 10.1016/j.physleth.2003.10.071.
- Münch M, Kobialka S, Steiner R, Oelhafen P, Wirz-Justice A, Cajochen C. Wavelength-dependent effects of evening light exposure on sleep architecture and sleep EEG power density in men. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 290: R1421–R1428, 2006.

21. **Poldrack RA, Gabrieli JD.** Functional anatomy of long-term memory. *J Clin Neurophysiol* 14: 294–310, 1997.
22. **Reid GJ, Huntley ED, Lewin DS.** Insomnias of childhood and adolescence. *Child Adolesc Psychiatr Clin N Am* 18: 979–1000, 2009.
23. **Reid KJ, Zee PC.** Circadian rhythm sleep disorders. *Handb Clin Neurol* 99: 963–977, 2011.
24. **Revell VL, Arendt J, Fogg LF, Skene DJ.** Alerting effects of light are sensitive to very short wavelengths. *Neurosci Lett* 399: 96–100, 2006.
25. **Rideout VJ, Foehr UG, Donald FR.** *Generation M2: Media in the Lives of 8- to 18-Year-Olds*. Menlo Park, CA: Kaiser Family Foundation, 2010, p. 1–79.
26. **Schmidt C, Peigneux P, Muto V, Schenkel M, Knoblauch V, Münch M, De Quervain DJF, Wirz-Justice A, Cajochen C.** Encoding difficulty promotes postlearning changes in sleep spindle activity during napping. *J Neurosci* 26: 8976–8982, 2006.
27. **Schwartz JR, Roth T.** Shift work sleep disorder: burden of illness and approaches to management. *Drugs* 66: 2357–2370, 2006.
28. **Thapan K, Arendt J, Skene DJ.** An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J Physiol* 535: 261–267, 2001.
29. **Vandewalle G, Maquet P, Dijk DJ.** Light as a modulator of cognitive brain function. *Trends Cogn Sci* 13: 429–438, 2009.
30. **Wackermann J, Spati J.** Asymmetry of the discrimination function for temporal durations in human subjects. *Acta Neurobiol Exp (Wars)* 66: 245–254, 2006.
31. **Warman VL, Dijk DJ, Warman GR, Arendt J, Skene DJ.** Phase advancing human circadian rhythms with short wavelength light. *Neurosci Lett* 342: 37–40, 2003.
32. **Weber JM, Schwander JC, Unger I, Meier D.** A direct ultrasensitive RIA for the determination of melatonin in human saliva: comparison with serum levels. *J Sleep Res* 26: 757, 1997.
33. **Winocur G, Moscovitch M, Bontempi B.** Memory formation and long-term retention in humans and animals: convergence towards a transformation account of hippocampal-neocortical interactions. *Neuropsychologia* 48: 2339–2356, 2010.
34. **Zavada A, Gordijn MC, Beersma DG, Daan S, Roenneberg T.** Comparison of the Munich Chronotype Questionnaire with the Horne-Ostberg's Morningness-Eveningness Score. *Chronobiol Int* 22: 267–278, 2005.



OPINION

WILEY Global Change Biology

Why artificial light at night should be a focus for global change research in the 21st century

Thomas W. Davies^{1,2}  | Tim Smyth³

¹School of Ocean Sciences, Bangor University, Menai Bridge, UK

²Centre for Geography, Environment and Society, University of Exeter, Penryn, UK

³Plymouth Marine Laboratory, Plymouth, Devon, UK

Correspondence

Thomas W. Davies, School of Ocean Sciences, Bangor University, Menai Bridge, UK.

Email: thomas.davies@exeter.ac.uk

Funding information

European Regional Development Fund

Abstract

The environmental impacts of artificial light at night have been a rapidly growing field of global change science in recent years. Yet, light pollution has not achieved parity with other global change phenomena in the level of concern and interest it receives from the scientific community, government and nongovernmental organizations. This is despite the globally widespread, expanding and changing nature of night-time lighting and the immediacy, severity and phylogenetic breadth of its impacts. In this opinion piece, we evidence 10 reasons why artificial light at night should be a focus for global change research in the 21st century. Our reasons extend beyond those concerned principally with the environment, to also include impacts on human health, culture and biodiversity conservation more generally. We conclude that the growing use of night-time lighting will continue to raise numerous ecological, human health and cultural issues, but that opportunities exist to mitigate its impacts by combining novel technologies with sound scientific evidence. The potential gains from appropriate management extend far beyond those for the environment, indeed it may play a key role in transitioning towards a more sustainable society.

KEYWORDS

artificial light at night, ecology, global change, human health, human–environment interrelationships

INTRODUCTION

While artificial light at night (ALAN) has been a long established man-made disturbance (Longcore & Rich, 2004), the number of studies documenting its ecological and human health impacts has grown dramatically in the last decade (Figure 1). Collectively, this body of research now highlights the pervasiveness of ALAN's impacts across a broad array of biomes, ecosystems, species and behaviours. The measured biological responses occur at intensities and spectra of artificial light that are currently encountered in the environment, and the global distribution of night-time lighting means that it is likely already having widespread impacts in marine, freshwater and terrestrial habitats around the world.

While ALAN research has gained notable momentum in recent years, it is yet to achieve notoriety among environmental scientists as a driver of global change. Here, we argue that ALAN should be a focus for global change research in the 21st century. Our argument

is broken down into 10 points that highlight the global extent of ALAN, the geographic scale of its influence, the potential to reverse its environmental impacts, the rise of new human–environment conflicts with emerging lighting technologies, its evolutionary novelty, the diverse array of species now known to be affected, the extreme sensitivity of organisms to light, impacts on human health, cultural impacts on human–environment interrelationships, and the feasibility of solutions. While we do not assert that ALAN is more important than other global change phenomena, we draw comparisons where they help highlight the need for greater parity of concern.

1 | GLOBALLY WIDESPREAD

As with greenhouse gas emissions, ALAN is a globally widespread environmental pollutant. It is estimated that 23% of the land

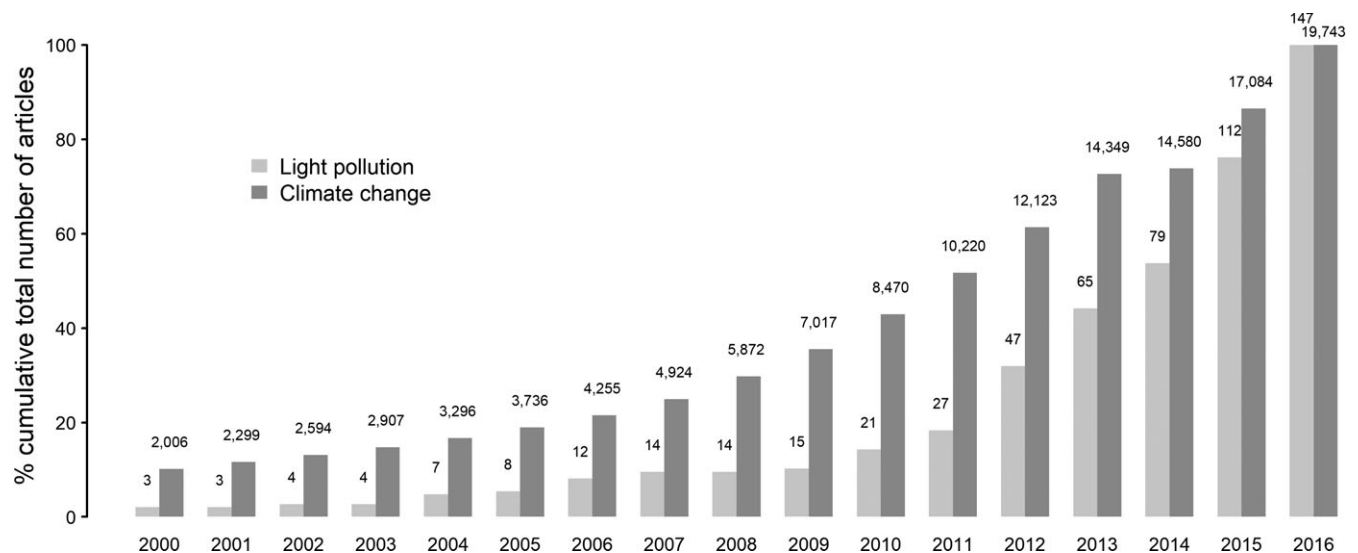


FIGURE 1 The trend in research outputs associated with light pollution and climate change since the year 2000. Bar heights represent the cumulative number of articles expressed as a percentage of the total number of articles published by the end of 2016; numbers are the cumulative number of articles published by the end of each year. Note that the total number of articles does not reflect the total number published in the research area, only the number returned from the search. The data were collected from a Web of Science search for phrases in article titles. The search phrases used for light pollution research outputs were “Light pollution” OR “Artificial Light at Night” OR “Nighttime lighting” OR “Night-time lighting” OR “Night time lighting” OR “Street Lighting” OR “LED lighting” OR “Light-emitting diode lighting.” The search phrase for climate change was “Climate change” and results were not refined by research area. The search for articles on light pollution was refined by research areas: (Plant Sciences or Ornithology or Psychology Multidisciplinary or Environmental Sciences or Evolutionary Biology or Physics Applied or Entomology or Engineering Environmental or Ecology or Urban Studies or Fisheries or Biodiversity Conservation or Biology or Physics Multidisciplinary or Zoology or Oceanography or Geography Physical or Geography or Remote Sensing or Physiology or Marine Freshwater Biology or Public Environmental Occupational Health)

surface between 75°N and 60°S (Falchi et al., 2016) is exposed to artificial skyglow (artificial light that is scattered in the atmosphere and reflected back to the ground). This is comparable to the area of global ice-free land converted to either pasture or cropland, estimated to be 35% in the year 2000 (Klein Goldewijk, Beusen, van Drecht, & De Vos, 2011). The degree of exposure increased in all global terrestrial ecosystems between 2008 and 2012, with those important for biodiversity conservation often most affected (Bennie, Duffy, Davies, Correa-Cano, & Gaston, 2015). Exposure to ALAN is not limited to terrestrial environments, with current best estimates indicating that 22% of the world's coastal regions (Davies, Duffy, Bennie, & Gaston, 2014) are experiencing some degree of artificial illumination and 20% of marine-protected areas are exposed across their entire range (Davies, Duffy, Bennie, & Gaston, 2016). The amount of artificial light is also increasing in 13,061 terrestrial protected areas across Europe, Asia and South and Central America (Gaston, Duffy, & Bennie, 2015) and 1,687 (14.7%) of the world's marine-protected areas (Davies et al., 2016). Given that more than 95% of global population increases are projected to occur in the cities of economically developing countries over the next 50 years (Grimm et al., 2008), and levels of light pollution are closely associated with population density and economic activity (Gallaway, Olsen, & Mitchell, 2010); ALAN will continue to expand both in spatial extent and intensity throughout the 21st century without intervention.

2 | SPHERE OF INFLUENCE

Artificial light arises from point sources (municipal, industrial, commercial and residential), giving the impression that its impacts on the environment are highly localized. Indeed, the majority of studies into the ecological impacts of ALAN quantify responses to direct lighting (Gaston, Visser, & Hölker, 2015). Artificial skyglow increases the sphere of ALAN's potential influence far beyond a patch of habitat in the vicinity of a street light (Falchi et al., 2016; Kyba & Hölker, 2013). Numerous taxa are adapted to make use of spatial and temporal patterns of natural sky brightness at intensities equivalent to or less than those created by artificial skyglow (Dacke, Baird, Byrne, Scholtz, & Warrant, 2013; Last, Hobbs, Berge, Brierley, & Cottier, 2016; Moore, Pierce, Walsh, Kvalvik, & Lim, 2000; Naylor, 1999; Warrant & Dacke, 2016), suggesting that lights in urban centres will have impacts on environments tens to hundreds of kilometres away. A dung beetle navigating its landscape using the Milky Way could, for example, become disorientated by artificial skyglow from a city tens or perhaps even hundreds of kilometres away (Kyba & Hölker, 2013), an effect comparable to a moth becoming disorientated by a street light hundreds of metres away (van Grunsven, Lham, van Gefen, & Veenendaal, 2014).

While ALAN can be misconstrued as being a highly localized anthropogenic stressor, climate warming is likewise misrepresented as globally widespread in its occurrence. Like ALAN, ecologically

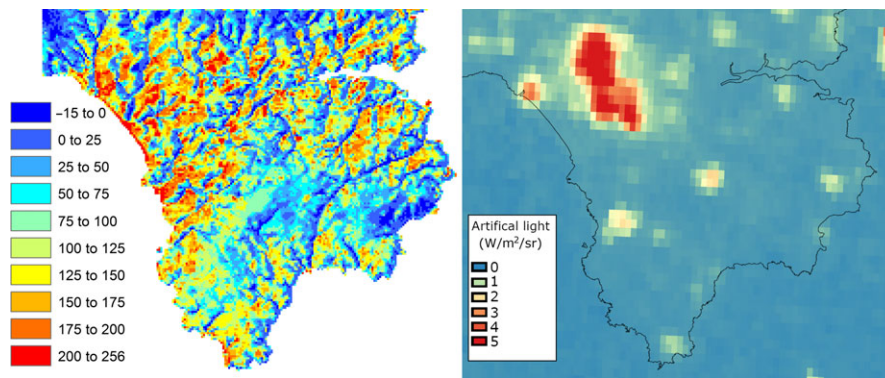


FIGURE 2 A comparison of fine-scale spatial variability in environmental warming and artificial light at night on the Lizard peninsula, Cornwall, UK. (a) The increase in the number of growing degree days (a measure of change in growing season length expressed in °C Days) between 1977 and 2014 (100 m resolution). Adapted with permission from Maclean et al. (2016). (b) The distribution of artificial light across the same area (750 m resolution) recorded from the VIIRS sensor on board the Suomi NPP satellite

relevant warming occurs at more localized spatial scales (Hannah et al., 2014) (Figure 2) and is influenced by variable topographical features such as slope and aspect that create refuges where rates of warming are reduced (Bennie, Huntley, Wiltshire, Hill, & Baxter, 2008; Maclean, Suggitt, Wilson, Duffy, & Bennie, 2016). The ecological impacts of climate change — like light pollution — are therefore likely to be spatially heterogeneous for organisms with low mobility, but more widespread for taxa that depend on large-scale movements for their survival and reproduction. In the case of both stressors, population impacts on the former species are manifest foremost through the loss and fragmentation of suitable habitat (Hannah et al., 2014), while impacts on the latter species are manifest via direct effects on population demography (Gaston & Bennie, 2014).

3 | LAG EFFECTS

Abating future rises in global temperatures constitutes one of the most significant challenges facing humanity in the 21st century. Yet even if all fossil fuel combustion ceased with immediate effect, the recovery of atmospheric CO₂ concentrations, global temperatures, ocean pH and oxygen concentrations to preindustrial levels would take hundreds to thousands of years (Frölicher & Paynter, 2015; Frölicher, Winton, & Sarmiento, 2014; Mathesius, Hofmann, Caldeira, & Schellnhuber, 2015), and there is the very real possibility that temperatures would continue to rise in the medium term (Frölicher et al., 2014). In contrast, globally widespread artificial light can be “switched off” instantaneously. There would be no lag effect on the physical environment following such an event, allowing the biological environment to immediately begin the recovery process. While such a scenario would likely prove controversial, recent technological advances present tangible ways of mitigating the ecological impacts of artificial light at night (see reason 10). Failure to abate the environmental consequences of a man-made disturbance using available viable solutions would not inspire confidence in our ability to solve the apparently insurmountable challenges posed by global climate change phenomena.

4 | THE RISE OF LEDs

Light-Emitting Diodes (LEDs) have grown from a 9% share of the lighting market in 2011 to 45% in 2014 and are forecast to reach 69% by 2020 (Zisis & Bertoldi, 2014). Their rising popularity stems from the variety of colours that LEDs can be tailored to produce, their improved energy efficiency over alternative electric light sources, and ability to produce “white” light that is aesthetically pleasing and provides enhanced visual performance (Pimputkar, Speck, Denbaars, & Nakamura, 2009; Schubert & Kim, 2005). While LEDs are often advocated for their potential to reduce global CO₂ emissions and the ability to tailor their spectra to avoid unwanted environmental impacts (see “Feasibility of solutions”), environmental scientists and human health experts have raised concerns about the broad-spectrum light (Davies, Bennie, Inger, De Ibarra, & Gaston, 2013; MacGregor, Pocock, Fox, & Evans, 2014) and prominent short wavelength peak (Haim & Portnov, 2013; Haim & Zubidat, 2015) that the commonly used white models emit (Figure 3).

Firstly, the broad range of wavelengths emitted by white LEDs likely enables organisms to perform colour-guided behaviours at night that were previously only possible during the day (Davies et al., 2013). A range of intra- and interspecific interactions could be affected including foraging (e.g. seeking nectar-rich flowers), predation (ability to locate and successfully capture prey), sexual communication (ability to locate, identify and assess the fitness of conspecifics through visual displays) and camouflage (ability to avoid detection by predators). Nocturnal species may find themselves competing for resources with diurnal species where such interactions had previously not existed (MacGregor et al., 2014), and differences in the sensitivity of animal visual systems to white LED light spectra could change the balance of species interactions (Davies et al., 2013). Some alternative lighting technologies also emit light across a broad range of wavelengths (e.g. Metal Halide and Mercury Vapour lighting, Figure 3); however, the energy efficiency of LEDs makes them the lighting of choice in the 21st century, and as such research should focus on how any unforeseen deleterious impacts can best be mitigated.

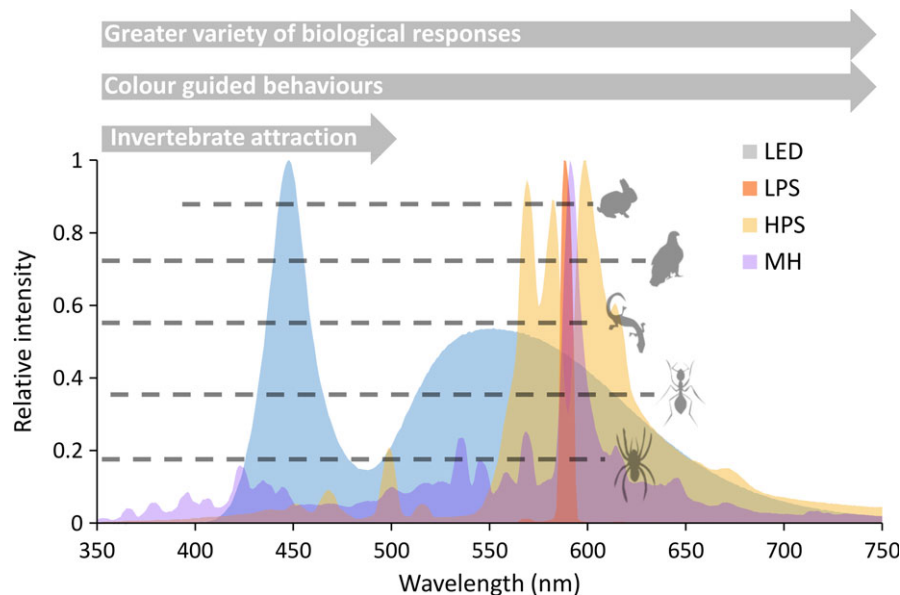


FIGURE 3 The potential ecological impacts of white Light-Emitting Diode lighting compared to other light sources. Spectral power distributions are given for white Light-Emitting Diode (LED), Low-Pressure Sodium (LPS), High-Pressure Sodium (HPS) and Metal Halide (MH) lights recorded using a MAYA 200 pro spectrometer from street lighting in Cornwall. The amount of light at each wavelength is standardized to relative intensity (radiant energy divided by the maximum radiant energy recorded at any wavelength for each light source) so that the relative distribution of radiant energy across the light spectrum can be compared for each light source. Grey arrows represent the wavelength range over which different types of biological response are expected/recorded. Dashed lines represent the range of wavelengths over which mammal, bird, reptile, insect and arachnid visual systems can detect light [adapted from Davies et al. (2013)]

Secondly, the short wavelength peak emitted by white LEDs coincides with the wavelengths to which many biological responses are known to be sensitive. Many invertebrate behaviours (Cohen & Forward, 2009; Gorbunov & Falkowski, 2002; Haddock, Moline, & Case, 2010; van Langevelde, Ettema, Donners, Wallisdevries, & Groenendijk, 2011) and the melatonin response (West et al., 2011) are sensitive to short wavelengths of light (between 350 and 500 nm), and some studies have demonstrated that white LED lighting has a greater impact on short wavelength sensitive responses compared to alternative lighting technologies (Pawson & Bader, 2014).

Thirdly, because LEDs illuminate a broad range of wavelengths, they have the potential to affect a greater variety of biological responses that are sensitive to specific wavelengths of light. To give one example, while many invertebrate behaviours and the melatonin response are most sensitive to short wavelength light, the phytochrome system in plants—which is associated with the timing of flowering—is sensitive to red/far red light (660 and 720 nm) (Bennie, Davies, Cruse, & Gaston, 2016). Using broad wavelength light sources, such as white LEDs, therefore risks affecting more biological responses across a greater variety of taxa than using narrow wavelength light sources, such as low-pressure sodium lighting (Gaston, Davies, Bennie, & Hopkins, 2012).

Fourthly, the improved energy efficiency offered by LEDs may encourage growth in the amount of artificial light produced around the world. This “rebound effect” can be observed in historical lighting trends (see Kyba, Hänel, & Hölker, 2014) and partly explains why

aesthetic and decorative lighting installations are now increasingly seen in municipal centres, on monuments, bridges and waterfront developments.

Finally, improvements in the energy efficiency of LED lighting coupled with the production efficiency of solar cells have resulted in a rapid growth in off-grid lighting installations, typically in remote regions containing previously artificial light naive ecosystems (Adkins, Eapen, Kaluwile, Nair, & Modi, 2010; Dalberg Global Development Advisors 2013; Mills & Jacobson, 2007). The greatest ecological impacts of ALAN over the next 50 years will likely occur in these previously artificial light-naive regions, with an ecology not previously shaped by night-time lighting.

5 | EVOLUTIONARY NOVELTY

Organisms have evolved with large-scale fluctuations in atmospheric CO₂, climate temperatures and ocean pH throughout history while sudden changes to natural light regimes are unprecedented over evolutionary time scales. The harmonic movements of the earth, moon and sun provide reliable cues to which many biological events are now highly attuned (Kronfeld-Schor et al., 2013).

The ability of organisms to rapidly adapt to the introduction of ALAN through behavioural, genetic or epigenetic changes is likely to be far more limited than for climate warming due to the unprecedented nature of this change (Swaddle et al., 2015). Furthermore, the scattered growth of artificial lighting around the world is a significant

barrier to predicting where organisms will be able to seek out suitably dark habitats in the future and identifying where to allocate dark corridors that enable such migrations to happen. Although challenging, identifying where species need to go to survive climate warming, and how they get there, is made simpler by the predictability of regional climatic shifts (e.g. poleward migrations by land and sea and upward migrations in high-altitude regions) (Hannah et al., 2007).

6 | DIVERSITY OF BIOLOGICAL RESPONSES

Artificial light at night is now known to cause a plethora of environmental impacts from altering organism physiology to changing the structure of ecological communities. The diversity of taxa affected continues to grow and now includes birds (Dominoni, 2015; Kempenaers, Borgström, Loës, Schlicht, & Valcu, 2010), bats (Rydell, 1992; Stone, Jones, & Harris, 2009), sea turtles (Kamrowski, Limpus, Moloney, & Hamann, 2012; Witherington, 1992), marsupials (Robert, Lesku, Partecke, & Chambers, 2015), rodents (Bird, Branch, & Miller, 2004), anurans (Hall, 2016), freshwater and marine fish (Becker, Whitfield, Cowley, Järnegen, & Næsje, 2012; Brüning, Hölker, Franke, Preuer, & Kloas, 2015; Riley, Davison, Maxwell, & Bendall, 2013), moths (Frank, 1988; Wakefield, Stone, Jones, & Harris, 2015), beetles, spiders, harvestmen, woodlice and ants (Davies, Bennie, & Gaston, 2012; Davies et al., 2017), branchiopod (Moore et al., 2000), amphipod (Davies, Coleman, Griffith, & Jenkins, 2015; Davies et al., 2012; Navarro-Barranco & Hughes, 2015) and copepod (Davies et al., 2015) crustaceans, polychaete worms, colonial ascidians and hydrozoans (Davies et al., 2015), corals (Kaniewska, Alon, Karako-Lampert, Hoegh-Guldberg, & Levy, 2015), and terrestrial plants (Bennie, Davies, Cruse, Inger, & Gaston, 2015; Bennie et al., 2016; Ffrench-Constant et al., 2016). The documented impacts include those on animal communication (van Gefen et al., 2015; Kempenaers et al., 2010), reproductive development (Dominoni, Quetting, & Partecke, 2013; Hansen, Stefansson, & Taranger, 1992), the timing of reproduction (Kaniewska et al., 2015; Robert et al., 2015), orientation (Frank, 1988; Witherington, 1992), habitat selection (Davies et al., 2012, 2015), predator avoidance (Wakefield et al., 2015), predation pressure (Becker et al., 2012; Bolton et al., 2017; Rydell, 1992), circadian disruption (Brüning et al., 2015; Raap, Pinxten, & Eens, 2015, 2016), plant phenology (Bennie et al., 2016; Bennie, Davies, et al., 2015; Ffrench-Constant et al., 2016) and ecosystem services (Knop et al., 2017; Lewanzik & Voigt, 2014).

While those impacts on survival and reproductive success highlight that ALAN is likely causing widespread population losses for a variety of taxa, no population-level effects have so far been reliably demonstrated. This is in part because satellite images of night-time lights are not available in sufficiently high spatial resolution for inferences to be drawn regarding impacts on species populations that can be variable on the scale of tens to hundreds of metres (Elvidge et al., 2007). Disentangling the effects of street and residential lighting from those of urbanization and land use change is challenging since all of these explanatory variables likely contribute to

population declines but all covary. Analyses using higher resolution images from the international space station (capable of identifying individual roads) may yield further insights, but tend to be focused on cities, preventing comparisons from being drawn across sufficiently large spatial scales. Recent developments in hemispherical photography allow “biologically relevant” artificial skyglow to be mapped from ground level across thousands of square kilometres (Luginbuhl et al., 2009; Zoltan, 2010), better enabling ecologists to quantify its impacts on populations of organisms that utilize celestial patterns of sky brightness, but perhaps not the population effects of direct lighting. Techniques to model the distribution of artificial light across towns and cities have also been developed (Bennie, Davies, Inger, & Gaston, 2014); however, such models can be computationally expensive and have not yet been applied to the question of whether direct lighting has an impact on organism populations. Before After Control Impact (BACI) experiments have the potential to provide insights into the long-term responses of sessile species populations and those mobile taxa with <1 km home ranges; however, the finances and time required to implement them at appropriate spatial and temporal scales make this approach less feasible in a limited funding environment. For now, quantifying the population-level impacts of ALAN remains one of the most important and challenging problems facing ecologists working in this area.

7 | SENSITIVITY OF BIOLOGICAL RESPONSES

Many organisms are extremely sensitive to natural light, utilizing light cues as dim as the moon and the Milky Way to orientate themselves, navigate landscapes and identify conspecifics and resources at night (Dacke et al., 2013; Last et al., 2016; Ugolini, Boddi, Mercatelli, & Castellini, 2005; Warrant & Dacke, 2016). Perhaps, most striking is the growing number of documented responses to white LEDs in marine systems (Bolton et al., 2017; Davies et al., 2015; Gorbunov & Falkowski, 2002; Navarro-Barranco & Hughes, 2015), where species are both adapted to utilize short wavelengths that penetrate deeper in seawater and are incredibly sensitive to natural light. Examples of this extreme sensitivity include copepods (*Calanus* sp.) that undergo diel vertical migration to depths of 50 m guided only by variations in moonlight intensity during the arctic winter (Båtnes, Miljeteig, Berge, Greenacre, & Johnsen, 2013; Last et al., 2016); sessile invertebrate larvae that move and identify suitable settlement locations guided by light levels equivalent to moonless overcast nights (Crisp & Ritz, 1973; Thorson, 1964) and polychaete worms, corals and echinoderms that synchronize broadcast spawning events using monthly and annual variations in lunar light intensity (Naylor, 1999). Many of these responses are clearly sensitive enough to be affected both by direct lighting and artificial skyglow (Figure 4), and indeed such impacts have been demonstrated for zooplankton diel vertical migration in freshwater ecosystems (Moore et al., 2000). Given the spatial extent of artificial skyglow in coastal regions (Davies et al., 2014; Falchi et al., 2016), the disproportionate

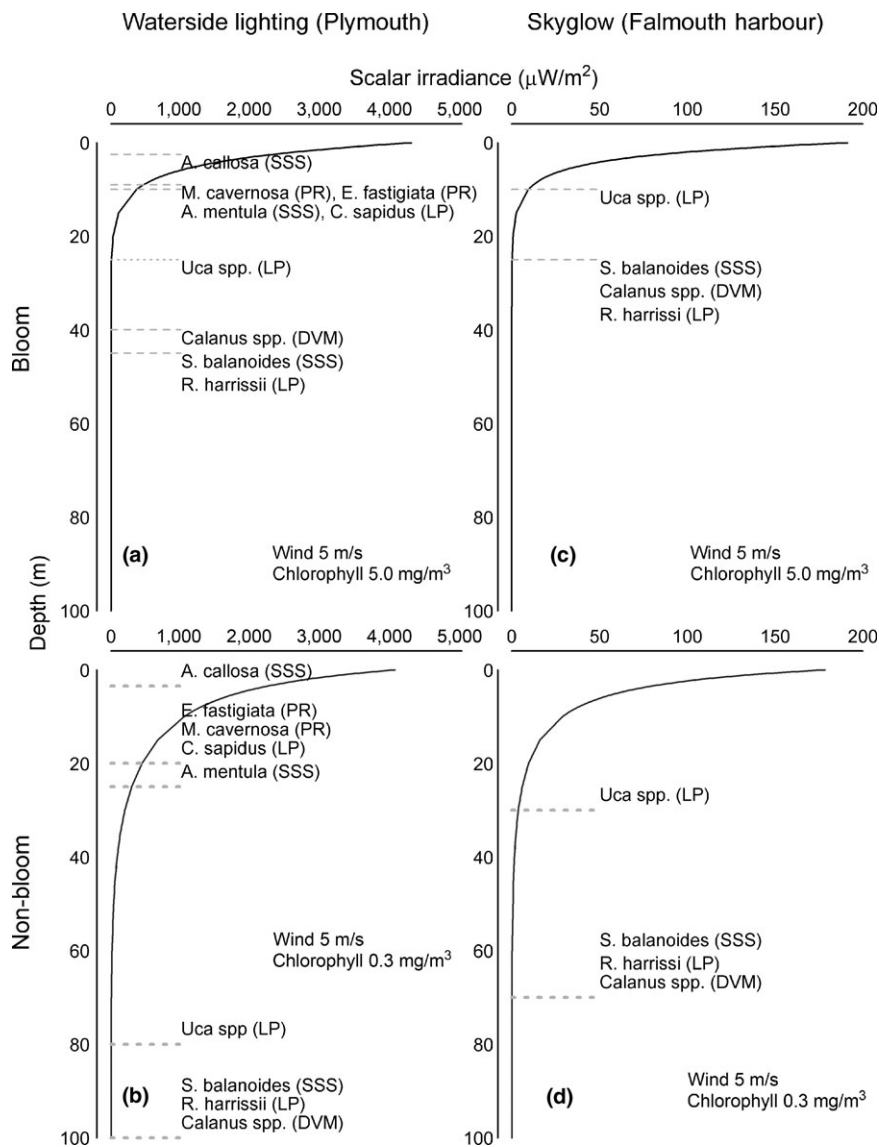


FIGURE 4 The sensitivity of marine invertebrates to direct artificial light and artificial skyglow. Solid lines represent the attenuation of scalar irradiance (between 400 and 700 nm) with depth estimated using radiative transfer models under winter (a & c; Chlorophyll = 0.3 mg m⁻³ uniform profile, wind = 5 m/s) and spring (b & d; Chlorophyll = 5 mg m⁻³ uniform profile, wind = 5 m/s) water column properties. Models of scalar irradiance with depth are derived from spectral power distribution recorded from the spring high tide mark under a white LED street light on the Barbican in Plymouth (a & b), and artificial skyglow from predominantly white Metal Halide spectra recorded above Falmouth Harbour (c & d). Grey dashed lines indicate the maximum depth at which sufficient artificial light is available to perform species behaviours. SSS = Settlement Site Selection; PR = Polyp Retraction; LP = Larval Phototaxis; DVM = Diel Vertical Migration. Sensitivities to white light were calculated from experimentally derived values in existing literature (Båtnes et al., 2013; Crisp & Ritz, 1973; Forward, Cronin, & Stearns, 1984; Gorbunov & Falkowski, 2002; Svane & Dolmer, 1995; Tankersley, Mckelvey, & Forward, 1995; Young & Chia, 1982)

importance of these regions for global biogeochemical cycles [coastal zones account for 30% of global ocean primary production but only 10% of global ocean surface area (Wollast, 1998)], and the role of diel vertical migration in maintaining these cycles (Hays, 2003), it is not unreasonable to surmise that ALAN could have detectable effects on ocean carbon and nutrient budgets in the near future.

8 | IMPACTS ON HUMAN HEALTH

In 2007, the World Health Organisation classified shift work that disrupted human circadian rhythms as a probable human carcinogen (International Agency for Research on Cancer, 2007). While this classification is primarily associated with shift work, exposure to ALAN has been linked to a variety of health disorders in people through the same circadian disruption mechanism. These include sleep disorders, depression, obesity and the progression of some cancers (Cajochen et al., 2011; Chang, Aeschbach, Duffy, & Czeisler, 2014; Haim & Portnov,

2013; Keshet-Sitton, Or-Chen, Yitzhak, Tzabary, & Haim, 2015). The prominent peak of blue wavelength light emitted by LEDs is of increasing concern since it occurs at the most effective frequency for suppressing the production of melatonin (Haim & Zubidat, 2015; West et al., 2011), a hormone released by the pineal gland that regulates sleep wake cycles and acts as an antioxidant. Over the last decade, LEDs have become a ubiquitous feature of human life and can be found in street, residential, commercial and aesthetic lighting installations, laptops, televisions, e-readers, smart phones and tablets. Late evening exposure to LED light from handheld devices has been linked to circadian disruption of sleep wake cycles and alertness and cognitive performance during the day (Cajochen et al., 2011; Chang et al., 2014).

The extent to which outdoor lighting impacts human health is yet to be reliably determined. While epidemiological studies have found correlations between the amount of outdoor lighting and some health effects (Kloog, Haim, Stevens, Barchana, & Portnov, 2008; Koo et al., 2016), as with ecological patterns, they are limited

by the inferences that can be drawn from satellite images (Defence Meteorological Satellite Programme Operational Line Scan) with insufficient spatial resolution (5 km) to differentiate exposure to ALAN from other factors that covary across city districts at fine spatial scales (Elvidge et al., 2007; Kyba, 2016). The need for higher resolution images or novel approaches that can disentangle the effects on both ecology and human health of multiple urban pollutants that covary is clear, although individual-level sensors can also reveal important impacts of daily light exposure on circadian disruption and stress (Figueiro et al., 2017). A more recent analysis using higher resolution (0.75 km) images from the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) on board the Suomi National Polar-orbiting Partnership satellite has revealed a significant association between ALAN and breast cancer incidence in the Greater Haifa Metropolitan Area in Israel (Rybnikova & Portnov, 2016). This analysis accounted for several potential covarying explanatory factors, but not noise pollution, and atmospheric pollution explicitly.

9 | HUMAN-ENVIRONMENT INTERRELATIONSHIPS

In a recent analysis that combined high-resolution night-time satellite images with atmospheric dispersion models of artificial skyglow, Falchi et al. (2016) estimated that more than 80% of the world's population currently live under light-polluted skies, such that the Milky Way is hidden from one-third of people alive today. This extraordinary change in our night-time environment escalated in the developed world during the mid to late 20th century and is now rapidly transforming the cultures of billions in the developing world. The trend is concurrent with urbanization [66% of the world's population will reside in urban areas by 2050 (United Nations, 2014)], and it contributes to the growing disconnect between people and nature that has become known as "the extinction of experience" (Miller, 2005). This growing disconnect undermines public support for conservation issues by preventing individuals from connecting with, understanding and forming attachments to the natural world (Miller, 2005).

The extinction of experience is another of the great challenges facing humanity in the 21st century. Miller (2005) argues that it can be addressed by designing urban landscapes to facilitate "meaningful interactions with the natural world." There is perhaps no more profound way in which people can reconnect with nature than giving them access to the Milky Way and allowing them to experience the natural rhythms of moonlight and sunlight that they are evolutionarily preadapted to synchronize their physiology and behaviour with (Cajochen et al., 2013; Wright et al., 2013). Like biodiversity conservation, however, pristine skies have become tourist attractions restricted to regions awarded special status for their value to dark sky conservation (Collison & Poe, 2013; Pritchard, 2017; Rodrigues, Rodrigues, & Peroff, 2014) where many in the developed world can no longer afford to reside or visit. Pritchard (2017) argues that dark sky protection programmes also risk suppressing the economic and cultural development of poorer nations in a way analogous to

biodiversity conservation in the 20th century. In her appraisal of NASA's "City Lights," composite satellite image of the world's lights at night (<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/IntotheBlack/>) Pritchard (2017) warns against "neo-colonial approaches to the conservation of natural night-sky brightness." While it is clear that the continued growth in artificial lighting risks perpetuating the disconnect between people and the environment—and this will inevitably contribute to the concomitant shifting baseline in conservation objectives (Papworth, Rist, Coad, & Milner-Gulland, 2009; Pauly, 1995)—any intervention should seek to support the modernization of societies while retaining their connections with the natural world. Pritchard (2017) describes achieving this balance as a "new frontier in 21st century conservation."

10 | FEASIBILITY OF SOLUTIONS

While the recent growth in LED lighting has raised concerns among environmental scientists and human health experts, this technology offers lighting managers greater flexibility when it comes to tailoring the timing, intensity and spectral power distribution of municipal lighting systems (Davies et al., 2017; Gaston, 2013). Of the local authorities in England, 23% are engaged in permanent part-night lighting schemes where street lights are turned off between midnight and 04:00 to 05:00 a.m., while 39% are engaged in permanent dimming schemes where lights are dimmed for at least some period of the night (Campaign to Protect Rural England, 2014). Increasing constraints on local authority budgets have incentivized the adoption of these lighting strategies in the wake of the 2008 global financial crash; however, more often the reasons given for their implementation are improved energy savings and reduced CO₂ emissions. Both dimming and part-night lighting are better enabled by switching to LED and introducing central management systems that use wireless communication technology to programme individual street lights remotely.

The ecological benefits of dimming and part-night lighting are not yet well explored (although see Azam et al., 2015; Day, Baker, Schofield, Mathews, & Gaston, 2015; Davies et al., 2017). A recent emphasis in the ecological literature has instead been on tailoring spectral power distributions to reduce known ecological impacts (Brüning, Hölker, Franke, Kleiner, & Kloas, 2016; Davies et al., 2017; van Geffen et al., 2015; Longcore et al., 2015; Pawson & Bader, 2014; Rivas, Tomillo, Uribeondo, & Marco, 2015; Spoelstra et al., 2015), despite this approach being less popular among lighting managers and engineers who often focus on the improved visual performance offered by broad-spectrum lighting as a key selling point. These studies collectively present an inconsistent picture of whether spectral manipulation can be used to effectively mitigate the ecological impacts of ALAN. This is partly because some studies compare narrow spectrum (e.g. red, green and blue) light with broad-spectrum light sources, while others either decrease the amount of light occurring at wavelengths known to manifest certain ecological responses (usually shorter wavelengths in the visible spectrum), or increase the

amount of light occurring at wavelengths that do not give rise to these responses (longer wavelengths in the visible spectrum). Even if a unified approach was adopted in spectral manipulation experiments, it seems unlikely that a publically acceptable light spectrum that does not give rise to any ecological impacts can be developed, because different species responses are evolutionarily adapted to utilize different wavelengths of light.

Examples of this are abundant in the emerging literature on the ecological impacts of artificial light. The number of beetle taxa aggregating under white LED lighting can be reduced by switching to amber, but this has no discernible effect on the number of spider taxa that aggregate (Davies et al., 2017). Many animal responses are sensitive to short-wavelength light (van Langevelde et al., 2011; Rivas et al., 2015; Spoelstra et al., 2017), while phenological responses in plants are most sensitive to the longer wavelengths recommended to avoid such effects (Bennie et al., 2016; Bennie, Davies, et al., 2015). Male caterpillars of the moth *Mamestra brassicae* reared under green artificial light reached a lower maximum mass, pupated earlier and obtained a lower pupal mass than those reared under red light (van Geffen, van Grunsven, van Ruijven, Berendse, & Veenendaal, 2014), while red light inhibited the attractiveness of a female pheromone lure to more adult males of the winter moth *Operophtera brumata* than did green light (van Geffen et al., 2015).

Studies investigating the ecological benefits of part-night lighting have also highlighted that different taxa respond in different ways (Azam et al., 2015; Davies et al., 2017; Day et al., 2015), and the adoption of part-night lighting schemes is often inhibited by a perception among political actors that they lack popular support. There are both perceived and realized benefits of artificial light for society, including in the areas of road safety, crime and the economy (Gaston, Gaston, Bennie, & Hopkins, 2015). The night-time economy in the United Kingdom, for example, was worth £67bn in 2016 (MAKE Associates, personal communication) and accounted for up to 27% of town and city centre turnover and 10% of most locations overall employment figure in 2009 (VisitEngland, 2012).

While modern lighting technologies offer the potential to reduce the ecological impacts of ALAN, identifying how this is best achieved is clearly complex. Studies are needed across a wide variety of taxonomic groups and lighting approaches, to develop options that are both socially and ecologically acceptable.

CONCLUSION

Research into the ecological, human health and societal consequences of ALAN is now growing rapidly. Here, we have highlighted 10 reasons why ALAN should and likely will be a focus for global change research in the 21st century. Most important to consider is the notion that while ALAN is having widespread and profound impacts on people and the environment, strategies for abating them are already being explored. Solving the challenges posed by ALAN would not only improve environmental and human health outcomes but also enhance the human experience of nature and change perceptions of the natural world in a way that facilitates the necessary

transition towards a more environmentally orientated and hence sustainable society. It would also inspire greater confidence in our ability to tackle the problems posed by other global change phenomena. The challenge now is identifying how best to address the complex array of ecological, human health and cultural problems presented by society's propensity for illuminating the night.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank Dr Ilya Mclean (University of Exeter) for granting permissions to use images in Figure 2. The work leading to this publication was supported by a European Regional Development Fund funded Sêr Cymru II Fellowship awarded to TWD.

ORCID

Thomas W. Davies  <http://orcid.org/0000-0002-4673-9893>

REFERENCES

- Adkins, E., Eapen, S., Kaluwile, F., Nair, G., & Modi, V. (2010). Off-grid energy services for the poor: Introducing LED lighting in the Millennium Villages Project in Malawi. *Energy Policy*, 38, 1087–1097.
- Azam, C., Kerbiriou, C., Vernet, A., Julien, J.-F., Bas, Y., Plichard, L., ... Le Viol, I. (2015). Is part-night lighting an effective measure to limit the impacts of artificial lighting on bats? *Global Change Biology*, 21, 4333–4341.
- Bättnes, A. S., Miljeteig, C., Berge, J., Greenacre, M., & Johnsen, G. (2013). Quantifying the light sensitivity of *Calanus* spp. during the polar night: Potential for orchestrated migrations conducted by ambient light from the sun, moon, or aurora borealis? *Polar Biology*, 38, 51–65.
- Becker, A., Whitfield, A. K., Cowley, P. D., Järnegen, J., & Næsje, T. F. (2012). Potential effects of artificial light associated with anthropogenic infrastructure on the abundance and foraging behaviour of estuary-associated fishes. *Journal of Applied Ecology*, 50, 43–50.
- Bennie, J., Davies, T. W., Cruse, D., & Gaston, K. J. (2016). Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *Journal of Ecology*, 104, 611–620.
- Bennie, J., Davies, T. W., Cruse, D., Inger, R., & Gaston, K. J. (2015). Cascading effects of artificial light at night: Resource-mediated control of herbivores in a grassland ecosystem. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370, 20140131.
- Bennie, J., Davies, T. W., Inger, R., & Gaston, K. J. (2014). Mapping artificial lightscapes for ecological studies. *Methods in Ecology and Evolution*, 5, 534–540.
- Bennie, J., Duffy, J., Davies, T., Correa-Cano, M., & Gaston, K. (2015). Global trends in exposure to light pollution in natural terrestrial ecosystems. *Remote Sensing*, 7, 2715–2730.
- Bennie, J., Huntley, B., Wiltshire, A., Hill, M. O., & Baxter, R. (2008). Slope, aspect and climate: Spatially explicit and implicit models of topographic microclimate in chalk grassland. *Ecological Modelling*, 216, 47–59.
- Bird, B. L., Branch, L. C., & Miller, D. L. (2004). Effects of coastal lighting on foraging behavior of beach mice. *Conservation Biology*, 18, 1435–1439.
- Bolton, D., Mayer-Pinto, M., Clark, G. F., Dafforn, K. A., Brassill, W. A., Becker, A., & Johnston, E. L. (2017). Coastal urban lighting has ecological consequences for multiple trophic levels under the sea. *Science of the Total Environment*, 576, 1–9.

- Brüning, A., Hölker, F., Franke, S., Kleiner, W., & Kloas, W. (2016). Impact of different colours of artificial light at night on melatonin rhythm and gene expression of gonadotropins in European perch. *Science of The Total Environment*, 543, 214–222.
- Brüning, A., Hölker, F., Franke, S., Preuer, T., & Kloas, W. (2015). Spot-light on fish: Light pollution affects circadian rhythms of European perch but does not cause stress. *Science of the Total Environment*, 511, 516–522.
- Cajochen, C., Altanay-Ekici, S., Münch, M., Frey, S., Knoblauch, V., & Wirz-Justice, A. (2013). Evidence that the lunar cycle influences human sleep. *Current Biology*, 23, 1485–1488.
- Cajochen, C., Frey, S., Anders, D., Späti, J., Bues, M., Pross, A., ... Stefani, O. (2011). Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. *Journal of Applied Physiology*, 110, 1432–1438.
- Campaign to Protect Rural England (2014). Shedding Light: A survey of local authority approaches to lighting in England, London.
- Chang, A.-M., Aeschbach, D., Duffy, J. F., & Czeisler, C. A. (2014). Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112, 1232–1237.
- Cohen, J. H., & Forward, R. B. (2009). Zooplankton diel vertical migration - a review of proximate control. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 47, 77–110.
- Collison, F. M., & Poe, K. (2013). "Astronomical Tourism": The Astronomy and Dark Sky Program at Bryce Canyon National Park. *Tourism Management Perspectives*, 7, 1–15.
- Crisp, D. J., & Ritz, D. A. (1973). Responses of cirripede larvae to light. I. *Experiments with white light*. *Marine Biology*, 23, 327–335.
- Dacke, M., Baird, E., Byrne, M., Scholtz, C. H., & Warrant, E. J. (2013). Dung beetles use the Milky Way for orientation. *Current Biology*, 23, 298–300.
- Dalberg Global Development Advisors (2013). *Lighting Africa Market Trends Report 2012*. Lighting Africa.
- Davies, T. W., Bennie, J., Cruse, D., Blumgart, D., Inger, R., & Gaston, K. J. (2017). Multiple night-time light-emitting diode lighting strategies impact grassland invertebrate assemblages. *Global Change Biology*, 23, 2641–2648.
- Davies, T. W., Bennie, J., & Gaston, K. J. (2012). Street lighting changes the composition of invertebrate communities. *Biology Letters*, 8, 764–767.
- Davies, T. W., Bennie, J., Inger, R., De Ibarra, N. H., & Gaston, K. J. (2013). Artificial light pollution: Are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions? *Global Change Biology*, 19, 1417–1423.
- Davies, T. W., Coleman, M., Griffith, K. M., & Jenkins, S. R. (2015). Night-time lighting alters the composition of marine epifaunal communities. *Biology Letters*, 11, 20150080.
- Davies, T. W., Duffy, J. P., Bennie, J., & Gaston, K. J. (2014). The nature, extent, and ecological implications of marine light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12, 347–355.
- Davies, T. W., Duffy, J. P., Bennie, J., & Gaston, K. J. (2016). Stemming the tide of light pollution encroaching into marine protected areas. *Conservation Letters*, 9, 164–171.
- Day, J., Baker, J., Schofield, H., Mathews, F., & Gaston, K. J. (2015). Part-night lighting: Implications for bat conservation. *Animal Conservation*, 18, 512–516.
- Dominoni, D. (2015). The effects of light pollution on biological rhythms of birds: An integrated, mechanistic perspective. *Journal of Ornithology*, 156, 409–418.
- Dominoni, D., Quetting, M., & Partecke, J. (2013). Artificial light at night advances avian reproductive physiology. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280, 20123017.
- Elvidge, C. D., Cinzano, P., Pettit, D., Arvesen, J., Sutton, P., Small, C., ... Weeks, J. (2007). The Nightsat mission concept. *International Journal of Remote Sensing*, 28, 2645–2670.
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C., Elvidge, C. D., Baugh, K., ... Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2, e1600377.
- Ffrench-Constant, R. H., Somers-Yeates, R., Bennie, J., Economou, T., Hodgson, D., Spalding, A., & McGregor, P. K. (2016). Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1833), p20160813.
- Figueiro, M. G., Steverson, B., Heerwagen, J., Kampschroer, K., Hunter, C. M., Gonzales, K., ... Rea, M. S. (2017). The impact of daytime light exposures on sleep and mood in office workers. *Sleep Health*, 3, 204–215.
- Forward, R. B., Cronin, T. W., & Stearns, D. E. (1984). Control of diel vertical migration: Photoresponses of a larval crustacean1. *Limnology and Oceanography*, 29, 146–154.
- Frank, K. D. (1988). Impact of outdoor lighting on moths an assessment. *Journal of the Lepidopterists' Society*, 42, 63–93.
- Frölicher, T. L., & Paynter, D. J. (2015). Extending the relationship between global warming and cumulative carbon emissions to multi-millennial timescales. *Environmental Research Letters*, 10, 075002.
- Frolicher, T. L., Winton, M., & Sarmiento, J. L. (2014). Continued global warming after CO₂ emissions stoppage. *Nature Climate Change*, 4, 40–44.
- Gallaway, T., Olsen, R. N., & Mitchell, D. M. (2010). The economics of global light pollution. *Ecological Economics*, 69, 658–665.
- Gaston, K. J. (2013). Sustainability: A green light for efficiency. *Nature*, 497, 560–561.
- Gaston, K. J., & Bennie, J. (2014). Demographic effects of artificial nighttime lighting on animal populations. *Environmental Reviews*, 22, 323–330.
- Gaston, K. J., Davies, T. W., Bennie, J., & Hopkins, J. (2012). Reducing the ecological consequences of night-time light pollution: Options and developments. *Journal of Applied Ecology*, 49, 1256–1266.
- Gaston, K. J., Duffy, J. P., & Bennie, J. (2015). Quantifying the erosion of natural darkness in the global protected area system. *Conservation Biology*, 29, 1132–1141.
- Gaston, K. J., Gaston, S., Bennie, J., & Hopkins, J. (2015). Benefits and costs of artificial nighttime lighting of the environment. *Environmental Reviews*, 23, 14–23.
- Gaston, K. J., Visser, M. E., & Hölker, F. (2015). The biological impacts of artificial light at night: The research challenge. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370, 20140133.
- Gorbunov, M. Y., & Falkowski, P. G. (2002). Photoreceptors in the cnidarian hosts allow symbiotic corals to sense blue moonlight. *Limnology and Oceanography*, 47, 309–315.
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, 319, 756–760.
- Haddock, S. H. D., Moline, M. A., & Case, J. F. (2010). Bioluminescence in the sea. *Annual Review of Marine Science*, 2, 443–493.
- Haim, A., & Portnov, B. A. (2013). *Light pollution as a new risk factor for human breast and prostate cancers*. New York: Springer.
- Haim, A., & Zubidat, A. E. (2015). LED light between Nobel Prize and cancer risk factor. *Chronobiology International*, 32, 725–727.
- Hall, A. S. (2016). Acute artificial light diminishes central Texas anuran calling behavior. *The American Midland Naturalist*, 175, 183–193.
- Hannah, L., Flint, L., Syphard, A. D., Moritz, M. A., Buckley, L. B., & McCullough, I. M. (2014). Fine-grain modeling of species' response to climate change: Holdouts, stepping-stones, and microrefugia. *Trends in Ecology & Evolution*, 29, 390–397.
- Hannah, L., Midgley, G., Anelman, S., Araújo, M., Hughes, G., Martinez-Meyer, E., ... Williams, P. (2007). Protected area needs in a changing climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5, 131–138.
- Hansen, T., Stefansson, S., & Taranger, G. L. (1992). Growth and sexual maturation in Atlantic salmon, *Salmo salar* L., reared in sea cages at two different light regimes. *Aquaculture Research*, 23, 275–280.

- Hays, G. C. (2003). A review of the adaptive significance and ecosystem consequences of zooplankton diel vertical migrations. *Hydrobiologia*, 503, 163–170.
- International Agency for Research on Cancer (2007). *IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans Volume 98: Painting, fire-fighting, and shiftwork*. Lyon 2010: World Health Organisation International Agency for Research on Cancer.
- Kamrowski, R. L., Limpus, C., Moloney, J., & Hamann, M. (2012). Coastal light pollution and marine turtles: Assessing the magnitude of the problem. *Endangered Species Research*, 19, 85–98.
- Kaniewska, P., Alon, S., Karako-Lampert, S., Hoegh-Guldberg, O., & Levy, O. (2015). Signaling cascades and the importance of moonlight in coral broadcast mass spawning. *eLife*, 4, e09991.
- Kempnaers, B., Borgström, P., Loës, P., Schlicht, E., & Valcu, M. (2010). Artificial night lighting affects dawn song, extra-pair siring success, and lay date in songbirds. *Current Biology*, 20, 1735–1739.
- Keshet-Sitton, A., Or-Chen, K., Yitzhak, S., Tzabary, I., & Haim, A. (2015). Can avoiding light at night reduce the risk of breast cancer? *Integrative Cancer Therapies*, 15, 145–152.
- Klein Goldewijk, K., Beusen, A., van Drecht, G., & De Vos, M. (2011). The HYDE 3.1 spatially explicit database of human-induced global land-use change over the past 12,000 years. *Global Ecology and Biogeography*, 20, 73–86.
- Kloog, I., Haim, A., Stevens, R. G., Barchana, M., & Portnov, B. A. (2008). Light at night co-distributes with incident breast but not lung cancer in the female population of Israel. *Chronobiology International*, 25, 65–81.
- Knop, E., Zoller, L., Ryser, R., Gerpe, C., Hörler, M., & Fontaine, C. (2017). Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature*, 548, 206–209.
- Koo, Y. S., Song, J.-Y., Joo, E.-Y., Lee, H.-J., Lee, E., Lee, S.-K., & Jung, K.-Y. (2016). Outdoor artificial light at night, obesity, and sleep health: Cross-sectional analysis in the KoGES study. *Chronobiology International*, 33, 301–314.
- Kronfeld-Schor, N., Domonini, D., De La Iglesia, H., Levy, O., Herzog, E. D., Dayan, T., & Helfrich-Forster, C. (2013). Chronobiology by moonlight. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280, 20123088.
- Kyba, C. C. M. (2016). Defense Meteorological Satellite Program data should no longer be used for epidemiological studies. *Chronobiology International*, 33, 943–945.
- Kyba, C., Hänel, A., & Höcker, F. (2014). Redefining efficiency for outdoor lighting. *Energy & Environmental Science*, 7, 1806–1809.
- Kyba, C. M., & Höcker, F. (2013). Do artificially illuminated skies affect biodiversity in nocturnal landscapes? *Landscape Ecology*, 28, 1637–1640.
- Last, K. S., Hobbs, L., Berge, J., Brierley, A. S., & Cottier, F. (2016). Moonlight drives ocean-scale mass vertical migration of zooplankton during the Arctic winter. *Current Biology*, 26, 244–251.
- Lewanzik, D., & Voigt, C. C. (2014). Artificial light puts ecosystem services of frugivorous bats at risk. *Journal of Applied Ecology*, 51, 388–394.
- Longcore, T., Aldern, H. L., Eggers, J. F., Flores, S., Franco, L., Hirshfield-Yamanishi, E., ... Barroso, A. M. (2015). Tuning the white light spectrum of light emitting diode lamps to reduce attraction of nocturnal arthropods. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 370, 20140125.
- Longcore, T., & Rich, C. (2004). Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2, 191–198.
- Luginbuhl, C. B., Duriscoe, D. M., Moore, C. W., Richman, A., Lockwood, G. W., & Davis, D. R. (2009). From the ground up II: Sky glow and near-ground artificial light propagation in Flagstaff, Arizona. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121, 204–212.
- MacGregor, C. J., Pocock, M. J. O., Fox, R., & Evans, D. M. (2014). Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: A review. *Ecological Entomology*, 40, 187–198.
- Maclean, I. M. D., Suggitt, A. J., Wilson, R. J., Duffy, J. P., & Bennie, J. J. (2016). Fine-scale climate change: Modelling spatial variation in biologically meaningful rates of warming. *Global Change Biology*, 23, 253–268.
- Mathesius, S., Hofmann, M., Caldeira, K., & Schellnhuber, H. J. (2015). Long-term response of oceans to CO₂ removal from the atmosphere. *Nature Climate Change*, 5, 1107–1113.
- Miller, J. R. (2005). Biodiversity conservation and the extinction of experience. *Trends in ecology & evolution*, 20, 430–434.
- Mills, E., & Jacobson, A. (2007). *The off-grid lighting market in western Kenya: LED alternatives and consumer preferences in a Millennium Development village*. Lumina Project Technical Report.
- Moore, M. V., Pierce, S. M., Walsh, H. M., Kvalvik, S. K., & Lim, J. D. (2000). Urban light pollution alters the diel vertical migration of *Daphnia*. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*, 27, 779–782.
- Navarro-Barranco, C., & Hughes, L. E. (2015). Effects of light pollution on the emergent fauna of shallow marine ecosystems: Amphipods as a case study. *Marine Pollution Bulletin*, 94, 235–240.
- Naylor, E. (1999). Marine animal behaviour in relation to lunar phase. *Earth, Moon, and Planets*, 85, 291–302.
- Papworth, S. K., Rist, J., Coad, L., & Milner-Gulland, E. J. (2009). Evidence for shifting baseline syndrome in conservation. *Conservation Letters*, 2, 93–100.
- Pauly, D. (1995). Anecdotes and the shifting baseline syndrome of fisheries. *Trends in Ecology and Evolution*, 10, 430.
- Pawson, S. M., & Bader, M. K. F. (2014). LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature. *Ecological Applications*, 24, 1561–1568.
- Pimpulkar, S., Speck, J. S., Denbaars, S. P., & Nakamura, S. (2009). Prospects for LED lighting. *Nature Photonics*, 3, 180–182.
- Pritchard, S. B. (2017). The trouble with darkness: NASA's Suomi satellite images of Earth at night. *Environmental History*, 22, 312–330.
- Raap, T., Pinxten, R., & Eens, M. (2015). Light pollution disrupts sleep in free-living animals. *Scientific Reports*, 5, 13557.
- Raap, T., Pinxten, R., & Eens, M. (2016). Artificial light at night disrupts sleep in female great tits (*Parus major*) during the nestling period, and is followed by a sleep rebound. *Environmental Pollution*, 215, 125–134.
- Riley, W. D., Davison, P. I., Maxwell, D. L., & Bendall, B. (2013). Street lighting delays and disrupts the dispersal of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fry. *Biological Conservation*, 158, 140–146.
- Rivas, M. L., Tomillo, P. S., Uribeondo, J. D., & Marco, A. (2015). Leatherback hatchling sea-finding in response to artificial lighting: Interaction between wavelength and moonlight. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 463, 143–149.
- Robert, K. A., Lesku, J. A., Partecke, J., & Chambers, B. (2015). Artificial light at night desynchronizes strictly seasonal reproduction in a wild mammal. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282, 20151745.
- Rodrigues, A. L. O., Rodrigues, A., & Peroff, D. M. (2014). The sky and sustainable tourism development: A case study of a dark sky reserve implementation in Alqueva. *International Journal of Tourism Research*, 17, 292–302.
- Rybníková, N. A., & Portnov, B. A. (2016). Outdoor light and breast cancer incidence: A comparative analysis of DMSP and VIIRS-DNB satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 38, 1–10.
- Rydell, J. (1992). Exploitation of insects around streetlamps by bats in Sweden. *Functional Ecology*, 6, 744–750.
- Schubert, E. F., & Kim, J. K. (2005). Solid-state light sources getting smart. *Science*, 308, 1274–1278.
- Spoelstra, K., van Grunsven, R. H. A., Donners, M., Gienapp, P., Huigens, M. E., Slaterus, R., ... Veenendaal, E. (2015). Experimental illumination of natural habitat: An experimental set-up to assess the direct and indirect ecological consequences of artificial light of different

- spectral composition. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 370, 20140129.
- Spoelstra, K., van Grunsven, R. H. A., Ramakers, J. J. C., Ferguson, K. B., Raap, T., Donners, M., & Visser, M. E. (2017). Response of bats to light with different spectra: Light-shy and agile bat presence is affected by white and green, but not red light. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284, 20170075.
- Stone, E. L., Jones, G., & Harris, S. (2009). Street lighting disturbs commuting bats. *Current Biology*, 19, 1123–1127.
- Svane, I., & Dolmer, P. (1995). Perception of light at settlement: A comparative study of two invertebrate larvae, a scyphozoan planula and a simple ascidian tadpole. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 187, 51–61.
- Swaddle, J. P., Francis, C. D., Barber, J. R., Cooper, C. B., Kyba, C. C., Dominoni, D. M., & Luther, D. (2015). A framework to assess evolutionary responses to anthropogenic light and sound. *Trends in Ecology & Evolution*, 30, 550–560.
- Tankersley, R. A., Mckelvey, L. M., & Forward, R. B. (1995). Responses of estuarine crab megalopae to pressure, salinity and light: Implications for flood-tide transport. *Marine Biology*, 122, 391–400.
- Thorson, G. (1964). Light as an ecological factor in the dispersal and settlement of larvae of marine bottom invertebrates. *Ophelia*, 1, 167–208.
- Ugolini, A., Boddi, V., Mercatelli, L., & Castellini, C. (2005). Moon orientation in adult and young sandhoppers under artificial light. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 272, 2189–2194.
- United Nations Population Division (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352)*.
- van Geffen, K. G., van Eck, E., De Boer, R. A., van Grunsven, R. H. A., Salis, L., Berendse, F., & Veenendaal, E. M. (2015). Artificial light at night inhibits mating in a Geometrid moth. *Insect Conservation and Diversity*, 8, 282–287.
- van Geffen, K. G., van Grunsven, R. H. A., van Ruijven, J., Berendse, F., & Veenendaal, E. M. (2014). Artificial light at night causes diapause inhibition and sex-specific life history changes in a moth. *Ecology and Evolution*, 4, 2802–2809.
- van Grunsven, R. H. A., Lham, D., van Geffen, K. G., & Veenendaal, E. M. (2014). Range of attraction of a 6-W moth light trap. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 152, 87–90.
- van Langevelde, F., Ettema, J. A., Donners, M., Wallisdevries, M. F., & Groenendijk, D. (2011). Effect of spectral composition of artificial light on the attraction of moths. *Biological Conservation*, 144, 2274–2281.
- VisitEngland (2012). *The evening and night-time economy: Realising the potential for destination organisations*. London: VisitEngland & the Association of Town Centre Management.
- Wakefield, A., Stone, E. L., Jones, G., & Harris, S. (2015). Light-emitting diode street lights reduce last-ditch evasive manoeuvres by moths to bat echolocation calls. *Royal Society Open Science*, 2, 150291.
- Warrant, E., & Dacke, M. (2016). Visual navigation in nocturnal insects. *Physiology*, 31, 182–192.
- West, K. E., Jablonski, M. R., Warfield, B., Cecil, K. S., James, M., Ayers, M. A., & Hanifin, J. P. (2011). Blue light from light-emitting diodes elicits a dose-dependent suppression of melatonin in humans. *Journal of Applied Physiology*, 110, 619–626.
- Witherington, B. E. (1992). Behavioral responses of nesting sea turtles to artificial lighting. *Herpetologica*, 48, 31–39.
- Wollast, R. (1998). Evaluation and comparison of the global carbon cycle in the coastal zone and in the open ocean. In K. H. Brink & A. R. Robinson (Eds.), *The sea*, vol. 10, *The global coastal ocean: Processes and methods (Ideas and observations on the progress of the studies of the seas)* (pp. 213–252). New York, NY: John Wiley.
- Wright, K. P., Mchill, A. W., Birks, B. R., Griffin, B. R., Rusterholz, T., & Chinoy, E. D. (2013). Entrainment of the human circadian clock to the natural light-dark cycle. *Current Biology*, 23, 1554–1558.
- Young, C. M., & Chia, F.-S. (1982). Ontogeny of phototaxis during larval development of the sedentary polychaete, *Serpula vermicularis* (L.). *The Biological Bulletin*, 162, 457–468.
- Zissis, G., & Bertoldi, P. (2014). *2014 Update on the status of the LED market*. European Commission Report EU 27000 E
- Zoltan, K. (2010). Measuring and modelling light pollution at the Zselic Starry Sky Park. *Journal of Physics: Conference Series*, 218, 012001.

How to cite this article: Davies TW, Smyth T. Why artificial light at night should be a focus for global change research in the 21st century. *Glob Change Biol*. 2017;00:1–11.

<https://doi.org/10.1111/gcb.13927>

**INFORME FINAL
PROGRAMA RECAMBIO DE ALUMBRADO PÚBLICO**

**MINISTERIO DE ENERGÍA
SUBSECRETARÍA DE ENERGÍA**

**PANELISTAS:
MARCIA RIVEROS CONCHA (COORDINADORA)
DANIEL ESPINOZA LEOZ
PABLO VILLALOBOS DINTRANS**

ENERO – JULIO 2018

TABLA DE CONTENIDOS

I.	INFORMACIÓN DEL PROGRAMA	3
1.	Descripción general del programa	3
2.	Caracterización y cuantificación de población potencial y objetivo	5
3.	Antecedentes presupuestarios	6
II.	EVALUACIÓN DEL PROGRAMA	7
1.	JUSTIFICACIÓN DEL PROGRAMA	7
2.	EFICACIA Y CALIDAD	10
2.1.	Eficacia a nivel de resultados intermedios y finales (evaluación del cumplimiento de objetivos de propósito y fin).	10
2.2.	Eficacia a nivel de Componentes (producción de bienes o servicios)	11
2.3.	Cobertura y focalización del Programa	12
2.4.	Calidad	13
3.	ECONOMÍA	14
3.1.	Fuentes y uso de recursos financieros	15
3.2.	Ejecución presupuestaria del programa	16
3.3.	Aportes de Terceros	17
3.4.	Recuperación de Gastos	18
4.	EFICIENCIA	19
4.1.	A nivel de resultados intermedios y finales.	20
4.2.	A nivel de actividades y/o componentes. Relaciona gastos con productos	20
4.3.	Gastos de Administración	24
III.	CONCLUSIONES SOBRE EL DESEMPEÑO GLOBAL Y RECOMENDACIONES	26
1.	CONCLUSIONES SOBRE EL DESEMPEÑO GLOBAL	26
2.	RECOMENDACIONES	27
IV.	BIBLIOGRAFÍA	28
V.	ENTREVISTAS Y REUNIONES REALIZADAS	30
VI.	ANEXOS DE TRABAJO	31
	Anexo 1: Reporte sobre el estado y calidad de la información disponible para evaluar el programa.	31
	Anexo 2(a): Matriz de Evaluación del programa	34
	Anexo 2(b): Medición de indicadores Matriz de Evaluación del programa, período 2014-2017	38
	Anexo 2(c): Análisis de diseño del programa	42
	Anexo 3: Procesos de Producción y Organización y Gestión del Programa	44

Anexo 4: Análisis de Género de programas Evaluados	59
Anexo 5: Ficha de Presentación de Antecedentes Presupuestarios y de Gastos.	60
METODOLOGÍA	73
RESULTADOS	75

I. INFORMACIÓN DEL PROGRAMA

1. Descripción general del programa

La Agenda de Energía, presentada en mayo de 2014 por la Presidenta de la República, estableció los lineamientos de la política energética del periodo 2014-2018, contemplando entre sus ejes la consolidación de un sector eficiente, que gestiona el consumo energético del país. Para ello se consideró trabajar en distintas líneas de acción que permitieran reducir el consumo energético del país en un 20%, al año 2025 (Ministerio de Energía 2014)¹.

Asimismo se establecen ocho desafíos en la Agenda, siendo el quinto un Sector Energético Eficiente y que Gestiona el Consumo. Es aquí donde se plantea como una de las metas (la 4ª) lo siguiente: “Apoyaremos la gestión energética de las municipalidades, con énfasis en el alumbrado público”, lo que se traduce en el recambio de doscientas mil (200.000) luminarias en un periodo de 4 años, como una de sus principales medidas, especialmente en aquellas comunas que mantenían tecnologías más ineficientes y que aún no habían invertido en eficiencia energética, generando también ahorro en las cuentas municipales de alumbrado público.

Así nace el Programa de Recambio de Alumbrado Público para Municipios, el que se inicia en agosto de 2014 con el lanzamiento del “Concurso para la selección de municipios beneficiarios del Programa de recambio de alumbrado público”, con alcance nacional. A este concurso podían postular aquellos municipios del país que pertenecieran al 75% con mayor dependencia de recursos del Fondo Común Municipal². Finalmente, postularon 93 municipios los cuales fueron *rankeados* de acuerdo a los cinco criterios de selección (ver punto 2 siguiente). Dados los recursos disponibles y el ranking obtenido, fueron seleccionados 85 municipios, con una asignación de recambio de 130.000 luminarias, comprometiéndose la ejecución hasta el año 2017 (Ministerio de Energía 2015).

Las normas y reglamentos en el que se encuentra inserto el Programa son:

Normas técnicas:

- Oficio Circular N°14342 de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) del 17 de octubre de 2016³

Reglamentos:

- Decreto Supremo N° 51 de 2015, Reglamento de Alumbrado Público de Bienes Nacionales de Uso Público destinados al Tránsito de Peatones

¹ La descripción del procedimiento para establecer y validar las metas fijadas por la Agenda de Energía se encuentra en Kaufmann y Zulantay (2018).

² Considerando los 345 municipios del país, este porcentaje corresponde a 259 municipios.

³ Anteriormente, el Programa contaba con una serie de normas técnicas (NSEG 15.78, NSEG 21.78 y NSEG 9/71), las que fueron derogadas con este oficio.

- Decreto Supremo N° 2 de 2014, Reglamento de Alumbrado Público de Vías de Tránsito Vehicular
- Decreto Supremo N° 43 de 2012 del Ministerio de Medio Ambiente, que establece norma para la regulación de la contaminación lumínica
- Decreto N° 298 de 2005, del Ministerio de Economía Fomento y Reconstrucción.
- Decreto Supremo N° 686 de 1999, del Ministerio de Economía Fomento y Reconstrucción

En la Agenda también se establecen dos objetivos adicionales, esenciales para el buen desarrollo del programa: i) nuevos reglamentos de alumbrado público y, ii) apoyo a municipios en planes de gestión de la energía y asesoría en la determinación de las opciones tarifarias más convenientes.

Más tarde, para alcanzar sus metas en el número de luminarias, la Subsecretaría de Energía también establece acuerdos con los Gobiernos Regionales (GOREs); dos GOREs se mostraron interesados en aportar recursos al programa -Arica y Parinacota, y Antofagasta- quienes financian parte de la implementación en prácticamente todas sus comunas⁴.

El Programa se crea entonces con el Fin de “Contribuir a la Eficiencia Energética del país” y cuyo propósito es el de “Reducir el consumo de energía eléctrica en los municipios que se encuentran en el alcance del programa⁵, mediante la ejecución de acciones que incrementan la eficiencia energética”, y es implementado en conjunto entre la Subsecretaría de Energía y la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE). Ambos organismos se coordinan para el logro de la meta mediante convenio de colaboración.

Respecto entonces de los bienes y servicios que entrega el Programa, este contempla dos componentes:

- Componente 1: Recambio de luminarias de alumbrado público.
- Componente 2: Capacitaciones técnicas en gestión de la energía eléctrica entregada a los municipios.

Estas se despliegan principalmente a través de tres tipos de acciones: 1) acciones públicas propias de la AChEE: desarrollo de nuevo reglamento para habilitar el Programa y darle sostenibilidad; desarrollo de metodología transparente de selección de Municipios; desarrollo y despliegue de sistema de licitaciones de excelencia para elegir a los mejores subcontratistas; 2) asistencia técnica a Municipios como contrapartida técnica a subcontratos de implementación de obras a fin de cumplir con los tiempos y excelencia técnica deseados; 3) capacitación a personal de Municipios para instalar capacidades de gestión post-Programa del alumbrado público y la nueva tecnología⁶.

El Programa opera mediante licitaciones, en donde la ejecución de las actividades de ambos componentes (recambio de luminarias y capacitaciones) es realizada por

⁴ De acuerdo a lo señalado en la Agenda de Energía, Eje 05, Línea de Acción N° 4, punto 4.1.- que señala: “En conjunto con SUBDERE y los Gobiernos Regionales, desarrollaremos un gran esfuerzo a lo largo del país para modernizar el alumbrado público de las comunas que aún no han invertido en Eficiencia Energética y ahorro en sus cuentas de la luz”. No obstante lo anterior, los únicos interesados en participar del Programa fueron los Gobiernos Regionales de Arica y Parinacota y Antofagasta.

⁵ Se entenderá por “alcance del programa” aquellos municipios donde el recambio se llevó a cabo mediante licitaciones de la Subsecretaría de Energía y de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética.

⁶ En Anexo 3 (Procesos de Producción y Organización y Gestión del Programa), se incluyen los procesos de producción en detalle.

empresas privadas. Los contratos de adjudicación consideran tanto el recambio de luminarias como las capacitaciones a los funcionarios municipales.

2. Caracterización y cuantificación de población potencial⁷ y objetivo⁸

En el caso del Programa de Recambio de Alumbrado Público, la unidad de análisis ha sido definida como las municipalidades del país, en línea con la definición de objetivos planteada en la MML (ver Anexo 2).

En este contexto, la población potencial del Programa son las 345 municipalidades existentes a lo largo del país, ya que a todas les afecta el problema del alto consumo de energía a nivel país, definido como el objetivo final del programa. A su vez, todas son sujeto de intervenciones que les permitan mejorar sus niveles de eficiencia energética.

Respecto de la población objetivo, y como consecuencia del análisis de los datos aportados por el Programa, el Panel concluye que esta es equivalente a la población potencial, debido a que está conformada por la aplicación de los siguientes criterios:

1.- Proyectos pilotos, que corresponden a comunas que fueron seleccionadas en atención a dos factores: interés mostrado por la prontitud de su respuesta e información disponible para llevarlos a cabo. Su selección no obedece a los criterios siguientes.

2.- Nivel de dependencia del Fondo Común Municipal. Se trata de los Municipios que pertenecen al 75% con mayor dependencia de dicho fondo respecto de sus ingresos. Aplicable a los recursos propios del Programa.

3.- Comunas pertenecientes a Gobiernos Regionales dispuestos a cofinanciar proyectos de alumbrado público. Este último criterio permite determinar que finalmente todas las comunas podrían ser sujeto del beneficio., aun cuando estas no formen parte del 75% con mayor dependencia del FCM.

Para la determinación de los beneficiarios se estableció un concurso durante el año 2014, en cuyas bases se definió que los “postulantes elegibles”, se restringen a aquellos municipios que pertenecieran al 75% de menores ingresos propios, lo cual se determinó como aquellos con mayor dependencia de recursos del Fondo Común Municipal, según indicador de la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, SUBDERE, constituyendo éste un criterio de priorización. El listado de los 259 municipios considerados como elegibles, se encuentra disponible en el Anexo 6 de las bases de postulación al concurso (Ministerio de Energía 2014b).

De igual manera, el Programa define como beneficiarios, a “aquellos municipios que se les adjudique el beneficio” (Ministerio de Energía 2014b). En este caso, los otros criterios de priorización utilizados corresponde a los cinco criterios de selección establecidos en las bases del concurso: i) ineficiencia del parque; ii) Ingresos; iii) equidad eléctrica; iv) seguridad; v) gestión. El detalle respecto de las ponderaciones, definición y forma de

⁷ Población potencial: corresponde a la población total que presenta la necesidad y/o problema que justifica el Programa y por ende pudiera ser elegible para su atención.

⁸ Población objetivo: población que el Programa tiene considerado / planificado atender. Si el problema o solución que aborda el Programa tiene relación con un bien público de alcance nacional o mayor, revisar la pertinencia de analizar en detalle la población potencial y objetivo.

cálculo de cada uno de estos indicadores se encuentra en el Anexo 3. El Cuadro 1 muestra, por lo tanto, el número de municipalidades que año a año se adjudicaron el concurso, independientemente de si los proyectos de recambio de alumbrado fueron o no finalizados durante ese año (ver sección II.2.3 para el análisis y cuantificación de beneficiarios efectivos). Tal como se señala en la Introducción de este informe, del total de 93 postulantes, 85 postulaciones fueron declaradas admisibles durante el concurso y rankeadas de acuerdo a los criterios descritos en el Anexo 3; a partir de este ranking, las municipalidades fueron priorizadas y definidas como “admisibles” para distintos años (Ministerio de Energía 2015).

Por otro lado, como se señaló anteriormente, el Programa incorporó siete comunas como proyectos piloto (San Clemente, Coronel y Villa Alemana, Calbuco, Vicuña, Hualpén y Lota).

Finalmente y en consideración al aporte de los Gobiernos Regionales, se presentaron los casos asociados al total de las comunas de las Regiones de Arica y Parinacota y Antofagasta (13 Comunas). De esta forma, los beneficiarios resultaron en un total de 105 municipios. Dado que la selección se hace a nivel de municipios, la población potencial, objetivo y beneficiarios del Programa son las mismas para ambos componentes.

Cuadro 1: Población Potencial, Objetivo y Beneficiarios. Período 2014-2017

Año	Población Potencial (a)	Población Objetivo (b)	Beneficiarios (c)	Cobertura de Población Objetivo respecto de la Potencial (%) (b/a)	Cobertura de Beneficiarios respecto de la Población Objetivo (%) (c/b)
2014	345	345	16	100%	4,64%
2015	345	345	49	100%	14,20%
2016	345	345	36	100%	10,44%
2017	345	345	4	100%	1,16%
% Variación 2014-2017	0%	0%	-	0,00%	-
Acumulado 2014-2017	345	345	105	100%	30,44%

Fuente: Elaboración propia en base a información del Ministerio de Energía (2014b) y Ministerio de Energía (2015).

3. Antecedentes presupuestarios

Respecto al presupuesto del Programa Recambio de Luminarias de Alumbrado Público, informado en la Ley de Presupuestos de cada año, éste se encuentra radicado en el Programa 05 “Plan de Acción de Eficiencia Energética” de la Subsecretaría de Energía, en la línea presupuestaria denominada “Aplicación Plan de Acción de Eficiencia Energética”, Subtítulo 24, Ítem 03, Asignación 006, en el período de análisis 2014 a 2017, ambos años inclusive.

Los recursos contemplados para el Programa, financian tanto del desarrollo de los proyectos como los contratos derivados de ellos para el recambio del alumbrado en las comunas beneficiarias; este ítem también contempla la capacitación a los equipos municipales que se encuentran a cargo de la gestión energética. Así también se financia

por medio de estos recursos, gastos administrativos en que se incurre con motivo de la contratación de las obras.

Para apreciar el peso del Programa en el presupuesto total de la Institución, se presenta el Cuadro 2, donde se puede ver que representa un 6,6%, aunque con tendencia creciente en el período, con porcentajes de 0%, 6%, 5% y 13%, entre los años 2014-2017. Llama la atención la variación porcentual del presupuesto durante el período de evaluación, con un 10.440%, que se explica por el bajo monto considerado en el año 2014 (año de inicio del Programa), y que no contemplaba en la Ley de Presupuestos los recursos que más tarde (iniciado el nuevo gobierno) fueron dispuestos para su desarrollo. Un mayor análisis del uso de los recursos financieros se realizará en el apartado correspondiente.

Cuadro 2: Presupuesto total del Programa 2014-2018 (miles de \$ 2018)

Año	Presupuesto total del Programa (incluye todas las fuentes de financiamiento) ⁹	Presupuesto del Programa proveniente de la Institución Responsable (a)	Presupuesto Total Institución Responsable (b)	Participación del Programa en el presupuesto de la Institución Responsable (%) (a/b)
2014	91.083	91.083	65.563.400	0,14%
2015	6.129.379	6.129.379	108.490.458	5,64%
2016	5.677.048	5.677.048	123.680.217	4,59%
2017	15.456.587	15.456.587	122.158.587	12,65%
2018	9.599.944	9.599.944	106.671.368	8,99%
% Variación 2014-2018	10.440 %	10.440 %	63 %	

Fuente: Anexo 5 y www.dipres.cl.

II. EVALUACIÓN DEL PROGRAMA

1. JUSTIFICACIÓN DEL PROGRAMA

El Programa justifica su existencia en la necesidad de avanzar hacia un país con un consumo energético más eficiente, que redunde en menores costos, mayor productividad y una mejor relación con el medioambiente (AChEE 2018). De acuerdo a información de la Asociación Nacional de Empresas de Eficiencia Energética, el crecimiento económico experimentado por Chile ha implicado un aumento de 122% en el consumo de energía entre 1991 y 2011, y se proyecta que el consumo eléctrico del país podría crecer entre un 5,5% y 6,5% anualmente hasta el año 2020. Lo anterior implica la necesidad de generar estrategias que permitan asegurar un suministro de energía a futuro, entre las que se cuentan iniciativas destinadas a incrementar la eficiencia en el consumo eléctrico (ANESCO Chile 2018). Como parte de este objetivo, el Ministerio de Energía ha diseñado e implementado un Programa de recambio de luminarias de alumbrado público -junto con una serie de otras iniciativas desarrolladas por la División de Eficiencia Energética de la Subsecretaría de Energía y la AChEE-, entendiendo que esta estrategia, más con otras

⁹ En caso que el financiamiento del Programa provenga de una única institución y no tenga aportes de terceros, no debe completarse esta columna.

iniciativas a nivel público y privado, contribuye al objetivo de incrementar la eficiencia energética en el territorio nacional¹⁰.

En esta línea, la principal fuente de información respecto de la situación país en términos de consumo y eficiencia energética se encuentra en el estudio “Apoyo a la Eficiencia Energética en el sector residencial y municipal, consultoría Técnica Alumbrado Público”, encargado por el Banco Interamericano de Desarrollo y el Ministerio de Energía el año 2013 (BID 2014). El estudio realizó un catastro del alumbrado público (AP) en Chile, basado en un estudio anterior realizado por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles, que indicaba que en el año 2005, el país contaba con 2.000.416 luminarias de alumbrado público. El estudio del BID actualiza estos datos -incluyendo una estimación para comunas inicialmente fuera del catastro- y señala que el país tenía, a la fecha, aproximadamente 2.420.000 luminarias de alumbrado público. Asimismo, el estudio encontró que el tipo de tecnología más predominante corresponde a las luminarias de vapor de sodio de alta presión, representando entre un 77% a un 89% del parque total de luminarias. A pesar que existe una alta heterogeneidad en términos de tecnologías de iluminación entre las distintas comunas, el análisis concluye que existe un espacio de mejora a través del recambio de luminarias por tecnologías más eficientes¹¹. Si bien el estudio permite un diagnóstico general respecto de la situación del alumbrado público en el país, es suficiente para contar con un orden de magnitud respecto del tamaño y la situación del parque lumínico en Chile, suficiencia que justifica la implementación del Programa.

Basado en este diagnóstico, en mayo de 2014 se presenta la Agenda de Energía, que establece los lineamientos de la política energética de los próximos años. Dentro de estos desafíos, se plantea como un eje de acción el avanzar hacia un sector energético eficiente y que gestiona el consumo. En esta línea, el documento establece el compromiso de apoyar la gestión energética de las municipalidades, poniendo especial énfasis en el alumbrado público (eje 5, línea de acción 4). Entre las acciones establecidas, para cumplir este objetivo se encuentran (Ministerio de Energía 2014a):

- a. Recambio de 200.000 luminarias de alumbrado público, con énfasis en aquellas que utilicen tecnologías más ineficientes¹²
- b. Nuevos reglamentos de alumbrado público
- c. Apoyo a municipalidades en planes de gestión y asesoría en la determinación de las opciones tarifarias más convenientes

Con el fin de dar cumplimiento a este anuncio presidencial, es que nace el Programa de Recambio y Reemplazo de Alumbrado Público para Municipios, el cual se inicia en agosto de 2014 con el lanzamiento del “Concurso para la selección de municipios beneficiarios del Programa de recambio de alumbrado público”.

En resumen, el Programa justifica su existencia en la necesidad de avanzar hacia una mayor eficiencia energética a nivel país, en un contexto de creciente demanda por

¹⁰ Por ejemplo, la AChEE participa, además del Programa de recambio de alumbrado público, en otros proyectos, como el Programa de eficiencia energética en edificios públicos y el Programa educativo integral en eficiencia energética (<https://www.acee.cl/proyectos-emblematicos/>). Por su parte, la Subsecretaría de Energía lidera otras iniciativas que buscan, por ejemplo, aumentar la eficiencia energética a nivel domiciliario y a nivel de industrias (<http://www.energia.gob.cl/eficiencia-energetica>).

¹¹ Por ejemplo, el ranking de eficiencia usado por el Programa para medir la eficiencia energética de las luminarias, sitúa a las luminarias de vapor de sodio de alta presión en el puesto 6 de 10 (siendo 10 la tecnología más eficiente) e incluyéndolas en el grupo de tecnologías “Menos eficientes” (ver Anexo 3). Para un análisis técnico y comparación de las distintas tecnologías disponibles, ver BID (2014), capítulo 2.2.

¹² Ineficiencia del parque medida de acuerdo a tecnología en uso. Ver criterio 1 para selección de beneficiarios, descrito en el Anexo 3.

consumo eléctrico. La acción del Estado se encuentra avalada por:

- a. La relevancia de incorporar el consumo del sector público (en este caso AP municipales) -entendido como un actor importante dentro de los demandantes de energía a nivel nacional- como parte del esfuerzo de incrementar la eficiencia energética a nivel país.
- b. La mayor eficiencia lograda a través de economías de escala en el recambio de AP (compromiso de cambiar 200.000 luminarias) versus iniciativas individuales a nivel municipal.
- c. Un rol coordinador y regulador que permita implementar las acciones del Programa bajo determinados estándares (respaldado, por ejemplo, por la generación de reglamentos de alumbrado público)
- d. La necesidad de instalar nuevas capacidades en términos técnicos y de gestión del AP a nivel municipal.
- e. La necesidad de cumplir con el compromiso presidencial establecido en la Agenda de Energía 2014.

En este sentido, a juicio del Panel, la estrategia de implementar un Programa que incluye recambio de luminarias, capacitación y que considera la aplicación de nuevos estándares y regulaciones en la materia, a nivel de municipalidades, parece adecuado, en tanto la brecha existente en cuanto a la cantidad de luminarias que persisten con tecnologías ineficientes continúa siendo muy amplia, si se considera que según el catastro cerca del 89% (de 2.420.000) presentaba estas tecnologías y el Programa contribuyó aproximadamente sólo con un 10% de luminarias reemplazadas. Al respecto cabe señalar que la cifra de 200.000 luminarias no presenta una justificación de origen, ya que solo aparece expresada en la Agenda de Eficiencia Energética 2014. No obstante, el diagnóstico basado en el catastro y la ineficiencia de las tecnologías, permanecerá vigente mientras no se aborde la totalidad de la brecha.

Unido a lo anterior, los nuevos reglamentos de alumbrado público generan un marco que permite al Programa asegurar que el recambio de AP realizado se adecúa a las nuevas tecnologías y posibilidades disponibles actualmente; el apoyo a municipalidades en la gestión del AP instala capacidades que permitirán mejorar la eficiencia energética y eventualmente la gestión general de los municipios; finalmente, el recambio de alumbrado por tecnologías más eficientes contribuye directamente al cumplimiento del objetivo de reducir el consumo energético del país en un 20% al año 2025, planteado en la Agenda de Energía 2014.

Por otra parte, la intervención centralizada del Estado se justifica bajo el supuesto asociado a las restricciones financieras de sus beneficiarios. Esto ya que el diseño del Programa contempla la entrega de un subsidio, considerando que los municipios no son capaces de realizar las acciones propuestas con recursos propios. En parte, este supuesto está capturado en los criterios de selección de las bases del concurso realizado en 2014, al determinar como indicador de elegibilidad, la insuficiente capacidad de los municipios de generar ingresos propios (75% con mayor dependencia de los recursos del Fondo Común Municipal de SUBDERE).

Finalmente es importante señalar que la intervención del Estado en materia de resguardar la eficiencia energética en el alumbrado público, resulta obvia, en consideración a que este es un bien público, provisto por los municipios. En efecto, es pertinente que la población potencial y objetivo corresponda a la totalidad de los municipios, al considerar que en todas las comunas persiste alumbrado público con tecnología ineficiente. También se considera adecuado que la población objetivo se constituya por municipios que sean capaces de financiar sus proyectos por aporte de los Gobiernos Regionales, teniendo en

cuenta que la Agenda de Eficiencia Energética 2014 los establece como colaboradores directos. Bajo esta definición, como se dijo anteriormente, cualquier municipio podría ser beneficiario del Programa.

DESEMPEÑO DEL PROGRAMA

2. EFICACIA Y CALIDAD

2.1. Eficacia a nivel de resultados intermedios y finales (evaluación del cumplimiento de objetivos de propósito y fin).

Como se mencionó anteriormente, el Programa se crea con el fin de “Contribuir a la Eficiencia Energética del país” y cuyo propósito es el de “Reducir el consumo de energía eléctrica en los municipios que se encuentran en el alcance del programa”, lo cual se plantea materializar a través de la instalación de 200.000 luminarias LED en un conjunto de municipios seleccionados originalmente vía concurso, a los que se sumaron otros municipios, conforme a los sucesos ya descritos.

El Programa cumple el objetivo a nivel de propósito, pues genera una disminución porcentual en el consumo de energía eléctrica anual en los municipios atendidos (disminución de 43% del consumo global¹³). El Programa desarrolla los datos de disminución de consumo en base a cálculos teóricos reconocidas internacionalmente¹⁴. En este sentido, es importante que el Programa pueda tener mediciones reales -esto es de los niveles de consumo efectivos antes y después del recambio de luminarias- que le permitan medir efectivamente sus resultados. En el marco de la evaluación, el Programa pudo contar con resultados de mediciones reales para 1.373 medidores de un total de 4.341, es decir, aproximadamente un tercio del total de medidores. De estos datos se puede concluir que el cálculo teórico medidos para la misma muestra es de 45% de disminución del consumo, valor muy cercano a la medición real¹⁵, estimada en un 41%. De ambos datos se obtuvo un promedio para efecto de establecer el resultado del indicador de Propósito.

También puede afirmarse que el Programa aporta al fin de “contribuir a la eficiencia energética del país”, reduciendo el consumo eléctrico en los municipios atendidos en las proporciones mencionadas. Los profesionales encargados del Programa manifiestan verbalmente, en las reuniones con ellos sostenidas, que algunos municipios atendidos estarían realizando inversiones adicionales para continuar el recambio de sus luminarias. Sería de interés investigar este aspecto, pues que los agentes se activen por iniciativa propia contribuye a validar que el Programa visibilizó beneficios a los Municipios.

En términos de cobertura, el Programa opera sobre el 30% de los municipios del país (105/345 municipios del país)¹⁶. Usando una definición alternativa de cobertura, basada

¹³ Resultado obtenido del cálculo teórico del total de datos. El cálculo real sólo ha sido posible de ser procesado en un 32% del total de medidores y cuyo resultado es de 41% de ahorro energético.

¹⁴ La forma empírica debería recoger una muestra de datos de los consumos de luz provenientes de los remarcadores (medidores) en el alumbrado público donde se hizo el recambio antes y después de las instalaciones. No es necesario en “todas las instalaciones del recambio”, sino sólo una muestra aleatoria y estadísticamente representativa que debería definirse con especialistas en este campo.

¹⁵ Es importante señalar que esta información fue generada en el marco de esta evaluación, mediante una solicitud realizada por el Programa a la Superintendencia de Electricidad y combustibles (SEC) y que, por lo tanto, no son datos que el Programa colecte de manera sistemática ni periódica.

¹⁶ La cifra incluye tanto los Municipios seleccionados mediante concurso (85), así como los participantes del piloto (7) y los municipios beneficiados con los aportes de los gobiernos regionales de Arica y Paríacota y Antofagasta. Un detalle de los beneficiarios por tipo de selección y entidad ejecutora se encuentra en el Cuadro 4.

en el número de luminarias en lugar del número de beneficiarios, el Programa tiene efecto en un 8% del total de las luminarias existentes en el país (considerando que se realiza el recambio de 200 mil luminarias de un total de 2.420.000 luminarias catastradas)¹⁷. Lo anterior ratifica el amplio espacio de crecimiento que queda por cubrir para lograr un recambio completo del parque lumínico.

2.2. Eficacia a nivel de Componentes (producción de bienes o servicios)

El Programa se despliega en dos componentes: **Componente 1** “Recambio de luminarias de alumbrado público” y **Componente 2** “Capacitaciones técnicas en gestión de la energía eléctrica entregada a los municipios”. La primera se orienta a producir el bien “luminarias instaladas” y la segunda, a crear capacidad en el recurso humano de los municipios para gestionar adecuadamente el bien instalado.

La eficacia del Programa a nivel de componentes es posible de medir, a través de las luminarias instaladas y las capacitaciones efectuadas a los funcionarios municipales. Existe una definición de la meta de luminarias a instalar y sus especificaciones técnicas, así como del número de municipios donde realizar capacitaciones; no obstante nada se señala respecto de la cantidad de funcionarios a capacitar o de las condiciones que deben tener dichos funcionarios para que la capacitación sea efectiva.

La tabla que sigue, basada en la información del Anexo 2, resume el nivel de producción de los componentes y con las metas correspondientes en cuanto a eficacia se refiere.

Cuadro 3: Síntesis de Indicadores por Componentes en el período de 2014-2017

COMPONENTES	Indicador	Valor total Período (2014-2017)
Componente 1: Recambio de luminarias de alumbrado público	Cantidad de luminarias cambiadas	152.831
	% luminarias cambiadas v/s el comprometido (al 31 de dic de 2017)	76,42%
Componente 2: Capacitaciones técnicas en gestión de la energía eléctrica entregada a los municipios	Número de funcionarios capacitados	443
	% municipios donde se realizaron capacitaciones	78,10%

Fuente: Elaboración propia.

El Programa comienza en 2014 con una etapa de puesta en marcha que incluyó actividades como el proceso de selección de los municipios, un piloto llevado a cabo en la comuna de San Clemente, la firma de Convenio con la AChEE, y la preparación de la licitación para recambio masivo de luminarias comenzando en 2015. A pesar de no contar con instalación de luminarias ni capacitaciones durante su primer año (2014), al 31 de diciembre de 2017 se constata que han sido instaladas el 76,42% de las 200.000 luminarias comprometidas.

¹⁷ Catastro contenido en el Estudio “Apoyo a la Eficiencia Energética en el sector residencial y municipal, consultoría Técnica Alumbrado Público”, encargado por el Banco Interamericano de Desarrollo y el Ministerio de Energía el año 2013 (BID 2014).

Por otro lado, las capacitaciones han sido realizadas (con fecha de corte 31 de diciembre de 2017) a un 78% de los municipios beneficiarios del programa. Si bien las capacitaciones son entregadas a cada municipio beneficiario sin excepción (al 100% de los municipios beneficiarios), éstas se realizan como última instancia del proceso de contratación, es decir, una vez terminadas las obras de recambio de luminarias, se procede con la capacitación al equipo municipal, razón por la cual existe un desfase entre los proyectos de instalación de luminaria y las capacitaciones efectivamente otorgadas.

Tomando en cuenta que esta evaluación considera la información hasta el 31 de diciembre de 2017, se proyecta que la meta de instalar las 200.000 luminarias se cumpla durante 2018¹⁸, como asimismo la capacitación al 100% de los beneficiarios.

Considerando los resultados de las mediciones en la dimensión de eficacia y las características de los componentes, éstas responden a lo planificado por el Programa y a las restricciones en materia de cantidad establecidas para cada postulante a cambiar sus luminarias. De esta forma se generó información que también permite actualizar los datos que cada comuna dispone respecto de sus luminarias y a su vez cuántas de ellas siguen siendo ineficientes, lo que podría ser un nuevo indicador de acceso al Programa

2.3. Cobertura y focalización del Programa

En primera instancia se desarrollaron proyectos pilotos cuya selección de beneficiarios se basó únicamente en la disposición de las comunas consultadas en facilitar la información que permitiese llevarlos a cabo.

Posteriormente se establecieron criterios claros de focalización de los beneficiarios, restringiendo el acceso a aquellos municipios que pertenecieran al 75% con mayor dependencia de recursos del Fondo Común Municipal, según indicador de la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, SUBDERE, constituyéndose en el principal criterio de focalización en cuanto a los recursos propios del Programa, el volumen de beneficiarios y los resultados obtenidos respecto de eficiencia energética lograda.

El Programa define como beneficiarios a “aquellos municipios que se les adjudique el beneficio” (Ministerio de Energía 2014b). Estableciendo cinco criterios de selección: i) ineficiencia del parque; ii) ingresos; iii) equidad eléctrica; iv) seguridad; v) gestión. El detalle respecto de las ponderaciones, definición y forma de cálculo de cada uno de estos indicadores se encuentra en el Anexo 3.

Finalmente surge la participación de los Gobiernos Regionales, producto de la invitación que realiza la Subsecretaría de Energía a colaborar con el Programa, según lo previsto en la Agenda de Eficiencia Energética 2014. Eventualmente, todas las comunas podrían haber sido beneficiarias si sus Gobiernos Regionales hubiesen colaborado con esta iniciativa.

En consecuencia, el número de beneficiarios efectivos totales del Programa es de 105 municipios, los que se fueron incorporando gradualmente, por la vía del concurso realizado en 2014, proyectos pilotos y finalmente por solicitud de los Gobiernos Regionales que aportaron con recursos adicionales al presupuesto inicial del Programa durante el período de evaluación que coincide con el período de implementación del programa, como se detalla a continuación:

¹⁸ De acuerdo a lo informado por el Programa la cantidad de luminarias faltantes para el cumplimiento de la meta se encuentran en proceso de implementación.

Cuadro 4: Detalle del número de Municipios, luminarias instaladas, forma de integrarse al programa y ejecutor de su implementación

Ejecutor	Formato	Municipios beneficiarios	N° de Luminarias		
			<i>Cambiadas al 31-12-2017</i>	<i>En proceso</i>	<i>Total esperado</i>
			<i>(a)</i>	<i>(b)</i>	<i>(a+b)</i>
AChEE	Concurso	15	46.133	6.451	52.584
	Pilotos	7	17.312	3.082	20.394
	Aportes adicionales de GORE	13	32.557	14.536	47.093
	Total	35	96.002	24.069	120.071
Subsecretaría	Concurso	70	56.829	18.802	75.631
	Pilotos	0	0	0	0
	Aportes adicionales de GORE	0	0	0	0
	Total	70	56.829	18.802	75.631
TOTAL	Concurso	85	102.962	25.253	128.215
	Pilotos	7	17.312	3.082	20.394
	Aportes adicionales de GORE	13	32.557	14.536	47.093
	Total	105	152.831	42.871	195.702

Fuente: Elaboración propia en base a información del Programa; Anexo 3.

A partir de lo anterior se desarrollaron los proyectos, por el equipo de profesionales del programa, los que no coinciden con el número de beneficiarios necesariamente, ya que un municipio puede tener más de un proyecto o bien ser parte de un proyecto mayor.

Finalmente, el Panel considera que la cobertura del Programa es suficiente para cumplir con la meta establecida en su origen, esto es, recambio de 200.000 luminarias de alumbrado público, no obstante y en atención a la realidad país, el Programa brinda servicios solamente al 30% de las comunas del país. Por otra parte, en términos de su efecto en el parque lumínico, el Programa propone el recambio de cerca de un 10% de éste. Ambos datos indican que existe un potencial para expandir la cobertura del Programa incluso con el actual diseño.

2.4. Calidad

Respecto de la satisfacción de los usuarios, durante el mes de mayo del presente año y en el marco de la evaluación, el Programa realizó una encuesta electrónica de satisfacción de sus beneficiarios¹⁹. Esta encuesta fue enviada a 98 de los 105 municipios considerados en el Programa, ya que son los que hasta ahora han recibido la capacitación. De las 98 encuestas, fueron recibidas 42 respuestas, lo que el Panel consideró una muestra adecuada, ya que representa cerca del 40% de los consultados²⁰.

¹⁹ Anexo 6: Informe Encuesta de Satisfacción de Usuarios realizada por el Programa.

²⁰ Es importante señalar que esta encuesta fue realizada en el marco de esta evaluación y, por lo tanto, que la información obtenida no es levantada por el Programa de forma sistemática ni periódica.

La encuesta fue realizada mediante un formulario web de la empresa Google, el que permite sistematizar las respuestas obtenidas mediante una base de datos de fácil manejo. De los 42 municipios que responden los resultados se resumen a continuación:

Cuadro 5: Resultados de la Encuesta de Satisfacción a Municipios

	Nota entre 1 y 4	Nota 5	Nota 6 o 7
Tiempo de instalación de las luminarias	9%	24%	67%
Comunicación con el administrador del contrato (Subsecretaría de Energía o AChEE)	4%	10%	86%
Ahorro de costos	16%	17%	67%
Valoración de beneficios para la comunidad	9%	2%	89%
Capacitación recibida	14%	8%	78%
Calificación general	9%	7%	84%

Fuente: Elaboración propia en base a información del Ministerio de Energía.

* Nota: Calificación va desde 1 (muy insatisfecho) a 7 (muy satisfecho). Valores indican porcentaje de respuestas en cada categoría respecto del total de respuestas recibidas.

En términos generales, la encuesta señala una muy buena percepción del programa en todos los aspectos por lo que esta pregunta (calificación general) alcanzó un promedio cercano al 80% con calificación mayor o igual a 6. La mayor valoración la presenta el aspecto de “Valoración o beneficios para la comunidad percibidos por el municipio del recambio de las luminarias”, con un 89%.

Con los resultados obtenidos se construyeron indicadores de calidad, tanto a nivel de propósito como de componentes. A nivel de Propósito el indicador “Porcentaje de beneficiarios que evalúan positivamente el Programa” fue construido en base a tres preguntas (como se detalla en el Anexo 2a). Su resultado es de 63,5% de beneficiarios que evalúan positivamente el Programa.

Para el Componente 1 el indicador construido (en base a dos preguntas de la encuesta) es “Porcentaje de beneficiarios que evalúan positivamente el proceso de recambio de luminarias”, cuyo resultado es de 76,2% de evaluación positiva.

En relación a las capacitaciones realizadas (Componente 2), el indicador construido en base a la consulta directa es “Porcentaje de beneficiarios que evalúan positivamente la capacitación recibida” cuyo resultado es del 67% de valoración positiva.

En este sentido, la mayor valoración se muestra en el proceso propiamente tal, lo que incluye el tiempo de demora del recambio de las luminarias y la comunicación con la contraparte. Esta última especialmente valorada por los beneficiarios ya que el 85% de las respuesta de esta pregunta, la calificó con nota mayor a 6 (Ver Anexo 6).

3. ECONOMÍA

Durante el período de evaluación, el presupuesto del Programa Recambio de Luminarias de Alumbrado Público se ha ido incrementando sostenidamente hasta 2017, año en que los recursos asignados son más del doble de los años anteriores. Esto tiene su

explicación debido a que entre 2016 y 2017 se ejecutan la mayoría de las obras de recambio del alumbrado, mientras que en los dos primeros años el trabajo se centró en la selección de los beneficiarios, el levantamiento de la información y el desarrollo de los proyectos.

3.1. Fuentes y uso de recursos financieros

Para su financiamiento, el Programa tiene asignación de recursos en la Ley de Presupuestos, tanto en la línea denominada Aplicación Plan de Acción de Eficiencia Energética, como en las transferencias realizadas a la Agencia Chilena de Eficiencia Energética desde los Subtítulos 24 y 33, donde también fue posible identificar aportes de los Gobiernos Regionales de Antofagasta y Arica y Parinacota, entre los años 2015 y 2017. Los recursos aportados por los Gobiernos Regionales son ingresados al Presupuesto de la institución sumándose directamente al Programa 05 como asignaciones específicas al Programa (es decir, no se identifican desagregadamente de esta línea presupuestaria), para ser transferidos a la Agencia Chilena de Eficiencia Energética que, como se explica en el Anexo 3, es un actor relevante en el cumplimiento de las metas del Programa, por cuanto su carácter de entidad privada permite agilizar los procesos administrativos y por tanto mejorar la gestión.

En relación a las fuentes de financiamiento del Programa, se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 6: Fuentes de Financiamiento del Programa 2014 -2018 (Miles de \$ 2018)

Fuentes de Financiamiento	2014		2015		2016		2017		2018		Variación 2014-2017
	Monto	%	Monto	%	Monto	%	Monto	%	Monto	%	
1. Presupuestarias	91.083	100%	6.129.379	100%	5.677.048	100%	15.456.587	100%	9.599.944	100%	10.440%
1.1. Asignación específica al programa	0	0%	5.985.664	98%	5.222.741	92%	15.018.510	97%	9.161.974	95%	-
1.2. Asignación institución responsable	91.083	100%	143.716	2%	454.307	8%	438.077	3%	437.970	5%	381%
1.3. Aportes en presupuesto de otras instituciones públicas	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	-
2. Extrapresupuestarias	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	-!
2.1 Otras fuentes, sector privado	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	-
Total	91.083		6.129.379		5.677.048		15.456.587		9.599.944		10.440%

Fuente: Anexo 5; www.dipres.cl

Cuadro 7: Desglose del Gasto Devengado en Personal, Bienes y Servicios de Consumo, Transferencias, Inversión y otros 2014 -2017 (Miles de \$ 2018)

	2014		2015		2016		2017		Variación 2014-2017
	Monto	%	Monto	%	Monto	%	Monto	%	
1. Personal	84.037	0,39%	110.932	1,22%	339.867	2,87%	348.101	1,74%	314,22%
2. Bienes y Servicios de Consumo	5.033	0,02%	24.836	0,27%	89.552	0,76%	89.976	0,45%	1687,67%
3. Transferencias	21.193.018	99,57%	8.926.754	98,42%	11.392.071	96,17%	19.568.803	97,8%	-7,66%
4. Inversión	2.013,03	0,01%	7.947,48	0,09%	24.888,07	0,21%	0,00	0,0%	-100%
5.Otros (identificar)	0,00	0%	0,00	0%	0,00	0%	0,00	0%	-
Total Gasto Devengado	21.284.101	100%	9.070.470	100%	11.846.378	100%	20.006.880	100%	-6,00%

Fuente: Anexo 5; www.dipres.cl.

Como se muestra en el cuadro anterior, el Programa Recambio de Luminarias de Alumbrado Público, utiliza sus recursos financieros mayoritariamente para otorgar el beneficio correspondiente a las Municipalidades seleccionadas (beneficiarios) por la vía de las transferencias, lo que representa en promedio del período de evaluación, el 98% del gasto devengado, utilizando recursos marginales respecto del total, para gastos de administración y producción.

3.2. Ejecución presupuestaria del programa

Como se muestra en el Cuadro 9, el Programa presenta una ejecución presupuestaria mayor a la planificada, para el período 2014-2017, respecto del presupuesto inicial, mientras que respecto del presupuesto vigente, la ejecución presupuestaria es del 100%, durante los cuatro años.

Cuadro N° 8: Presupuesto del Programa y Gasto Devengado 2014-2017 (Miles de \$ 2018)

Año	Presupuesto Inicial (a)	Presupuesto Vigente (b)	Gasto Devengado del Presupuesto Ejecución (c)	Indicadores Ejecución y Planificación Presupuestaria	
				(c/b)	(c/a)
2014	91.083	21.284.101	21.284.101	100,0%	23367,8%
2015	6.129.379	9.070.470	9.070.470	100,0%	148,0%
2016	5.677.048	11.846.378	11.846.378	100,0%	208,7%
2017	15.456.587	20.006.880	20.006.880	100,0%	129,4%

Fuente: Subsecretaría de Energía; www.dipres.cl.

La explicación para los años 2015, 2016 y 2017, se encuentra en los aportes recibidos desde los Gobiernos Regionales de Antofagasta y Arica y Parinacota, cuyos montos son coincidentes con el aumento reflejado en los presupuestos vigentes cada año, los que se utilizaron en su totalidad para ser transferidos a la Agencia Chilena de Eficiencia Energética. En este punto cabe aclarar que la sola transferencia a este organismo se traduce en ejecución presupuestaria para la Subsecretaría de Energía, aun cuando los recursos no se hayan gastado efectivamente. Esta es parte de las ventajas de contar con un organismo de derecho privado, ya que más allá de la ejecución presupuestaria que es posible mostrar desde la Subsecretaría, la acción de la AChEE no se ve interrumpida al finalizar el año, como es el caso de las instituciones públicas.

3.3. Aportes de Terceros

Como se señalara en párrafos anteriores, fue posible identificar sólo aportes de los Gobiernos Regionales de Antofagasta y Arica y Parinacota, entre los años 2015 y 2017, atendido el compromiso consignado en la Agenda de Energía, en el Eje 05, Línea de Acción N° 4, punto 4.1, que señala: “En conjunto con SUBDERE y los Gobiernos Regionales, desarrollaremos un gran esfuerzo a lo largo del país para modernizar el alumbrado público de las comunas que aún no han invertido en Eficiencia Energética y ahorro en sus cuentas de la luz”. Dichos recursos son ingresados al Presupuesto de la institución directamente al Programa 05, para ser transferidos a la Agencia Chilena de Eficiencia Energética.

Para el año 2015, se consideraron M\$2.700.000, correspondiente a una transferencia para gastos de capital del Gobierno Regional de Antofagasta, tramitado mediante Decreto de Hacienda N°1422, de 06-10-2015. Respecto al año 2016, también a través de una transferencia para gastos de capital, se contemplaron M\$ 3.800.000 del Gobierno Regional de Antofagasta y M\$2.077.803 del Gobierno Regional de Arica y Parinacota, tramitados mediante el Decreto de Hacienda N°68, de 04-02-2016 y Decreto de Hacienda N°367, de 30-03-2016, respectivamente. Finalmente, para el año 2017, se consideraron M\$4.434.983 como una transferencia para gastos de capital del Gobierno Regional de Arica y Parinacota, tramitado mediante Decreto de Hacienda N°40, de 25-01-2017.

3.4. Recuperación de Gastos

En el Programa Recambio de Luminarias de Alumbrado Público, no existe recuperación de gastos, por tratarse de un subsidio otorgado a las Municipalidades, especialmente a las que cuentan con menos recursos, con el fin de atender los compromisos de una Agenda de Energía planteada desde el Gobierno Central y específicamente como compromisos presidenciales. No parece necesario ni posible recuperar los gastos del Programa ya que lo que se pretende lograr con esta inversión es alcanzar los ahorros energéticos propuestos, en el territorio nacional.

A pesar de esto, el Programa muestra que el recambio permite no sólo reducir el consumo energético, sino además los costos en energía para las municipalidades. Si bien el Programa en su diseño no contempla recuperación de gastos, el ahorro generado en las municipalidades debiera considerarse como un subsidio adicional del Programa, ya que no sólo se subsidia la adquisición e instalación de nuevas luminarias, sino que, además, estas generan una reducción en la cuenta municipal de consumo eléctrico.

Ahora bien, en un ejercicio de estimación del Periodo Medio de Recuperación de la Inversión (PMRI), en atención a supuestos económicos razonables, se puede determinar su plazo.

Para realizar el cálculo propuesto se consideró la inversión efectiva o marginal en luminaria, entendiendo ésta como el valor de la luminaria eficiente menos el valor de la luminaria ineficiente bajo el supuesto que estas no se hubiesen cambiado. Para establecer este valor se supuso el 35% del valor de una luminaria eficiente (ya que de no cambiar la luminaria, la ineficiente podría haber seguido operando). El valor de la luminaria eficiente fue considerado como el valor promedio de los cuatro años de funcionamiento del programa, esto es \$ 325.728 por luminaria (en moneda 2018), como se observa en el Cuadro 9.

Establecidas estas variables se calculó el PMRI, de la siguiente forma:

$$IMg = \frac{A}{r} \left[1 - \frac{1}{(1+r)^n} \right]$$

Donde:

Img: Inversión efectiva

A: Ahorro anual equivalente

r: tasa de interés. Tasa del 4,2%

n: PMRI en años

De acuerdo con lo anterior se observa:

Cuadro N° 9: Valores usados para estimación del periodo de recuperación de la inversión del Programa (Miles de \$ 2018)

Item	Valor Unitario	Valor Inversión Total	Ahorro
Cantidad de luminarias instaladas	152.831		
Valor Luminaria Nueva	\$ 325.728	\$ 49.781.335.968	
Tasa de Valoración Lum. Antigua	35%		
Valor Luminaria Antigua	\$ 114.005	\$ 17.423.467.589	
Valor Inversión Efectiva		\$ 32.357.868.379	\$ 3.085.813.222
Tasa de Descuento	4,2%		
Período de Retorno Inversión (años)	14		

Fuente: Elaboración propia

El PMRI es de 14 Años, lo que se presume razonable en caso de inversiones de carácter público. No obstante este resultado, hay que destacar que pocos programas públicos ofrecen la posibilidad de recuperar la inversión de manera directa, sobre la base del ahorro, como lo hace esta intervención u otras asociadas a la eficiencia energética, reflejada en la disminución del gasto vinculado al consumo eléctrico.

Se debe hacer hincapié en que no se han considerado las externalidades que se provocan por este tipo de Inversiones (disminución en la frecuencia de la manutención; mayor capacidad lumínica que favorezca un entorno seguro), las cuales son razonables de suponer que debiesen contribuir a disminuir el PMRI.

4. EFICIENCIA

El compromiso del recambio de alumbrado público con tecnologías que permitan la eficiencia energética, está en sintonía con los programas desarrollados en otros países de la región como Argentina y Colombia (Grupo Energía Bogotá 2018). Este último con el Plan Distrital de Desarrollo “Bogotá Mejor para Todos 2016-2019”, cuyo objetivo, entre otros, es lograr una mayor eficiencia energética y mejorar la calidad de vida para los ciudadanos a través de la gestión óptima en el servicio de alumbrado público, para lo cual se desarrollan programas de modernización de luminarias y soterramiento de redes en Bogotá. Asimismo, en Buenos Aires Argentina, Como parte del Plan de Reconversión del Alumbrado Público, desarrollado por el Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, a partir del año 2013 se llevó a cabo la modernización a tecnología LED de alrededor de 91.000 luminarias, que corresponde a cerca del 75% del total (126.000 luminarias en el año 2013). Dicho proyecto, denominado Buenos Aires LED, fue desarrollado por Philips Argentina.

En términos de eficiencia, el **Componente 1** ha logrado una disminución de costos en el precio promedio de la luminaria instalada (como se detalla más adelante), tanto por la incorporación de más empresas (mejorando la competitividad) como por el número de luminarias contratadas.

Respecto del **Componente 2**, no ha sido posible establecer indicadores de eficiencia de su implementación, principalmente porque no fue establecido un formato estándar para las capacitaciones realizadas (duración, contenidos, cantidad de alumnos, entre otros), que permitieran determinar los recursos óptimos necesarios para su implementación.

4.1. A nivel de resultados intermedios y finales.

Lo más relevante de señalar en este punto es que en relación al indicador de eficiencia a nivel de propósito: “Cambio porcentual en el costo de la energía eléctrica anual”, su resultado fue de un 43% de disminución del costo de la energía eléctrica en relación al año 2014 cuyo valor era de MM \$7.121. aproximadamente y con corte a diciembre 2017, cuya cifra alcanzó los MM\$ 4.035 aproximadamente.

Cabe señalar que este indicador es considerado por el Programa con frecuencia de medición anual y es medido en función de los valores por KWh consumidos en los periodos medidos, no obstante, no fue posible obtener por parte del Panel los datos desagregados por año y por valor del KWh, presentándose solo los montos globales correspondientes a los consumos 2014 y 2017.

4.2. A nivel de actividades y/o componentes. Relaciona gastos con productos

Respecto de la eficiencia medida para el componente 1, el indicador “disminución de costos de luminarias vía licitación”, los precios de estas fueron:

Cuadro 10: Valor promedio de las luminarias cambiadas cada año en pesos (\$) 2018

Año	2014	2015	2016	2017	Variación 2014 - 2017
Precio Luminaria	\$390.028	\$342.995	\$307.051	\$263.119	-32,53%

Fuente: Anexo 2 (b).

Lo anterior da cuenta de una disminución del valor de las luminarias a lo largo de la ejecución del programa, señal de una potencial mejora en eficiencia a lo largo de los años. Los datos del Cuadro 10 son interesantes de contrastar, por ejemplo, con los costos de otras licitaciones similares (recambio de alumbrado público) ejecutados por fuera del programa. Como muestra el Cuadro 11, en licitaciones realizadas durante los años 2015-2018 (mismos años en que fueron hechas las licitaciones del programa), el costo por luminaria va desde los \$314.514 hasta sobre los \$900.000, siendo las licitaciones con menor precio las más recientes.

Cuadro 11: Proyectos de recambio de alumbrado público ejecutados fuera del Programa (\$2018)

Comuna	ID Licitación	Año	Cantidad de luminarias	Adjudicado c/iva	Precio por luminaria instalada
Concepción	2417-47-LP15	2015	122	\$72.845.282	\$597.092
Puerto Cisnes	3791-59-LR15	2015	440	\$404.636.933	\$919.629
Olmué	3333-24-LR16	2016	2,551	\$1.118.02.571	\$438.269
Rinconada	3445-242-LQ16	2016	310	\$153.454.962	\$495.016
San Fernando	2817-15-LQ16	2016	439	\$223.561.813	\$509.252
La Unión	3336-42-LP16	2016	79	\$61.235.415	\$775.132
San Javier	2319-30-LE16	2016	38	\$33.268.436	\$875.485
La Junta	3791-29-LR16	2016	303	\$266.698.950	\$880.195
Maipú	2770-21-LR17	2017	5,554	\$1.746.813.040	\$314.514
Parral	2600-17-LQ17	2017	600	\$211.089.456	\$351.816
Licantén	5293-31-LR17	2017	1,556	\$614.330.002	\$394.814
Rio Bueno	3833-48- LE17	2017	55	\$21.782.180	\$396.040
Quinchao	3768- 3-LQ17	2017	380	\$193.816.543	\$510.044
Cuaraco de Vélez	3296-16-LQ17	2017	394	\$273.884.146	\$695.137
San Rafael	552578-5-LQ18	2018	286	\$101.164.211	\$353.721
Queile3	2993-7-LQ18	2018	398	\$207.958.212	\$522.508

Fuente: Elaboración propia en base a www.mercadopublico.cl.

El Cuadro 12 resume esta información. Se observa que, al igual que en el caso del Programa (Cuadro 10) el valor de las luminarias ha ido disminuyendo en el tiempo. Sin embargo, al comparar los precios unitarios de recambio realizado por el Programa versus el hecho directamente por las municipalidades, los valores obtenidos por el Programa son menores para cada año.

Cuadro 12: Resumen valor luminarias proyectos ejecutados fuera del Programa (\$2018)

	2015	2016	2017	2018	Variación 2015-2018
Número de licitaciones	2	6	6	2	-
Promedio simple (sumatoria precio por luminaria/ número de licitaciones)	758.361	662.225	443.727	438.115	-42,23%
Promedio ponderado (sumatoria monto adjudicado/ número de luminarias)	849.612	498.990	358.557	451.933	-46,81%

Fuente: Elaboración propia en base a www.mercadopublico.cl.

Al comparar estos datos con los costos para el programa, se observa que éste tiene valores en el rango inferior, más bajo incluso que el valor más barato exhibido en los cuadros 11 y 12. Lo anterior recalca el punto que el Programa no sólo ha ido aumentando su eficiencia, sino además, logra realizar el recambio de luminarias de alumbrado público a un menor costo.

Por otra parte y como se señala en el Anexo 3, la operación del Programa se encuentra radicada tanto en la Subsecretaría de Energía como en la Agencia Chilena de Eficiencia Energética. La decisión de incorporar en el proceso de producción de los bienes a este organismo privado, ha generado toda clase de ventajas que van desde ahorros de tiempo y gastos de administración, hasta disminución en los costos por recurso humano.

Por otra parte, el implementar este Programa desde el nivel central, ha significado un acceso equitativo para el total de los Municipios, asegurando el beneficio a cada uno de ellos de forma integral. Contar con solo un equipo de profesionales especializados que abordan el total de los proyectos, implica un ahorro significativo en recursos humanos, ya que de lo contrario cada Municipalidad tendría que haber contado con su propio equipo, es decir, 105 equipos especializados, lo que se ve difícil, particularmente en las comunas que tienen mayor dependencia del Fondo Común Municipal y que son justamente las beneficiarias del programa. De acuerdo con lo señalado por el Programa, el equipo óptimo para llevar a cabo un proyecto de esta especialidad, por cada municipio sería el siguiente:

Cuadro N° 13: Estimación de gastos para llevar a cabo el programa, incluyendo equipo completo por comuna (Miles de \$ 2018)

Equipo óptimo para desarrollo de proyecto "Recambio de luminaria de AP" en un municipio		Costo bruto anual	Costo por 105 municipios (solución sin Programa)
Dotación	Costo bruto mensual		
Ingeniero	2.400.000	28.800.000	3.024.000.000
Ingeniero	1.700.000	20.400.000	2.142.000.000
Ingeniero	1.400.000	16.800.000	1.764.000.000
Técnico	800.000	9.600.000	1.008.000.000
Técnico	800.000	9.600.000	1.008.000.000
Costo total	7.100.000	85.200.000	8.946.000.000

Fuente: Elaboración Propia en base a estimación realizada por el Programa.

Aún si solo se considerara un especialista por comuna, el costo sería el siguiente:

Cuadro N° 14: Estimación de gastos para llevar a cabo el programa, incluyendo sólo un especialista por comuna (Miles de \$ 2018)

Equipo mínimo para desarrollo de proyecto "Recambio de luminaria de AP" en un municipio		Costo bruto anual	Costo por 105 municipios (solución sin Programa)
Dotación	Costo bruto mensual		
Ingeniero	2.400.000	28.800.000	3.024.000.000

Fuente: Elaboración Propia en base a estimación realizada por el Programa

Este costo anual por los 105 municipios supera significativamente el costo anual más alto en que ha incurrido el Programa en el ítem Recursos Humanos, correspondiente a 348 millones en el año 2017 (de acuerdo a lo señalado en el Cuadro 3 del Anexo 5). Cabe hacer notar que para la solución sin Programa, sólo se estimó el costo del recurso humano especializado y no del que entrega soporte, como en el caso de las áreas jurídica, compras, finanzas, otras, que si están consideradas en los costos del Programa.

El análisis desarrollado anteriormente, además, se basa en el supuesto que tales profesionales están disponibles en cada una de las comunas y que los municipios tienen la capacidad de incorporarlos a su dotación, aunque la realidad en este ámbito son las amplias brechas en materia de competencias técnicas. Al respecto, es posible citar lo señalado en el "Informe Nacional de Capital Humano Municipal" de la Asociación de Municipalidades de Chile, que muestra que sólo un 29,36% es el promedio de profesionalización municipal, existiendo comunas de extrema precariedad de personal

profesional, como por ejemplo: Caldera con un 2,38%, Papudo con un 4,35%, Cisne con un 5,26%, Aysén 6,36%, Chañaral 7,58%, Canela 8% y Tocopilla 9,32%.

Por otra parte, desde el punto de vista de los procesos, el desarrollar los proyectos individualmente desde cada municipio, habría implicado el paso por la evaluación pre-inversional del Ministerio de Desarrollo Social, requisito que no aplica a los proyectos de la Subsecretaría de Energía. Dependiendo de las capacidades con que cuenta cada institución, el cumplimiento de estos requisitos varían desde seis meses hasta dos años e incluso más. Tratándose de los municipios, el modelo actual de intervención implica nuevamente, ahorro de tiempo, de recurso humano y gastos de administración, (que se transforman en incalculables por la cantidad de variables implicadas de acuerdo a cada realidad comunal) lo que impacta significativamente en los municipios con menores recursos, ya que de no recibir estos beneficios de forma integral, es prácticamente imposible para ellos realizar inversiones tan importantes para sus comunidades. No basta con recibir recursos financieros como subsidio, ya que su organización no cuenta con las capacidades para llevar a cabo dichas iniciativas, tanto por falta de recurso humano, como también de especialistas en las diversas materias implicadas como ya se señaló.

A lo anterior se suman las ventajas de contar con la operación de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética, organismo que no se encuentra sometido a los requisitos que debe cumplir un organismo público, como por ejemplo: identificación presupuestaria (DIPRES), toma de razón (CGR), publicación de la licitación (Mercado Público), y sobre todo porque no está regido por el año calendario para usar su presupuesto, lo que se traduce en mayor eficiencia por la continuidad de los procesos. En este sentido, cabe señalar la importancia del actor intermediario en el proceso. Si bien todos los actores señalados y otros organismos del Estado tienen una función de evaluación, fiscalización, transparencia, etc, se debe tener en cuenta que para implementar un Programa a cuatro años plazo, estos factores son prioritarios de analizar.

4.3. Gastos de Administración²¹

gastos de administración del Programa son financiados con recursos propios del mismo Programa y con recursos de la Subsecretaría de Energía, mediante los subtítulos 21, 22 . Desde la Metodología de cálculo del Anexo 5 se pueden determinar los gastos de administración del Programa. El desglose de dicho gasto se presenta en el cuadro siguiente:

²¹ Se deben incorporar los ítems considerados y los supuestos utilizados en las estimaciones.

Cuadro 15: Gasto de Administración en Recursos Humanos y Otros Gastos de Administración 2014-2017 (Miles de \$2018)

Descripción	2014	2015	2016	2017	2018
Profesional 1	36.352				-
Profesional 2	7.270	41.803	41.929	42.304	42.263
Profesional 3	-	5.263	32.306	35.939	35.904
Profesional 4		5.229	29.133	31.063	31.033
Profesional 5		8.714	29.133	31.063	31.033
Profesional 6		11.329	31.677	31.063	31.033
Total profesionales	43.622	72.338	164.177	171.432	171.265
Jefatura División Eficiencia Energética	21.319	20.294	19.780	-	
Secretaria División Eficiencia Energética	4.668	4.474	4.045	19.375	19.355
Total jefatura + asistente	22.860	24.767	23.825	4.264	4.260
Total personal	69.610	97.105	188.001	23.639	23.615
		-	-	195.071	194.881
Personal regiones		-	138.939	139.889	139.889
		-	-	-	
Jefe Depto Jurídico	10.733	10.285	5.158	5.052	5.048
Personal Depto. Gestión Financiera (transferencias)	3.697	3.542	3.496	3.556	3.554
Personal Depto. Gestión Financiera (compras)	-		4.272	4.533	4.527
Total personal soporte	14.429	13.828	12.927	13.140	13.128
Gastos de Administración en recursos humanos	84.037	110.932	339.867	348.101	347.898
Otros Gastos de Adm.	7.046	32.784	114.440	89.976	

Fuente: Anexo 5 y metodología de cálculo.

Así calculado, el total del gasto de administración del Programa en el período 2014-2017, alcanza valores de 0,43%, 1,58%, 3,83% y 2,19% de su gasto total, como se observa en el cuadro siguiente:

Cuadro 16: Gastos de Administración del Programa 2014-2017 (Miles de \$2018)

Año	Gastos de Administración	Gastos de producción de los Componentes	Total Gasto del programa	%(Gastos Adm / Gasto Total del programa)*100
2014	91.083	21.193.018	21.284.101	0,43%
2015	143.716	8.926.754	9.070.470	1,58%
2016	454.307	11.392.071	11.846.378	3,83%
2017	438.077	19.568.803	20.006.880	2,19%

Fuente: Anexo 5.

Considerando el total de la inversión del Programa que alcanza a 61 mil millones aproximadamente y el cumplimiento de la meta que alcanzaría al 98% (195.702

luminarias) del total de luminarias, los gastos de administración parecen bastante austeros en relación a otros programas con una lógica similar a éste (entrega del servicio externalizado, con licitaciones como medio para seleccionar proveedores externos). Por ejemplo, la evaluación del Programa de Alimentación Escolar de JUNAEB, muestra que sus gastos de administración fluctúan en un rango en torno al 5% - 2% del gasto total del Programa (SCL Econometrics 2013). Por otra parte, los gastos administrativos del Programa de Recambio de Alumbrado Público son muy inferiores a los de otros programas, como por ejemplo los del Servicio Nacional de Menores (SENAME), donde la cifra se sitúa en torno al 17% (FOCUS 2012). Al comparar el Programa con otro programa similar (ejecución basada en licitaciones a privados) de la Subsecretaría de Energía, se obtiene una conclusión similar: el programa “Techos Solares Públicos”²² -que busca implementar sistemas fotovoltaicos para autoconsumo en distintos edificios públicos- tuvo, de acuerdo a lo informado por la Subsecretaría de Energía, un gasto administrativo de 8% durante su primer año de ejecución, cifra que descendió a 3% en los siguientes años (programa en régimen), cifra ligeramente mayor (aunque dentro del orden de magnitud) a la registrada por el Programa de Recambio de Alumbrado Público.

III. CONCLUSIONES SOBRE EL DESEMPEÑO GLOBAL Y RECOMENDACIONES

1. CONCLUSIONES SOBRE EL DESEMPEÑO GLOBAL

El Programa contribuye a la solución del problema para el cual fue creado -disminución del consumo de energía e incremento de la eficiencia energética-, ya que como lo muestran sus indicadores, luego de cuatro años en implementación gradual, se ha logrado un cambio porcentual en el consumo de energía del 43% (porcentaje que resulta del promedio de los cálculos teóricos y mediciones reales de la SEC, 45% y 41% respectivamente).

El compromiso del recambio de alumbrado público con tecnologías que permitan la eficiencia energética, está en sintonía con los programas desarrollados en otros países de la región como Argentina y Colombia. Este último con el Plan Distrital de Desarrollo “Bogotá Mejor para Todos 2016-2019”. Asimismo, en Buenos Aires Argentina, como parte del Plan de Reconversión del Alumbrado Público, con el proyecto denominado Buenos Aires LED.

En términos de costos de producción, el Programa ha logrado una disminución gradual asociada al precio promedio de la luminaria instalada durante los cuatro años, tanto por la incorporación de más empresas (mejorando la competitividad) como por el volumen de luminarias contratadas. Este menor costo, además, se puede ratificar en comparación al presentado por la adquisición externa al Programa, por parte de algunos municipios.

Asimismo, se destaca el bajo costo de administración respecto al costo total del Programa, y más relevante aún es la estrategia de operación que implicó su administración centralizada, no sólo a través de la Subsecretaría de Energía, sino también de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética, con las ventajas asociadas a un organismo privado, que permite agilizar los procesos de compra, presupuestarios, jurídicos, entre otros; así como el disponer de un equipo de especialistas, meta difícil de replicar en cada una de las comunas beneficiarias, si es que los municipios hubiesen sido los ejecutores.

²² <http://www.minenergia.cl/techossolares/>

En cuanto al ahorro, en términos de costo de energía consumida por las municipalidades, generado por el Programa, éste estima que fue del orden de MM\$ 3.085 luego de cuatro años de su implementación. Por las características del Programa asociado a ahorro energético, el ahorro en recursos económicos va de la mano y se expresa directamente en las cuentas de electricidad que pagan los beneficiarios, por lo tanto, mientras mayor sea la cobertura de recambio de luminarias, mayor será el ahorro. Lo anterior podría verse incrementado por el constante avance en las tecnologías disponibles.

Considerando los beneficios económicos expuestos, queda en deuda la participación de los Gobiernos Regionales, ya que sólo dos de ellos se sumaron al apoyo financiero del Programa, aun cuando estos fueron incluidos desde el origen como un actor relevante y colaborador dentro de la Agenda de Energía 2014.

Respecto de la continuidad del programa, es necesario indicar que éste fue concebido con una meta fija de 200.000 luminarias cambiadas, en un periodo de cuatro años. El Programa se justifica en la medida que el problema que le dio origen y que trata del incremento del consumo energético del país y la necesidad de mayor eficiencia, sigue vigente. El catastro de luminarias sobre el cual se basa la implementación del Programa, presenta una amplia brecha que justifica suficientemente la continuidad de la intervención y una mayor cobertura.

Es necesario destacar que el Programa permite la equidad en el acceso al beneficio, ya que al entregar un servicio integral (desarrollo del proyecto, implementación y capacitación), favorece prioritariamente a los Municipios con menores recursos, lo que queda claro en el criterio para seleccionar a los beneficiarios del Programa (75% con mayor dependencia del Fondo Común Municipal), contribuyendo además a enfrentar la problemática existente en el sistema municipal, asociada a la falta de competencias técnicas.

Sin perjuicio de los resultados positivos exhibidos, el Programa no dispone de información que le permita hacer mediciones periódicas sobre su eficacia. Los datos recabados para medirla fueron consultados a la Superintendencia de Electricidad y Combustibles con un período de procesamiento de tres meses aproximadamente. Es importante destacar que este ejercicio se realizó con motivo de esta evaluación.

Respecto de las competencias que se pretendía desarrollar a través del componente de capacitación, éstas no pueden verificarse bajo el modelo implementado, ya que no se diseñó un contenido estándar, y la exigencia a las empresas que proveyeron el servicio no contempló con precisión las temáticas a abordar.

2. RECOMENDACIONES

Siguiendo lo expuesto anteriormente en las conclusiones, se proponen las siguientes recomendaciones para la ejecución futura del programa:

- Implementar un mecanismo de seguimiento de beneficiarios del Programa, que permita identificar oportunidades de mejoramiento continuo de las versiones futuras, por ejemplo: aspectos de mantención de las luminarias (protección, limpieza, pintura, cambio de focos, frecuencia de todos estos ítems), receptividad de la comunidad y nuevas necesidades de capacitación.
- Actualización del catastro de luminarias en consideración a su estado de eficiencia y a la información provista por los beneficiarios del Programa. A este catastro podría sumarse información de recambio de luminarias realizadas por fuera del Programa, a través de incentivos asociados a la asistencia técnica o capacitación

en esta temática; ello con el propósito de enriquecer el estado de la eficiencia energética en todo el ámbito municipal.

- Unido a lo anterior, considerar un nuevo criterio de priorización, basado en la brecha persistente en las comunas beneficiarias del Programa, en cuanto a luminarias ineficientes.
- Respecto del componente de capacitaciones, se recomienda estandarizar los contenidos de las capacitaciones que deben desarrollar las empresas una vez que ejecutan las obras para el recambio de las luminarias.
- Como ya se señaló y considerando la potencial necesidad por parte de los municipios del país de contar con asistencia técnica respecto del tema de eficiencia energética, se propone que el Programa pueda desarrollar este componente (Componente 2 del programa) incluyendo la participación de beneficiarios de versiones anteriores. Adicionalmente, con el fin de ayudar a municipios que desean y pueden llevar a cabo el cambio de luminarias con recursos propios (por ejemplo, el 25% de municipios no elegibles para el programa), éstos podrían ser incorporados como beneficiarios de la capacitación para esta temática. Lo anterior, requeriría redefinir el concepto de “beneficiario” del Programa.

Consideraciones:

- Se requiere un mayor involucramiento de la Subsecretaría de Desarrollo Regional, en cuanto a promover e incentivar en los Gobiernos Regionales el apoyo financiero para aumentar la cobertura del recambio de luminarias y en consistencia con las estrategias de desarrollo regional, donde la eficiencia energética debería constituirse en uno de los ejes fundamentales.
- Para sustentar la continuidad del programa y la ampliación de su alcance, sería óptimo el desarrollo de estudios que den cuenta del peso específico que representan el consumo energético del alumbrado público respecto del consumo global del país.
- Es necesario gestionar la disponibilidad de información periódica sobre el consumo de energía eléctrica comunal, a través de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles. Es una oportunidad propicia para desarrollar innovaciones tecnológicas que permitan monitorear el consumo eléctrico y generar información permanente y pública, para diversos fines de promoción de la eficiencia energética que se ha transformado en un desafío permanente para el país y el mundo.

IV. BIBLIOGRAFÍA

AChEE (2018). Eficiencia energética en Chile: el poder de la energía... que no se usa. Disponible en: <https://www.acee.cl/eficiencia-energetica-en-chile-el-poder-de-la-energia-que-no-se-usa/>. Acceso: 16 febrero 2018.

ANESCO Chile (2018). Eficiencia energética en Chile. Disponible en: <http://www.anescochile.cl/eficiencia-energetica-chile/>. Acceso: 16 febrero 2018.

BID (2014). Apoyo a la eficiencia energética en el sector residencial y municipal. Consultoría técnica - Alumbrado público. Banco Interamericano de Desarrollo - Ministerio de Energía.

Campos J, Serebrisky T, Suárez-Alemán A (2016). Tasa de descuento social y evaluación de proyectos: Algunas reflexiones prácticas para América Latina y el Caribe. Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo.

FOCUS (2012). Evaluación del Gasto Institucional del Servicio Nacional de Menores - Informe Final. Dirección de Presupuestos.

Grupo Energía Bogotá (2018). Artículo Alumbrado Público en LED: Experiencias internacionales. Disponible en:

<https://www.grupoenergiadebogota.com/eeb/index.php/empresa/eeb-y-bogota/articulo-alumbrado-publico-en-led-experiencias-internacionales>. Acceso: 7 abril 2018. Ministerio de Energía (2014a). Agenda de Energía: Un desafío país, progreso para todos. Ministerio de Energía.

Kaufmann J, Zulantay M (2018). La Innovación en la Planificación y Seguimiento Sectorial entrega Resultados: Gestión de la Agenda de Energía 2014-2018 del Ministerio de Energía de Chile. Documento para discusión N° IDB-DP-571. Banco Interamericano de Desarrollo. Disponible en: <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/8789/La-innovacion-en-la-planificacion-y-seguimiento-sectorial-entrega-resultados.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Ministerio de Energía (2014b). Aprueba bases de postulación para el “Primer concurso para la selección de municipios beneficiarios del “Programa de recambio de 200.000 luminarias de alumbrado público en cuatro años”. Resolución Exenta N 66 del Ministerio de Energía del 24 de agosto de 2014.

Ministerio de Energía (2015). Modifica Resolución Exenta N 100 del 23 de diciembre de 2014, que aprueba ranking de postulaciones recibidas en “Primer concurso para la selección de municipios beneficiarios del Programa de recambio de 200.000 luminarias de alumbrado público en cuatro años” llamado mediante Resolución Exenta N 66, de 22 de agosto de 2014, de la Subsecretaría de Energía. Ministerio de Energía del 20 de febrero de 2015.

SCL Econometrics (2013). Evaluación de Impacto de los Programas de Alimentación Escolar de JUNAEB, del Ministerio de Educación - Informe Final. Dirección de Presupuestos. Disponible en: http://www.dipres.gob.cl/597/articles-141186_informe_final.pdf.

Svensson M, Hultkrantz M (2017). A Comparison of Cost-Benefit and Cost-Effectiveness Analysis in Practice: Divergent Policy Practices in Sweden. *Nordic Journal of Health Economics*, 5 (2): 41-53.

V. ENTREVISTAS Y REUNIONES REALIZADAS

Fecha	Participantes	Motivo
23/03/2018	Ignacio Santelices (Subsecretaría de Energía) Segundo López (Programa alumbrado) Marcela Zulantay (Programa alumbrado) Alejandro Henríquez (Programa alumbrado) Marcia Riveros (evaluador) Daniel Espinoza (evaluador) Pablo Villalobos (evaluador) Rodrigo Díaz (DIPRES) Juan Pablo Leiva (DIPRES)	Reunión inicio evaluación
26/01/2018	Segundo López (Programa alumbrado) Ignacio Santelices (Programa alumbrado) Marcia Riveros (evaluador) Daniel Espinoza (evaluador) Pablo Villalobos (evaluador) Juan Pablo Leiva (DIPRES)	Trabajo matriz de marco lógico y revisión de bases de datos
27/02/2018	Segundo López (Programa alumbrado) Marcia Riveros (evaluador) Pablo Villalobos (evaluador)	Reunión de trabajo Anexo 3 (procesos)
02/03/2018	Segundo López (Programa alumbrado) Alejandro Henríquez (Programa alumbrado) Marcia Riveros (evaluador) Pablo Villalobos (evaluador)	Reunión trabajo Anexo 2 (MML) y 5 (presupuesto)
23/03/2018	Ignacio Santelices (Subsecretaría de Energía) Segundo López (Programa alumbrado) Marcela Zulantay (Programa alumbrado) Alejandro Henríquez (Programa alumbrado) Marcia Riveros (evaluador) Pablo Villalobos (evaluador) Juan Pablo Leiva (DIPRES)	Reunión comentarios informe final. Sugerencia cambio MML y justificación/ continuidad del programa

VI. ANEXOS DE TRABAJO

Anexo 1: Reporte sobre el estado y calidad de la información disponible para evaluar el programa.

a. Bases de datos con información relevante para la evaluación

Nombre	<i>Catastro antes y post</i>
Descripción	<i>Archivo Excel con identificación pre y post intervención de cada luminaria del Programa para 52 comunas beneficiarias del programa</i>
Período de vigencia	<i>Al 31 de diciembre de 2017</i>
Universo de medición de las variables (censo/muestra)	<i>Censo (totalidad de luminarias entregadas al 31 de diciembre)</i>
Frecuencia de medición	<i>Anual</i>
Campos / Variables	<i>Datos del circuito: ITEM; N° CTO; N° luminaria; N° medidor; Calle; Frente; Sector; Ancho de calzada (mts.); Interdistancia (mts.)</i> <i>Poste: Material; Altura</i> <i>S/E asociada: N° S/E; Potencia SE (KVA); N° poste</i> <i>Conductor: Tipo; Sección (mm)</i> <i>Luminaria retirada: Fecha intervención; Potencia (W); Tecnología retirada; Estado; Gancho retirado; Protección</i> <i>Luminaria instalada: Potencia nominal (W); Potencia operación (W); Tecnología; Equipo eléctrico; Gancho instalado; Protección; Tipo calle</i> <i>Observaciones: SAP 70W; LED 60W; Proyector 400W; Observaciones</i>
Juicio del panel respecto de la calidad de la información y posibilidades de uso en la evaluación	<i>La base contiene el detalle de las luminarias intervenidas, incluyendo ubicación e intervención realizada. Esto permite calcular la producción del componente 1 del programa, así como varios indicadores de propósito propuestos en la MML (para algunos se requieren datos extra, como costo de la energía). En acuerdo con el Programa y DIPRES, se acuerda considerar, para efecto de esta evaluación, sólo los proyectos finalizados y entregados al 31 de diciembre de 2017.</i>

Nombre	<i>Resumen capacitaciones</i>
Descripción	<i>Archivo Excel con capacitaciones realizadas por el Programa (componente 2). Incluye lugar donde fue realizada la capacitación y número de funcionarios capacitados</i>

Período de vigencia	<i>No disponible</i>
Universo de medición de las variables (censo/muestra)	<i>Censo</i>
Frecuencia de medición	<i>Dato único</i>
Campos / Variables	<i>Región, Provincia, Municipio, Cantidad de funcionarios capacitados</i>
Juicio del panel respecto de la calidad de la información y posibilidades de uso en la evaluación	<i>La base contiene información básica respecto del componente 2 que permite conocer el número de municipios y personas que recibieron capacitaciones. La información resume los archivos de asistencia entregados por el programa. Sería útil incluir otra información disponible, como fecha de la capacitación y evaluaciones (en documentos PDF, pero no sistematizada en la base de datos)</i>

- b. Fuentes de información cualitativa y cuantitativa que fueron útiles para identificar la situación problema que dio origen al Programa y que permitan proyectar la situación sin programa

Identificación del documento	Breve descripción del contenido
Bases concurso	Seis archivos que contienen las bases de los concursos para la selección de municipios al concurso de recambio de alumbrado público, sus modificaciones, la resolución exenta aprobando las bases, y las resoluciones con el resultado de los municipios seleccionados.
Estudio BID	Contiene información importante en términos de la justificación del programa. El estudio, realizado en 2014 por el BID, incluye información respecto de la situación del alumbrado público (catastro 2005), distintas opciones tecnológicas para luminarias, evaluación económica del potencial Programa de recambio de AP y recomendaciones respecto a su implementación. También esta información es útil para entender el diseño del programa.
Agenda de Energía	Contiene los lineamientos de política del sector energético, que justifican la existencia del Programa de recambio de AP.
Proyectos AChEE	Contiene las actas de adjudicación y entrega de los proyectos ejecutados por la AChEE, incluyendo oferentes para cada comuna, ganador y precio de adjudicación, así como el detalle de las luminarias cambiadas.
Proyectos Ministerio	Contiene las actas de adjudicación y entrega de los proyectos ejecutados por la Subsecretaría de Energía, incluyendo oferentes para cada comuna, ganador y precio de adjudicación, así como el detalle de las luminarias cambiadas.
Reglamentos de AP	Contiene la normativa legal (publicación en Diario oficial, decretos, reglamentos) asociados al Programa de AP (reglamento en vías de tránsito vehicular, regulación de la contaminación lumínica, reglamento de AP)
Capacitaciones	Contiene los registros de asistencia de las capacitaciones, evaluaciones realizadas, y el material entregado en las capacitaciones.

c. Identificar la necesidad de estudio complementario

Tomando en cuenta los indicadores de la MML y la información entregada por el programa, el Panel considera que no hay necesidad de realizar un estudio complementario. La información proporcionada es suficiente para hacer un análisis de la justificación, diseño, producción y resultados del programa.

Anexo 2(a): Matriz de Evaluación del programa²³

NOMBRE DEL PROGRAMA: Recambio de 200.000 luminarias de alumbrado público, en cuatro años. AÑO DE INICIO DEL PROGRAMA: 2014 MINISTERIO RESPONSABLE: Ministerio de Energía SERVICIO RESPONSABLE: Subsecretaría de Energía - División de Eficiencia Energética				
ENUNCIADO DEL OBJETIVO	INDICADORES		MEDIOS DE VERIFICACIÓN (Periodicidad de medición)	SUPUESTOS
	Enunciado (Dimensión/ Ámbito de Control) ²⁴	Fórmula de Cálculo		
FIN: Contribuir a la Eficiencia Energética del país				
PROPÓSITO: Reducir el consumo de energía eléctrica en los municipios que se encuentran en el alcance del programa ²⁵	Eficacia: 1.- Cambio porcentual en el consumo de energía eléctrica anual.	$((\text{MWh del parque con las antiguas luminarias} - \text{MWh del parque con las nuevas luminarias}) / \text{MWh del parque con las antiguas luminarias}) * 100$	Calculado a partir de los datos incluidos en el catastro final, una vez implementado el proyecto de recambio.	Existen reglamentos que fijan los estándares para ejecución de los proyectos
	2.- Cobertura del	Municipios beneficiados con el	Calculado a partir de los	

²³ Ver Metodología para Construcción de Matriz de Marco Lógico en www.dipres.cl, Control de Gestión, Evaluación de Programas Gubernamentales.

²⁴ Ver Capítulo IV.1.2 de documento "Evaluación Ex-post: Conceptos y Metodologías", División de Control de Gestión, DIPRES, 2015; en http://www.dipres.gob.cl/594/articles-135135_doc_pdf.pdf

Se debe incluir indicadores adecuados para medir las cuatro dimensiones del desempeño del Programa a nivel de propósito y componentes, según corresponda. En particular en el caso de los componentes, teniendo presente su naturaleza, considerar la pertinencia de la aplicación de las diferentes dimensiones y ámbitos de los indicadores.

Incluir los indicadores que forman parte del sistema de monitoreo interno del Programa y/o del Sistema de Información de Gestión del PMG institucional.

²⁵ Se entenderá por "Alcance del programa" aquellos municipios donde el recambio se llevó a cabo mediante licitaciones de la Subsecretaría de Energía y de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética.

	Programa. Eficiencia 3.- Cambio porcentual en el costo de la energía eléctrica anual. Calidad: 4.- Porcentaje de beneficiarios que evalúan positivamente el programa²⁶ 5.- Porcentaje de proyectos que fueron desarrollados en los plazos comprometidos originalmente	Programa / Total municipios país. $[(\text{kWh del parque con las antiguas luminarias} * \\$\text{kWh} - \text{kWh del parque con las nuevas luminarias} * \\$\text{kWh}) / (\text{kWh del parque con las antiguas luminarias} * \\$\text{kWh})] * 100$ $(\text{N}^\circ \text{ de beneficiarios que califican con nota promedio} = 0 > \text{a } 6 \text{ el programa} / \text{Total beneficiarios encuestados}) * 100$ $(\text{Proyectos desarrollados en los plazos programados para el año } t / \text{Total de Proyectos programados para el año } t) * 100$	municipios incluidos en el Programa y los antecedentes aportados por SUBDERE al concurso. Calculado a partir de los datos incluidos en el catastro final y los precios de la energía publicada por las empresas de distribución, una vez implementado el proyecto de recambio. Encuestas de satisfacción aplicadas a los beneficiarios totales del programa Acta de recepción de proyectos por parte de los municipios.	Los precios (\$kWh) de las distribuidoras varían temporal y territorialmente Muestra que contesta la encuesta es representativa del total
--	--	---	---	---

²⁶ Se aplicó encuesta de satisfacción al total de los beneficiarios del programa, de los cuales a la fecha de este informe se cuenta con el 40% de respuestas. Para la medición de este indicador se considera la calificación en tres ámbitos:

- i) Ahorro de costos en su cuenta de electricidad
- ii) Valoración o beneficios para la comunidad percibidos por el municipio del recambio de las luminarias
- iii) Evaluación general del recambio de las luminarias de alumbrado público en su comuna

	Economía: 6.- Porcentaje de ejecución presupuestaria del programa	(Presupuesto inicial en el año t / Presupuesto Inicial del Programa en el año t)*100	Información financiera del programa	
COMPONENTES: 1) Recambio de luminarias de alumbrado público.	Eficacia: 1.- Porcentaje de luminarias cambiadas v/s las planificadas 2.- Porcentaje luminarias cambiadas v/s el comprometido (período 4 años) 3.- Porcentaje de municipios atendidos (según población potencial y objetivo). Eficiencia: 4.- Variación del costo de las luminarias vía licitación Calidad: 4.- Porcentaje de beneficiarios que evalúan positivamente el proceso	Número de luminarias cambiadas / número de luminarias planificadas)*100 (Número luminarias cambiadas / 200.000)*100 Municipios beneficiados con el programa / Total municipios potencialmente acreedores al programa. ((Costos luminarias año t / Costos luminarias año t-1) -1) *100 (Nº de beneficiarios que califican con nota promedio = o > a 6 el proceso de recambio de luminarias/Total	Acta de recepción de proyectos por parte de los municipios. Acta de recepción de proyectos por parte de los municipios. Calculado a partir de los municipios incluidos en el programa y los antecedentes aportados por SUBDRE al concurso. Calculado a partir de la información incluida en las ofertas de licitación. Encuestas de satisfacción aplicadas a los beneficiarios totales del programa	Existen oferentes en el mercado

2) Capacitaciones técnicas en gestión de la energía eléctrica entregada a los municipios	de recambio de luminarias²⁷ Eficacia: 1.- Porcentaje de municipios beneficiados que reciben capacitación. capacitados (total; por municipio). Calidad: 2.- Porcentaje de beneficiarios que evalúan positivamente la capacitación recibida²⁸	beneficiarios encuestados)*100 (Número de municipios capacitados / número de municipios beneficiados con el programa)*100 (N° de beneficiarios que califican con nota = o > a 6 la capacitación recibida /Total beneficiarios encuestados)*100	Actas. Actas con asistencia de capacitación. Encuestas de satisfacción aplicadas a los beneficiarios totales del programa	
---	--	--	--	--

²⁷ Se aplicó encuesta de satisfacción al total de los beneficiarios del programa, de los cuales a la fecha de este informe se cuenta con el 40% de respuestas. Para la medición de este indicador se considera la calificación de dos afirmaciones: i) El tiempo de instalación de las nuevas luminarias fue el esperado. ii) La comunicación de contraparte a cargo del recambio de luminarias, respecto a las etapas del proceso

²⁸ Se aplicó encuesta de satisfacción al total de los beneficiarios del programa, de los cuales a la fecha de este informe se cuenta con el 40% de respuestas. Para la medición de este indicador se considera la calificación de la siguiente afirmación: Capacitación recibida por los funcionarios al finalizar el recambio de luminarias para la gestión de la energía eléctrica.

Anexo 2(b): Medición de indicadores Matriz de Evaluación del programa, período 2014-2017

NOMBRE DEL PROGRAMA: Recambio de 200.000 luminarias de alumbrado público, en cuatro años.						
AÑO DE INICIO DEL PROGRAMA: 2014						
MINISTERIO RESPONSABLE: Ministerio de Energía						
SERVICIO RESPONSABLE: Subsecretaría de Energía - División de Eficiencia Energética						
<i>Evolución de Indicadores</i>						
<i>Enunciado del objetivo</i>	<i>Indicadores</i>					
	<i>Enunciado (Dimensión/ Ámbito de Control)²⁹</i>	<i>Fórmula de cálculo</i>	<i>Cuantificación</i>			
			<i>2014</i>	<i>2015</i>	<i>2016</i>	<i>2017</i>
FIN: Contribuir a la Eficiencia Energética del país						
PROPÓSITO: Reducir el consumo de energía eléctrica en los municipios que se encuentran en el alcance del	Eficacia 1.- Cambio porcentual en el consumo de energía eléctrica anual	((MWh del parque con las antiguas luminarias - MWh del parque con las nuevas luminarias) / MWh del parque con las antiguas luminarias)*100	$((53.880-30.614)/53.880)*100 = 43\%^{31}$			
	2.- Cobertura del Programa	Municipios beneficiados con el Programa / Total	$105/345 = 30\%^{32}$			

²⁹ Ver Capítulo IV.1.2 de documento "Evaluación Ex-post: Conceptos y Metodologías", División de Control de Gestión, DIPRES, 2015; en http://www.dipres.gob.cl/594/articles-135135_doc_pdf.pdf

³¹ Este indicador es calculado de forma teórica, hasta obtener los datos de medición de la SEC. El cambio porcentual en el consumo de energía eléctrica anual considera los antecedentes de 52 proyectos de un total de 82 proyectos finalizados al 31-12-2017. Los antecedentes de los restantes 30 proyectos se tendrán a finales del mes de marzo. Las cantidades están expresadas en MWh.

programa ³⁰		municipios país				
	Eficiencia 3.- Cambio porcentual en el costo de la energía eléctrica anual	((kWh del parque con las antiguas luminarias * \$kWh - kWh del parque con las nuevas luminarias * \$kWh) / (kWh del parque con las antiguas luminarias * \$kWh)*100	((7.120.812.970-4.034.999.748)/7.120.812.970)*100 = 43% ³³			
	Calidad 4.- Porcentaje de beneficiarios que evalúan positivamente el programa ³⁴	(N° de beneficiarios que califican con nota promedio = o > a 6 el programa/Total beneficiarios encuestados)*100	(27/42)*100 = 63,5%			
	5.- Porcentaje de proyectos que fueron desarrollados en los plazos comprometidos originalmente	Proyectos desarrollados / Proyectos comprometidos ³⁵		7/15 = 46,6%	59/46= 128%	43/51 = 84,3%
	Economía 6.- Porcentaje de ejecución	(Presupuesto inicial en el año t / Presupuesto	(18.725.087/80.132)	(8.326.935/5.626.935)*100	(11.286.586/5.408.783)*100 =	(19.499.883/15.064.900)/*100 =

³² Los municipios beneficiados con el Programa incluye todas las comunas en donde se realizó o se realizará el recambio de las luminarias (ver detalle de luminarias cambiadas y proyectadas en Anexo 3), esto incluye las 85 comunas beneficiarias del concurso más las comunas consideradas por los aportes de los Gobiernos Regionales de Antofagasta y Arica y Parinacota. Del total de comunas del país se excluye la Antártica, por no tener municipio.

³⁰ Se entenderá por "Alcance del programa" aquellos municipios donde el recambio se llevó a cabo mediante licitaciones de la Subsecretaría de Energía y de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética.

³³ El cambio porcentual en el costo de la energía eléctrica anual considera los antecedentes de 52 proyectos de un total de 82 proyectos finalizados al 31-12-2017, los antecedentes de los restantes 30 proyectos se tendrán a finales del mes de marzo. Las cantidades están expresadas en pesos. El cálculo se realizó considerando la energía antes y después de cada proyecto. Para el precio de la energía se tomó el valor a diciembre de 2017 en cada comuna en la tarifa BT1. Se modifica la fórmula, se multiplica por 100, para expresarla en porcentaje.

³⁴ Se aplicó encuesta de satisfacción al total de los beneficiarios del programa, de los cuales a la fecha de este informe se cuenta con el 40% de respuestas. Para la medición de este indicador se considera la calificación de tres afirmaciones:

- i) Ahorro de costos en su cuenta de electricidad
- ii) Valoración o beneficios para la comunidad percibidos por el municipio del recambio de las luminarias
- iii) En general el recambio de las luminarias de alumbrado público en su comuna

³⁵ El total de proyectos comprometidos considera 112 proyectos.

	presupuestaria del programa	Inicial del Programa en el año t)*100 ³⁶	*100 = 23.368%	= 148%	209%	129%
COMPONENTES 1) Recambio de luminarias de alumbrado público.	Eficacia 1.- Porcentaje de luminarias cambiadas v/s las planificadas ³⁷	(Número de luminarias cambiadas / las planificadas)*100	(0/50.000)*100 = 0%	(2.104/50.000)*100 = 4,2%	(52.025/50.000)*100 = 104%	(108.913/50.000)*100 = 218%
	2.- Porcentaje de luminarias cambiadas v/s el comprometido (período 4 años) ³⁸	(Número luminarias recambiadas / 200.000)*100	(0/200.000)*100 = 0%	(2.104/20.000)*100 = 1,1%	(52.025/200.000)*100 = 26%	(108.913/200.000)*100 = 54,5%
	3.- Porcentaje de municipios atendidos (según población potencial y objetivo) ³⁹	(Municipios beneficiados con el programa / Total municipios potencialmente acreedores al programa)*100	(105/259)*100 = 40,5%			
	Eficiencia 4.- Variación del costo de las luminarias vía licitación ⁴⁰	((Costos luminarias año t – Costos luminarias año t- 1)/Costo luminarias		((314.879-343.134)/343.134)*100 =	((292.542-314.879)/314.879)*100 = -7,1%	((256.451-292.542)/292.542)*100 = -7,1%

³⁶ A partir de datos informados en Anexo 5.

³⁷ Considera solamente los proyectos finalizados al 31-12-2017.

³⁸ Considera solamente los proyectos finalizados al 31-12-2017.

³⁹ Los municipios potencialmente acreedores al programa, corresponde al 75% de los municipios del país de menores ingresos propios, según el indicador de ingreso por municipalidad que administra SUBDERE, listado que se detalló en las bases del concurso.

⁴⁰ Para determinar el costo de luminarias vía licitación, se agruparon las luminarias adjudicadas por año y los montos adjudicados, obteniendo un valor unitario de costo de luminaria por año. Se consideraron las licitaciones de los años 2015, 2016, 2017 y 2018.

		año t)*100		-8,2%		
	Calidad 4.- Porcentaje de beneficiarios que evalúan positivamente el proceso de recambio de luminarias ⁴¹	(N° de beneficiarios que califican con nota promedio = o > a 6 el proceso de recambio de luminarias/Total beneficiarios encuestados)*100	(32/42)*100= 76,2%			
2: Capacitaciones técnicas en gestión de la energía eléctrica entregada a los municipios	Eficacia: 1.- Porcentaje de municipios beneficiados que reciben capacitación ⁴²	(Número de municipios capacitados / número de municipios beneficiados con el programa)*100	(82/105)*100 78%			
	Calidad: 2.- Porcentaje de beneficiarios que evalúan positivamente la capacitación recibida ⁴³	(N° de beneficiarios que califican con nota = o > a 6 la capacitación recibida /Total beneficiarios encuestados)*100	(28/42)*100= 67%			

⁴¹ Se aplicó encuesta de satisfacción al total de los beneficiarios del programa, de los cuales a la fecha de este informe se cuenta con el 40% de respuestas. Para la medición de este indicador se considera la calificación de dos afirmaciones:

- i) El tiempo de instalación de las nuevas luminarias fue el esperado.
- ii) La comunicación de contraparte a cargo del recambio de luminarias, respecto a las etapas del proceso.

⁴² Considera solo los proyectos finalizados al 31-12-2017.

⁴³ Se aplicó encuesta de satisfacción al total de los beneficiarios del programa, de los cuales a la fecha de este informe se cuenta con el 40% de respuestas. Para la medición de este indicador se considera la calificación de la siguiente afirmación: Capacitación recibida por los funcionarios al finalizar el recambio de luminarias para la gestión de la energía eléctrica.

Anexo 2(c): Análisis de diseño del programa

Relaciones de causalidad de los objetivos del Programa (Lógica Vertical)

Respecto de las relaciones entre los objetivos del Programa (lógica vertical de la MML), el Programa es coherente, ya que establece como fin “Contribuir a la eficiencia energética del país” de acuerdo a lo establecido en la Agenda de Energía 2014 (Ministerio de Energía 2014), mientras que el propósito es “Reducir el consumo de energía eléctrica en los municipios que se encuentran en el alcance del programa, mediante la ejecución de acciones que incrementan la eficiencia energética”, ambos objetivos claramente relacionados con los problemas descritos en la sección II.1 (“Justificación del programa”): mayores costos, menor productividad e impacto medioambiental relacionados con la mayor demanda esperada de consumo de energía en el futuro.

Ambos objetivos se relacionan estrechamente, ya que el propósito se enfoca en la reducción de consumo por parte del sector público -alumbrado público- que forma parte del consumo total del país (que además incluye, por ejemplo, consumo industrial y de hogares), contribuyendo entonces, directamente al cumplimiento del fin del programa.

A su vez, los componentes son necesarios y suficientes para el logro del propósito, en tanto apuntan directamente a la reducción del consumo eléctrico de las municipalidades del país. Ambos componentes se complementan para el cumplimiento del objetivo de propósito. Por una parte, el componente de recambio de luminarias impacta directamente el consumo eléctrico al permitir, con un menor consumo, satisfacer los requerimientos de luminosidad establecidos por la regulación vigente (mayor eficiencia energética); por otro lado, el componente de capacitación incrementa la sustentabilidad de largo plazo del Programa, entregando herramientas y conocimientos a los propios funcionarios municipales para que manejen las nuevas tecnologías e incentivando y guiando sus futuras decisiones con una perspectiva de eficiencia energética.

Los componentes y actividades propuestos parecen suficientes para garantizar la eficacia y eficiencia del programa. Mejoras podrían alcanzarse con una mejor información (por ejemplo, diagnóstico más completo del parque de luminarias del país). El monitoreo de resultados también podría ser importante, y actualmente está incluido en ambos componentes; una mayor estandarización de estos procesos, principalmente en el componente de capacitación, podrían ser una importante fuente de mejoras para el futuro.

Respecto de los supuestos usados, estos son claves para entender los resultados del programa, así como para pensar modificaciones a futuro. Por una parte, el Programa descansa en el reglamento que fija los estándares respecto del alumbrado público. Si bien el actual reglamento constituye un importante elemento que valida la acción del Programa -en particular el recambio de luminarias antiguas por luminarias nuevas que cumplan con los estándares y, por consiguiente incrementen la eficiencia energética- también es cierto que el cambio tecnológico en el área avanza rápidamente y los estándares actuales corren el riesgo de quedar obsoletos en corto tiempo. Esto significa que, si bien el Programa seguirá contribuyendo a la eficiencia energética respecto de la situación inicial en la que comenzó su funcionamiento, a futuro podrían existir tecnologías aún más eficientes que no serían consideradas. De similar manera, el supuesto respecto de la existencia de oferentes que realicen el recambio de las luminarias es dinámico: tal como las tecnologías van cambiando, se espera que el mercado también lo haga. El uso de licitaciones ha sido clave para atraer oferentes y conseguir reducciones de costos (ver MML), pero el diseño de éstas debe ser permanentemente evaluado, para tomar en consideración las modificaciones en el mercado. Por ejemplo, la decisión de licitar paquetes de comunas es una estrategia interesante para asegurar la existencia de oferentes, pero sus especificidades (por ejemplo, número de luminarias a recambiar,

combinación de comunas, etc.) deben ser reevaluadas para ajustarse a las condiciones del mercado.

En resumen, el actual diseño del Programa responde al problema que lo generó de manera eficaz y eficiente. Como muestra su lógica vertical, los componentes planteados impactan directamente al cumplimiento del propósito el que, a su vez, puede ser vinculado directamente al fin. Si bien a grandes rasgos el diseño del Programa parece apropiado, debe poner atención en detalles que le permitan asegurar máxima eficiencia y eficacia a futuro, lo que implica pensar en un proceso de monitoreo, evaluación y constante rediseño.

Sistema de indicadores del Programa (Lógica Horizontal)

Respecto de la selección de indicadores, cabe destacar, en primer lugar que muchos de los indicadores de resultados del Programa no son presentados anualmente, sino que son medidos para el periodo completo de cuatro años. Lo anterior se justifica, ya que el diseño del Programa se realizó con este horizonte en mente considerando que, si bien la producción de componentes se realizaría de manera progresiva, algunos resultados se observarían sólo al final de los cuatro años. Una vez considerada esta acotación, se observa que la selección de indicadores de propósito permite medir directamente su cumplimiento. En particular, el indicador 1 (dimensión: eficacia), da cuenta del cumplimiento del objetivo de “reducir el consumo de energía eléctrica en los municipios”.

Adicionalmente, la MML incluye otros indicadores que permiten analizar distintas dimensiones de resultado, siempre a nivel de propósito. Éstos incluyen: reducción en los costos derivados de consumo eléctrico (relacionado directamente con el consumo, pero con un componente externo, que se vincula al precio de la energía), cobertura, y metas preestablecidas en los documentos que dan inicio al Programa (Ministerio de Energía 2014a), e indicadores de calidad. Sobre los indicadores no incluidos, el panel considera importante poder contar con indicadores que, a futuro, permitan realizar una evaluación económica en profundidad del programa. En esta línea, sería necesario contar con una medición más amplia de costo-eficiencia del programa, que permita calcular si los beneficios del Programa exceden sus costos totales (a nivel de productos), incluyendo además de los ahorros en energía de las municipalidades y el costo de las licitaciones, los cambios en costos de mantención y reemplazo de luminarias en un periodo más largo de tiempo. Adicionalmente, se podrían incluir indicadores que permitan realizar una evaluación respecto de la costo-efectividad/ costo-beneficio del Programa que cuantifique -a nivel de nivel de resultado- los costos y ganancias de éste, incluyendo valorizaciones para variables sobre las que el Programa influye, como podrían ser medición de luminosidad o satisfacción de la población. Estos indicadores requieren información no disponible a la fecha, así como una complejidad extra, debido a los numerosos supuestos necesarios para su cálculo (Campos et al 2016; Svensson & Hultkrantz 2017).

Anexo 3: Procesos de Producción y Organización y Gestión del Programa

La información expuesta en el presente anexo, ha sido obtenida de la administración del programa, tanto de documentos oficiales (Agenda de Energía, Bases de Concurso, Catastros de la Comunas, Reglamentos, etc), como asimismo de reuniones sostenidas con los profesionales a cargo de su implementación.

A. Proceso de producción de cada uno de los bienes y/o servicios (componentes) que entrega el programa.

Para lograr el objetivo del programa, el cual contempla el recambio de doscientas mil (200.000) luminarias de alumbrado público de propiedad municipal a lo largo del país, en un período de cuatro años, se implementaron cuatro etapas sucesivas, las que fueron desarrolladas conjuntamente por la Subsecretaría de Energía y la Agencia Chilena de Eficiencia Energética. Esta última, comienza su intervención en la etapa de desarrollo de los proyectos, para continuar con su implementación, licitando las obras correspondientes. Contar con esta entidad de derecho privado, ha permitido dar agilidad a los procesos y alcanzar la meta propuesta en el plazo de 4 años, dado que este organismo no se encuentra sometido a los requisitos que debe cumplir un organismo público, como por ejemplo: identificación presupuestaria (DIPRES), toma de razón (CGR), publicación de la licitación (Mercado Público), y sobre todo porque no está regido por el año calendario para usar su presupuesto, lo que se traduce en mayor eficiencia por la continuidad de los procesos. En este sentido, cabe señalar la importancia del actor intermediario en el proceso. Si bien todos los actores señalados y otros organismos del Estado tienen una función de evaluación, fiscalización, transparencia, etc, se debe tener en cuenta que para implementar un Programa a cuatro años plazo, estos factores son prioritarios.

Primera Etapa: SELECCIÓN DE LOS MUNICIPIOS BENEFICIARIOS

Se inicia en agosto de 2014 con el lanzamiento del “Concurso para la selección de municipios beneficiarios del Programa de recambio de alumbrado público”. A este concurso podían postular aquellos municipios del país que pertenecieran al 75% con mayor dependencia de recursos del Fondo Común Municipal (259 municipios).

Finalmente, postularon 93 municipios los cuales fueron rankeados de acuerdo a los cinco criterios de selección que se detallan más adelante en el punto C de este mismo Anexo. Dados los recursos disponibles y el ranking obtenido, fueron seleccionados 85 municipios, con una asignación de recambio de 130.000 luminarias, comprometiéndose la ejecución hasta el año 2017.

Cabe aclarar que posteriormente, se sumaron fuera de Concurso los proyectos financiados con los aportes de los Gobiernos Regionales de Antofagasta y Arica y Parinacota, más los dos pilotos implementados inicialmente, alcanzando un total de 105 municipios beneficiarios.

ETAPA 1: SELECCIÓN DE MUNICIPIOS BENEFICIARIOS



Fuente: Elaboración propia.

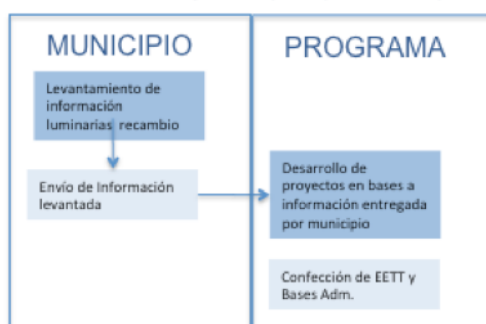
Segunda Etapa: DESARROLLO DE LOS PROYECTOS, (incluye elaboración de Especificaciones técnicas y Bases de Licitación)

Los municipios realizaron el levantamiento de la información en terreno, para completar el formulario del catastro solicitado en las bases del concurso, por lo que aportaron la información de cuáles y cuántas luminarias se cambiarían en cada comuna de acuerdo a sus propias prioridades, aportando con planos y catastros que permitieran elaborar los proyectos. Por tratarse de Comunidades con menos recursos para intervenir en estos ámbitos, prácticamente la totalidad de las luminarias consideradas para el cambio, correspondían a tecnologías antiguas y por tanto menos eficientes. La información aportada por los municipios debió ser verificada por el Programa, en todos los casos.

Luego de seleccionados los beneficiarios, fue necesario verificar la información entregada por los municipios para desarrollar las licitaciones de la forma más precisa posible.

Se definieron y confeccionaron las especificaciones técnicas y bases de licitación que se utilizarían para la contratación de las obras asociadas a los proyectos desarrollados por el Programa para el reemplazo de las luminarias.

ETAPA 2: DESARROLLO DE PROYECTOS



Fuente: Elaboración propia.

Tercera Etapa: LICITACIÓN DE LAS OBRAS

En esta etapa la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE) y la Subsecretaría de Energía (entidades que suscribieron un convenio de colaboración), realizaron las

licitaciones de la ejecución de las obras de recambio de las luminarias de las comunas beneficiarias.

Los proyectos desarrollados, en algunos casos fueron agrupados por tratarse de los municipios con menos luminarias y de esta forma cubrir con un solo proceso licitatorio varias comunas, lo que implica ahorro de tiempo en los procesos y mejores precios por parte del mercado. La AChEE no hizo grupos para maximizar las propuestas económicas de los oferentes.

ETAPA 3: LICITACIÓN DE PROYECTOS



Fuente: Elaboración propia.

Cuarta Etapa: IMPLEMENTACIÓN DE LOS PROYECTOS

La Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE) y la Subsecretaría de Energía serían las encargadas de administrar la ejecución de las obras de recambio de las luminarias de las comunas seleccionadas en el concurso, bajo seguimiento de una PMO centralizada que da cuenta mensualmente al nivel directivo de sus avances y/o desviaciones.

ETAPA 4: IMPLEMENTACIÓN DE LOS PROYECTOS



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos respecto de la cantidad de luminarias a cambiar y la inversión asociada han sido los siguientes:

	AChEE				Subsecretaría			
	N° Municipios beneficiarios	N° de Luminarias		Inversión	N° Municipios beneficiarios	N° de Luminarias		Inversión
		Cambiadas 31-12-2017	En proceso			Cambiadas 31-12-2017	En proceso	
Concurso	15	46.133	6.451	17.149.495.860	70	56.829	18.802	23.412.537.140
Pilotos	7	17.312	3.082	6.013.722.112				
Aportes adicionales de GORE	13	32.557	14.536	14.275.921.335				
Total	35	96.002	24.069	37.439.139.307	70	56.829	18.802	23.412.537.140

Fuente: Elaboración propia en base a Información del Programa.

Quinta Etapa: EVALUACIÓN DE LOS PROYECTOS IMPLEMENTADOS

Una vez implementados los proyectos y en plena operación, el Programa realiza la evaluación de los mismos, por la vía teórica, realizando los cálculos correspondientes acerca del consumo energético. La forma de realizar estos cálculos es:

Fórmula:
$$\frac{(\text{MWh del parque con antiguas luminarias} - \text{MWh del parque con nuevas luminarias})}{(\text{MWh del parque con las antiguas luminarias})} \times 100$$

Esta fórmula está basada en la metodología del Protocolo Internacional de Medida y Verificación del Ahorro Energético 2010, IPMVP (International Performance Measurement and Verification Protocol), opción D. Considerando que el ahorro de energía no se puede medir de forma directa, pues representa la ausencia del consumo de energía. Por ese motivo, el ahorro se determinó comparando el consumo de energía teórico antes y después de la implementación de los recambios de luminarias en cada proyecto.

Los resultados de estos cálculos teóricos serán corroborados con los antecedentes solicitados por primera vez a la Superintendencia de Electricidad y Combustibles.

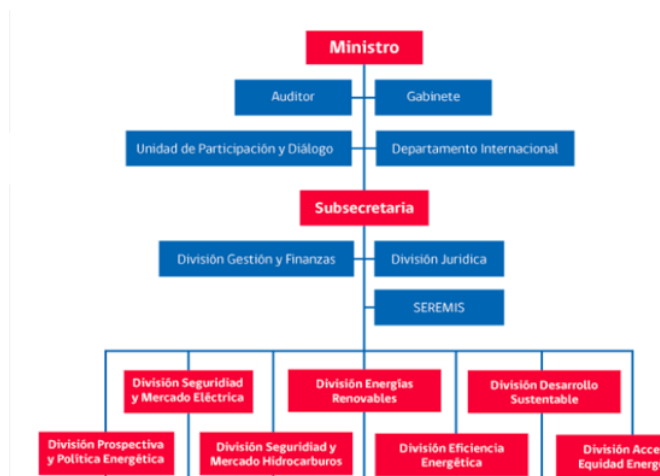
CAPACITACIÓN: Está dirigida a los equipos municipales que se encuentren a cargo del Alumbrado Público, con el fin de aportar conocimientos para la mejor gestión de la energía. Esta capacitación fue contemplada dentro de las mismas licitaciones y se entregó a todos las comunas beneficiarias.

En el camino se han sumado las regiones de Antofagasta y Arica y Parinacota, que con recursos principalmente del Gobierno Regional, financiaron el cambio a luminarias más eficientes de las regiones completas.

El ámbito de acción territorial del Programa, comprende todas las regiones del país, incluida la región metropolitana, aún cuando los recursos y los proyectos son distribuidos desde el nivel central.

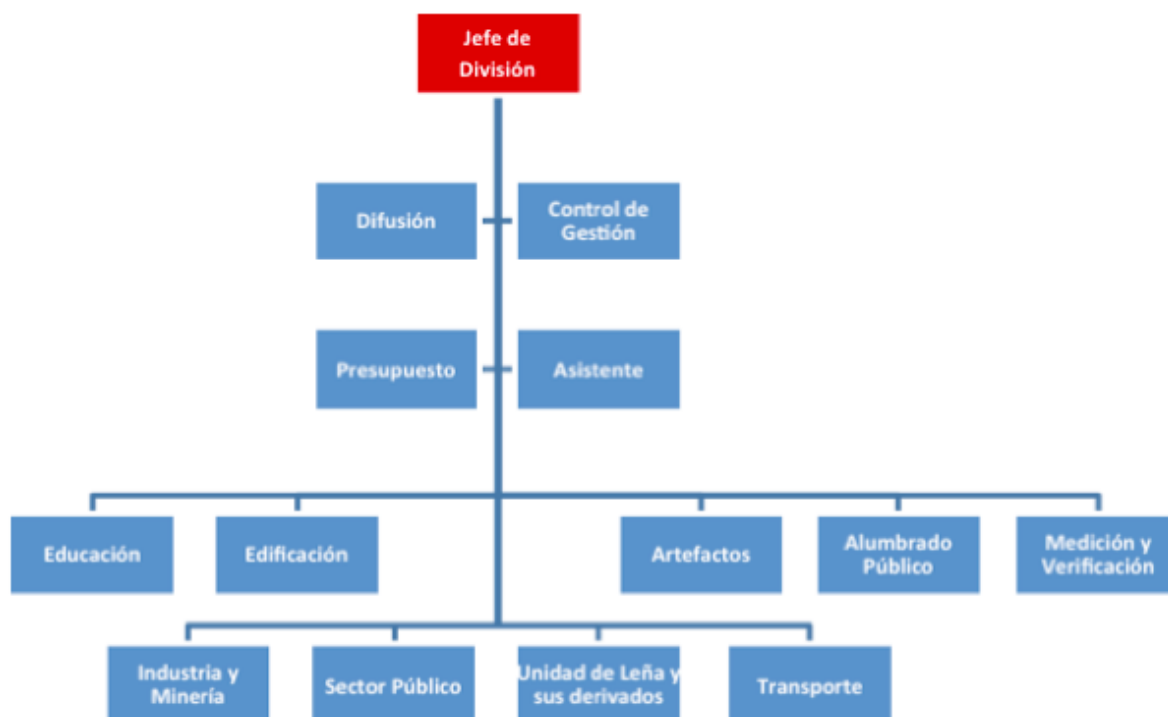
La implementación de los Proyectos de recambio de luminarias es realizada por la Agencia Chilena de Eficiencia Energética y la Subsecretaría de Energía.

B. Estructura organizacional y mecanismos de coordinación al interior de la institución responsable y con otras instituciones.



Fuente: Información del Programa

Organigrama División Eficiencia Energética



Fuente: Información del Programa

Organigrama Programa Alumbrado Público



Fuente: Información del Programa

El Programa de Recambio del Alumbrado Público, se encuentra ubicado en la División de Eficiencia Energética de la Subsecretaría de Energía, aun cuando, como se ha señalado anteriormente, es ejecutado tanto desde la misma División, como desde la Agencia Chilena de Eficiencia Energética, bajo seguimiento de una PMO centralizada que da cuenta mensualmente al nivel directivo de sus avances y/o desviaciones. La dotación del Programa está conformada por los siguientes profesionales:

Cargo	Profesión	Funciones	Tipo de Contrato	Zona de desempeño
Jefe División Eficiencia Energética	Ingeniero Comercial		Planta	Administración Central, Santiago
Coordinador del Programa de recambio de 200.000 luminarias	Ingeniero de Ejecución en Electricidad	Coordinación, ejecución y evaluación del Programa de recambio de alumbrado público. Seguimiento y ejecución de los convenios con otras instituciones asociadas al desarrollo del Programa de recambio de alumbrado público.	Honorario	Administración Central, Santiago

Profesional División de Eficiencia Energética	Ingeniero Civil Electricista	Apoyo a la coordinación del Programa de recambio de luminarias. Evaluación de licitaciones. Apoyo técnico a municipios en temas de alumbrado público y tarifas eléctricas. Implementación de Smart City.	Contrata	Administración Central, Santiago
Profesional División de Eficiencia Energética	Ingeniero Electricista	Evaluación de licitaciones. Seguimiento y ejecución de los contratos para la implementación del Programa de recambio de luminarias. Apoyo técnico a municipios en temas de alumbrado público y tarifas eléctricas.	Contrata	Administración Central, Santiago
Profesional División de Eficiencia Energética	Ingeniero Civil Electricista	Evaluación de licitaciones. Seguimiento y ejecución de los contratos para la implementación del Programa de recambio de luminarias. Apoyo técnico a municipios en temas de alumbrado público y tarifas eléctricas.	Contrata	Administración Central, Santiago
Profesional División de Eficiencia Energética	Ingeniero Electricista	Evaluación de licitaciones. Seguimiento y ejecución de los contratos para la implementación del Programa de recambio de luminarias. Apoyo técnico a municipios en temas de alumbrado público y tarifas eléctricas.	Contrata	Administración Central, Santiago

Profesional División de Eficiencia Energética, Región de Arica y Parinacota	Ingeniero Civil Electricista	Apoyar, coordinar, programar y supervisar las actividades del equipo de trabajo del Programa de Recambio de Alumbrado Público, de la región de Arica y Parinacota	Honorario	Seremi Energía, Arica y Parinacota
Profesional División de Eficiencia Energética, Región de Arica y Parinacota	Geógrafa	Asistir y sensibilizar a la ciudadanía en el cuidado y mantención del Alumbrado Público, mediante diálogos vecinales. Apoyar en la difusión de los beneficios del Recambio de Alumbrado Público a la comunidad en general	Honorario	Seremi Energía, Arica y Parinacota
Profesional División de Eficiencia Energética, Región de Arica y Parinacota	Ingeniero Civil Industrial	Apoyar técnica y administrativamente al equipo del Programa de Recambio de Alumbrado Público, velando por la oportunidad y confiabilidad en la realización de actividades	Honorario	Seremi Energía, Arica y Parinacota
Profesional División de Eficiencia Energética, Región de Arica y Parinacota	Técnico Electrónico Industrial	Apoyar técnica y administrativamente al equipo del Programa de Recambio de Alumbrado Público, velando por la oportunidad y confiabilidad en la realización de actividades	Honorario	Seremi Energía, Arica y Parinacota
Profesional División de Eficiencia Energética, Región de Antofagasta	Ingeniero Civil Industrial	Coordinar la Implementación del Programa de Difusión y Educación para el buen uso de la energía de la Región, conjuntamente con el Programa de Alumbrado Público	Contrata	Seremi Energía, Antofagasta

Profesional División de Eficiencia Energética, Región de Atacama	Ingeniero Comercial	Coordinar la Implementación del Programa de Difusión y Educación para el buen uso de la energía de la Región, conjuntamente con la Inspección Técnica del Programa de Alumbrado Público.	Contrata	Seremi Energía, Atacama
Profesional División de Eficiencia Energética, Región de Coquimbo	Ingeniero Civil Industrial	Coordinar la Implementación del Programa de Difusión y Educación para el buen uso de la energía de la Región, conjuntamente con la Inspección Técnica del Programa de Alumbrado Público.	Contrata	Seremi Energía, Coquimbo
Profesional División de Eficiencia Energética, Región de O'Higgins	Arquitecta	Coordinar la Implementación del Programa de Difusión y Educación para el buen uso de la energía de la Región, conjuntamente con la Inspección Técnica del Programa de Alumbrado Público.	Contrata	Seremi Energía, O'Higgins
Profesional División de Eficiencia Energética, Región del Maule	Arquitecto	Coordinar la Implementación del Programa de Difusión y Educación para el buen uso de la energía de la Región, conjuntamente con la Inspección Técnica del Programa de Alumbrado Público.	Contrata	Seremi Energía, Maule
Profesional División de Eficiencia Energética, Región de La Araucanía	Ingeniera Ambiental	Coordinar la Implementación del Programa de Difusión y Educación para el buen uso de la energía de la Región, conjuntamente con la Inspección Técnica del Programa de Alumbrado Público.	Contrata	Seremi Energía, Araucanía

Profesional División de Eficiencia Energética, Región de Los Ríos	Ingeniero Constructor	Coordinar la Implementación del Programa de Difusión y Educación para el buen uso de la energía de la Región, conjuntamente con la Inspección Técnica del Programa de Alumbrado Público.	Contrata	Seremi Energía, Los Ríos
Profesional División de Eficiencia Energética, Región de Los Lagos	Ingeniero Constructor	Coordinar la Implementación del Programa de Difusión y Educación para el buen uso de la energía de la Región, conjuntamente con la Inspección Técnica del Programa de Alumbrado Público.	Contrata	Seremi Energía, Los Lagos
Profesional División de Eficiencia Energética, Región de Aysén	Arquitecto	Coordinar la Implementación del Programa de Difusión y Educación para el buen uso de la energía de la Región, conjuntamente con la Inspección Técnica del Programa de Alumbrado Público.	Contrata	Seremi Energía, Aysén

Fuente: Información del Programa

C. Criterios de asignación de recursos, mecanismos de transferencia de recursos y modalidad de pago

Respecto de los criterios de asignación de los recursos, éstos están determinados en primera instancia por lo resuelto en el Concurso que definió a los beneficiarios del Programa Recambio Alumbrado Público. En este proceso se establecieron los siguientes criterios de selección de los beneficiarios:

1.- INEFICIENCIA DEL PARQUE

Tipo de Tecnología de Alumbrado Público a recambiar en la Comuna: El proyecto entrega mayores beneficios en eficiencia energética en la medida que se realizan recambios de luminarias más antiguas e ineficientes. Para evaluar este punto, se priorizó a los municipios que postularon al recambio sectores o zonas con alumbrado público más ineficiente. La ineficiencia del parque instalado fue evaluada de acuerdo al tipo de tecnología instalado, entregando un puntaje determinado por cada tipo de luminaria instalada, de la siguiente manera:

Tecnología			Puntaje por luminaria
Considerada	Tipo	Descripción	
Ineficiente	1	Incandescente	100
	2	Halógenas	80
	3	Mixta	80
	4	Mercurio	28
Menos Eficientes	5	Haluro metálico con balasto normal	14
	6	Sodio Alta Presión con balasto normal	12
	7	Sodio Baja Presión	9
Eficientes	8	Haluro metálico con balasto DNP	0
	9	Sodio Alta Presión con balasto DNP	0
	10	LED	0

Se priorizó a aquellas comunas que presentaron la mayor cantidad de luminarias ineficientes con respecto al total de luminarias ineficientes que presentaron todas las comunas que postularon al concurso, y que a su vez, presentaron una mayor proporción de luminarias ineficientes con respecto a su propio parque de luminarias.

$$P_j = \frac{\sum_{i=1}^4 PL_i \times N^{\circ}LNE_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^4 N^{\circ}LNE_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^4 N^{\circ}LNE_{ij}}{\sum_{i=1}^{10} N^{\circ}LT_{ij}}$$

Donde:

P_j : Puntaje del municipio j .

PL_i : Puntaje de luminaria de tecnología tipo i .

$N^{\circ}LNE_{ij}$: Número de luminarias no eficientes de la tecnología tipo i de la comuna j .

$N^{\circ}LT_{ij}$: Total de luminarias de la tecnología tipo i postuladas por el municipio j .

El Municipio que obtuvo el mayor puntaje fue el que presentó la mayor cantidad de luminarias ineficientes respecto de sí mismo y la mayor cantidad respecto del total de luminarias ineficientes presentadas por todos los municipios postulantes, por lo tanto se le asignó 100 puntos, a su vez, al municipio que obtuvo el menor puntaje se le asignó 10 puntos, a los intermedios se les asignó un puntaje proporcional de acuerdo a la siguiente relación:

$$\text{PuntInef} = \text{PmínLumInef} + \frac{(\text{PmáxLumInef} - \text{PmínLumInef}) * (\text{P}_j - \text{MenP}_j)}{(\text{MayP}_j - \text{MenP}_j)}$$

Dónde:

PuntInef: Puntaje obtenido por un Municipio por su parque de Luminarias Ineficientes.

P_j: Puntaje obtenido por el municipio j por su parque de Luminarias Ineficientes.

MayP_j: Mayor Puntaje obtenido por un municipio por su parque de Luminarias Ineficientes.

MenP_j: Menor Puntaje obtenido por un municipio por su parque de Luminarias Ineficientes.

PmáxLumInef: Puntaje máximo que se asigna al Municipio que postula el mayor parque de Luminarias Ineficientes.

PmínLumInef: Puntaje mínimo que se asigna al Municipio que postula el mayor parque de Luminarias Ineficientes.

Para poder determinar la cantidad de luminarias y la tecnología del parque de luminarias de un Municipio, este debió presentar la información que a continuación se detalla.

El archivo denominado “Catastro de Información”, corresponde al catastro que cada Municipio debió presentar al postular al proyecto.

2.- INGRESOS

Se utilizó el indicador denominado “Dependencia del Fondo Común Municipal (FCM)”, en base a los Antecedentes Financieros 2012 y 2013 Fuente BEP, de la División de Municipalidades de la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE). Este indicador mide el grado en que los ingresos municipales dependen de los ingresos provenientes del Fondo Común Municipal.

El municipio con el mayor Porcentaje de Dependencia del Fondo Común Municipal se le asignaron 100 puntos, al municipio con el menor Porcentaje 10 puntos, a los municipios con Porcentaje intermedios se le asignó un puntaje proporcional. Para obtener el puntaje de cada municipio se utilizó la siguiente relación:

$$\text{PuntIng} = \text{PmínPFCM} + \frac{(\text{PmáxPFCM} - \text{PmínPFCM}) * (\text{PFCM} - \text{MenPFCM})}{(\text{MayPFCM} - \text{MenPFCM})}$$

Donde:

PuntIng: Puntaje obtenido por un Municipio en el ítem Ingreso.

PFCM: Porcentaje del Fondo Común Municipal de un Municipio que postula.

MenPFCM: Menor Porcentaje del Fondo Común Municipal del conjunto de Municipios que postulan.

MayPFCM: Mayor Porcentaje del Fondo Común Municipal del conjunto de Municipios que postulan.

PmáxPFCM: Puntaje máximo que se asigna al municipio postulante con mayor Porcentaje del Fondo Común Municipal.

PmínPFCM: Puntaje mínimo que se asigna al municipio postulante con menor Porcentaje del Fondo Común Municipal.

3.- EQUIDAD ELÉCTRICA

Se utilizó el indicador denominado “Equidad Eléctrica”, elaborado por la Comisión Nacional de Energía, considerando la capacidad neta instalada de generación en MW al año 2013 y la estimación de cuenta tipo mensual promedio para el año 2013, información generada con fuentes de la CNE. Su interpretación es que a mayor valor del indicador mayor capacidad de generación y mayor cuenta promedio mensual en el territorio comunal.

Debido a lo anterior, al municipio con el mayor indicador de Equidad Eléctrica se le asignó 100 puntos, al municipio con el menor indicador 10 puntos, a los municipios con indicadores intermedios se le asignó un puntaje proporcional. Para obtener el puntaje de cada municipio se utilizó la siguiente relación:

Donde:

$$\text{PuntEqEléc} = \text{PmínEqEléc} + \frac{(\text{PmáxEqEléc} - \text{PmínEqEléc}) * (\text{IndEqEléc} - \text{MenIndEqEléc})}{(\text{MayIndEqEléc} - \text{MenIndEqEléc})}$$

PuntEqEléc: Puntaje obtenido por un Municipio en el ítem Equidad Eléctrica.

IndEqEléc: Indicador por Equidad Eléctrica de un Municipio que postula.

MenEqEléc: Menor Indicador por Equidad Eléctrica del conjunto de Municipios que postulan.

MayEqEléc: Mayor Indicador por Equidad Eléctrica del conjunto de Municipios que postulan.

PmáxEqEléc: Puntaje máximo que se asigna al municipio postulante con mayor Indicador por Equidad Eléctrica.

PmínEqEléc: Puntaje mínimo que se asigna al municipio postulante con menor Indicador por Equidad Eléctrica.

4.- SEGURIDAD

Seguridad en el Entorno Público: De acuerdo a la experiencia de recambios de alumbrado público que se han llevado a cabo, contar con alumbrado público de mejor calidad aumenta la percepción de seguridad en la ciudadanía. La Subsecretaría de Prevención del Delito elaboró un indicador para todas las comunas del país en base a estadísticas disponibles del año 2013 en todas las comunas en base a delitos asociados al espacio público, como por ejemplo: lesiones, robos por sorpresa, robos a vehículos, infracciones a la ley de drogas y alcohol.

Se priorizó aquellas comunas que tenían las mayores tasas de delitos. Los puntajes se asignaron mediante la siguiente relación:

$$\text{PuntSeg} = \text{PmínSeg} + \frac{(\text{PmáxSeg} - \text{PmínSeg}) * (\text{IndSeg} - \text{MenIndSeg})}{(\text{MayIndSeg} - \text{MenIndSeg})}$$

Donde:

PuntSeg: Puntaje obtenido por un Municipio en el ítem Seguridad.

IndSeg: Indicador de Seguridad del Municipio postulante.

MayIndSeg: Mayor Indicador de Seguridad de un Municipio entre todos los postulantes.

MenIndSeg: Menor Indicador de Seguridad de un Municipio entre todos los postulantes.

PmáxSeg: Puntaje máximo que se asigna al Municipio que postula con el mayor Indicador de Seguridad entre todos los postulantes.

PmínSeg: Puntaje mínimo que se asigna al Municipio que postula con el menor Indicador de Seguridad entre todos los postulantes.

5.- GESTIÓN

Gestión Municipal: Se priorizó aquellas comunas con un mayor Indicador de Gestión Municipal. Se utilizó el promedio de los Indicadores de los años 2012 y 2013 determinados por la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE), el que se elabora teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Eficacia en el Cobro de las Patentes Municipales: Patentes pagadas sobre total patentes (en número de patentes).
- Ingresos de Gestión/Gastos Internos: Conjunto de partidas de ingresos municipales denominados Ingresos de Gestión vs Un conjunto de partidas de gasto municipal denominados Gasto Interno.
- Reportabilidad a CGR: Mide cumplimiento en la reportabilidad instruida por la CGR y se mide como porcentaje del total de informes anuales entregados (hecho sobre 14 instancias anuales de entrega de informes)
- Deuda Previsional: Es el puntaje asignado por la variación de la deuda previsional acumulada del municipio y servicios traspasados en los últimos tres años.

- **Gestión de Proyectos:** Es la relación de proyectos con Recomendación Favorable (RS) sumados a los con Información Faltante (FI), divididos por el total proyectos de la cartera municipal presentados al Sistema Nacional de Inversiones (SIN) para un periodo de tres años.

Los puntajes se asignaron mediante la siguiente relación:

$$\text{PuntGest} = \text{PmínGest} + \frac{(\text{PmáxGest} - \text{PmínGest}) * (\text{IndGest} - \text{MenIndGest})}{(\text{MayIndGest} - \text{MenIndGest})}$$

Dónde:

PuntGest: Puntaje obtenido por un Municipio en el ítem Gestión.

IndGest: Indicador de Gestión del Municipio postulante.

MayIndGest: Mayor Indicador de Gestión de un Municipio entre todos los postulantes.

MenIndGest: Menor Indicador de Gestión de un Municipio entre todos los postulantes.

PmáxGest: Puntaje máximo que se asigna al Municipio que postula con el mayor Indicador de Gestión entre todos los postulantes.

PmínGest: Puntaje mínimo que se asigna al Municipio que postula con el menor Indicador de Gestión entre todos los postulantes.

En resumen y considerando que el fin último del Programa es mejorar la eficiencia energética del actual sistema de Alumbrado Público existente, y beneficiar a municipios de menores ingresos, los respectivos pesos específicos de cada aspecto fueron los siguientes:

Ineficiencia del Parque	Ingresos	Equidad Eléctrica	Seguridad	Gestión
30%	25%	20%	15%	10%

En relación a los criterios de asignación de los recursos, están relacionados a los proyectos desarrollados posteriormente a la selección de los beneficiarios, tanto en la AChEE, como en la División de Eficiencia Energética. Al ser licitados dichos proyectos por estas mismas entidades, los recursos involucrados, no son transferidos a los municipios, sino que son desembolsados directamente a las empresas ejecutoras, generando posiblemente ahorros de tiempo y eficiencia en el recurso financiero.

Anexo 4: Análisis de Género de programas Evaluados

CUADRO ANÁLISIS DE GÉNERO								
INFORMACIÓN DEL PROGRAMA			EVALUACIÓN DEL PROGRAMA					RECOMENDACIONES ⁴⁴
Nombre Programa	Producto Estratégico Asociado ¿Aplica Enfoque de Género? (PMG)	Objetivo del Programa	¿Corresponde incorporación de Género en el Programa según evaluación? ¿Por qué?	¿Se debió incorporar en definición de población objetivo? Si/No	¿Se debió incorporar en definición de propósito o componente? Si/No	¿Se debió incorporar en provisión del servicio? Si/No	¿Se debió incorporar en la formulación de indicadores? Si/No	
				¿Se incorporó? Si/No	¿Se incorporó? Si/No	¿Se incorporó? Si/No	¿Se incorporó? Si/No	
				Satisfactoriamente / Insatisfactoriamente	Satisfactoriamente / Insatisfactoriamente	Satisfactoriamente / Insatisfactoriamente	Satisfactoriamente / Insatisfactoriamente	
	No		No. Beneficiarios son municipios	No	No	No	No (aunque componente 2 podría capturar dimensión de género)	
				No	No	No	No	

⁴⁴ Sobre la base del análisis de género realizado, el Panel deberá proponer, en caso que corresponda, recomendaciones para mejorar la incorporación del enfoque de género en el Programa. Luego se debe incorporar dichas recomendaciones en el Capítulo de Recomendaciones del Informe Final.

Anexo 5: Ficha de Presentación de Antecedentes Presupuestarios y de Gastos.

El detalle sobre la realización del Anexo 5 se presenta en un documento separado al actual.

Metodología de trabajo para estimaciones

En este documento, se debe detalla la metodología utilizada para el cálculo de la división del gasto total por ítem del Programa de Recambio de Alumbrado Público, así como de los gastos de producción y administrativos del mismo Programa. Se trata de una metodología desarrollada por la propia institución, la cual debe ser validada por el panel.

Para efectos de ordenar la información, a continuación se detalla la metodología utilizada según los cuadros solicitados en el Anexo de Presupuesto y Gasto (hoja “Ingreso de Datos”).

1. Cuadro N°1. Fuentes de financiamiento del Programa, período 2014-2018 (en miles de pesos nominales)

- a) El cuadro contempla el presupuesto inicial del Programa.
- b) Los montos señalados en el punto 1.1. “Asignación específica al Programa” corresponden a los recursos proporcionados a través de las respectivas leyes de presupuestos (presupuesto inicial) para financiar el recambio de alumbrado público, es decir, la ejecución de las obras. Sin embargo, este presupuesto presentó variadas modificaciones. En el caso del primer año (2014), los recursos fueron asignados mediante modificación presupuestaria. Para los años siguientes (2015-2018), los recursos fueron incluidos directamente en las leyes de presupuestos de cada año. Adicionalmente, en este mismo punto, se consideran los aportes proporcionados por los Gobiernos Regionales, ingresados al presupuesto del Ministerio de Energía mediante modificaciones presupuestarias. Para el año 2015, se consideraron M\$2.700.000, correspondiente a una transferencia para gastos de capital del Gobierno Regional de Antofagasta, tramitado mediante DH N°1422, de 06-10-2015. Respecto al año 2016, también a través de una transferencia para gastos de capital, se contemplaron M\$3.800.000 del Gobierno Regional de Antofagasta y M\$2.077.803 del Gobierno Regional de Arica y Parinacota, tramitados mediante el DH N°68, de 04-02-2016 y DH N°367, de 30-03-2016, respectivamente. Finalmente, para el año 2017, se consideraron M\$4.434.983 como una transferencia para gastos de capital del Gobierno Regional de Arica y Parinacota, tramitado mediante DH N°40, de 25-01-2017.
- c) Los recursos indicados en el punto 1.2. “Asignación institución responsable (ítem 21, 22 y 29, entre otros)” corresponden a los costos en personal (planta, contrata y honorarios), bienes y servicios de consumo (gastos permanentes, entre ellos, uso de espacios, consumo en servicios básicos y generales, materiales de oficina y habilitación de oficinas) y adquisición de activos no financieros (gastos por una sola vez, entre ellos, mobiliario, máquinas y equipos, equipos informáticos y programas informáticos). En el caso de los costos en personal, estos fueron considerados como gastos de administración⁴⁵, según el siguiente detalle:

⁴⁵ No se consideran gastos en personal como “gastos de producción”, puesto que las personas que instalan los equipos (en terreno) están incluidos dentro de los servicios licitados y contratados por la Subsecretaría. Por lo tanto, todo el gasto en personal ejecutado por la Subsecretaría es clasificado como “gasto de administración”, aun cuando existen profesionales contratados específicamente para el diseño e implementación del Programa.

- Gasto en administración: Se refiere a los recursos utilizados para financiar la contratación de un profesional del Departamento de Gestión y Presupuesto, cuya función es revisar y aprobar los informes de rendición de cuentas proporcionados por la Agencia Chilena de Eficiencia Energética, organismo ejecutor de una parte del Programa. En este caso, se consideraron un total de 20 horas mensuales, a partir del año 2014 en adelante. Por otro lado, a partir del año 2016, se consideró el costo asociado a los procesos de licitación desarrollados directamente por la Subsecretaría de Energía. Para este caso, se consideró el aporte de un profesional, por un total de 20 horas mensuales. Finalmente, se consideró el costo de las jefaturas de las divisiones de Eficiencia Energética y Jurídica, así como el costo asociado a la asistente de la División de Eficiencia Energética. Todos ellos cumplen un rol de supervisión y apoyo sobre las distintas etapas del Programa. En el caso de la jefatura de la División de Eficiencia Energética y su asistente, se consideraron 40 horas mensuales cada uno desde el año 2014 en adelante. Por su parte, en el caso de la jefatura de la División Jurídica, se consideraron 20 horas mensuales entre los años 2014 y 2015 y 10 horas mensuales entre los años 2016 y 2018. Finalmente, se incluyen los costos asociados al personal de la División de Eficiencia Energética, tanto a nivel central como regional. En el caso este último, se consideró que los profesionales en regiones destinaban unos 40% de su jornada laboral a la ejecución del Programa, dedicados principalmente a labores de inspección de obras.

2. Cuadro N°2. Presupuesto del Programa respecto del Presupuesto de la Institución Responsable, período 2014-2018 (en miles de pesos nominales).

- a) Respecto al presupuesto inicial de la Institución responsable, se consideraron los recursos de la Subsecretaría de Energía, incluidos sus 4 programas presupuestarios.
- b) En cuanto al presupuesto inicial del Programa (Asignación en Ley de Presupuesto), no se consideraron las modificaciones presupuestarias tramitadas en cada año con ocasión del financiamiento del Programa.

3. Cuadro N°3. Presupuesto Inicial y Gasto Devengado del Programa, período 2014-2018 (en miles de pesos nominales).

- a) El presupuesto inicial considera los fondos asignados en las respectivas leyes de presupuesto.
- b) El presupuesto vigente considera el presupuesto inicial más todas las modificaciones presupuestarias tramitadas durante cada año para el financiamiento del Programa. Considerando que el Programa es diseñado y aprobado durante el año 2014, los primeros recursos (M\$18.645) fueron incluidos dentro del presupuesto de la Subsecretaría de Energía mediante modificación presupuestaria. Asimismo, para los siguientes años, se tramitaron modificaciones presupuestarias para incluir los recursos aportados por los gobiernos regionales, según se indica en el punto 1, letra b) del presente informe.
- c) El gasto corresponde al presupuesto devengado en cada año presupuestario, en este caso, en el Sistema de Gestión Financiera del Estado (SIGFE).

4. Cuadro N°4. Gasto Total del Programa, período 2014-2018 (en miles de pesos nominales)

- a) El Programa sólo contempla gastos en personal, bienes y servicios de consumo, transferencias e inversión. No se consideran “otros gastos”, por lo que este cuadro no considera recursos para el Programa.

5. Cuadro N°5. Gastos Total del Programa según uso, desagregado en gastos de administración y gastos de producción, período 2014-2018 (en miles de pesos nominales)

- a) Los gastos de administración considera los costos relacionados con el personal de la División de Eficiencia Energética (nivel central y regional), la División de Gestión y Finanzas, la División Jurídica, la Jefatura de la División de Eficiencia Energética y su asistente, todos ellos detallados en el punto 1, letra c). Adicionalmente, considera los costos de habilitación de oficinas, así como los servicios y consumos permanentes.
- b) Los gastos de producción consideran exclusivamente los costos directos del Programa, asociados al recambio de luminarias.
- c) Los costos distintos a recursos humanos, identificados en la tabla como “otros gastos”, corresponden a bienes y servicios de consumo, transferencias e inversión.

6. Cuadro N°6. Gasto de producción de los Componentes del Programa, período 2014-2018 (en miles de pesos nominales)

- a) Se consideraron dos componentes: (1) Diseño, contratación y evaluación de proyectos de recambio de luminarias de alumbrado público y (2) Instalación de capacidades técnicas en los municipios en gestión de la energía eléctrica.
- b) El 98,5% del presupuesto total por año está asignado al primer componente.
- c) El 1,5% restante del presupuesto, está asociado al segundo componente.
- d) No se consideran costos por región, dado que el presupuesto de la Subsecretaría es administrado centralizadamente.

Anexo costos del Programa

DESCRIPCIÓN	2014	2015	2016	2017	2018
Jaime Villablanca	31.980	-	-	-	-
Segundo López	6.396	38.376	39.948	41.232	42.263
Paul Pacheco	-	4.832	30.779	35.028	35.904
Armando Pérez		4.800	27.756	30.276	31.033
Rafael Calderón		8.000	27.756	30.276	31.033
Luis Ternicien		10.400	30.180	30.276	31.033
TOTAL PROFESIONALES	38.376	66.408	156.419	167.088	171.265
Jefatura DEE	18.755	18.630	18.845	18.884	19.355
Secretaría DEE	4.107	4.107	3.854	4.156	4.260
TOTAL JEFATURA+ASISTENTE	22.863	22.737	22.699	23.040	23.615

TOTAL PERSONAL	61.239	89.145	179.118	190.128	194.881
SERVICIOS PERMANENTES	4.428	22.800	23.700	24.360	25.020
EQUIPAMIENTO	1.771	7.296	-	-	-
TOTAL HABILITACIÓN	6.199	30.096	23.700	24.360	25.020
SERVICIOS PERMANENTES (REGIONES)	-	-	61.620	63.336	65.052
EQUIPAMIENTO (REGIONES)	-	-	23.712	-	-
TOTAL HABILITACIÓN (REGIONES)	-	-	85.332	63.336	65.052
PERSONAL REGIONES			132.373	136.344	139.889
JEFE DJ	9.442	9.442	4.914	4.924	5.048
PERSONAL DGF (TRANSFERENCIAS)	3.252	3.252	3.331	3.466	3.554
PERSONAL DGF (COMPRAS)	-	-	4.070	4.417	4.527
TOTAL PERSONAL SOPORTE	12.694	12.694	12.316	12.807	13.128
COSTOS DE PRODUCCIÓN DIRECTOS	18.644.955	8.195.000	10.853.747	19.072.907	9.161.974
COSTO TOTAL DEL PROGRAMA	18.725.087	8.326.935	11.286.586	19.499.883	9.599.944

1. Fuentes presupuestarias:

1.1. Asignación Específica al Programa: Corresponde al presupuesto asignado al programa en la Ley de Presupuestos de los respectivos años.

1.2. Asignación institución responsable: Son los recursos financieros aportados al Programa por la institución responsable del mismo y que están consignados en la Ley de Presupuestos en los respectivos subtítulos 21 "Gastos en Personal", 22 "Bienes y Servicios de Consumo", 29 "Adquisición de Activos No Financieros" u otros. Ver clasificadores presupuestarios en documento "Instrucciones para Ejecución del Presupuesto del Sector Público" en http://www.dipres.gob.cl/594/articles-134517_doc_pdf.pdf

1.3. Aportes en Presupuesto de otras instituciones públicas: Son los recursos financieros incorporados en el presupuesto de otros organismos públicos (Ministerios, Servicios y otros), diferentes de la institución responsable del programa y que no ingresan a su presupuesto. Corresponderá incluir el detalle de dichos montos identificando los organismos públicos que aportan.

A efectos de comparar presupuestos y gastos, éstos deben ser expresados en moneda de igual valor. Para actualizar los valores en pesos nominales a valores en pesos reales del año 2017, deberá multiplicar los primeros por los correspondientes factores señalados en tabla de la hoja "Portada".

2. Fuentes Extrapresupuestarias:

Son los recursos financieros que no provienen del Presupuesto del Sector Público, tales como: aportes de Municipios, organizaciones comunitarias, los propios beneficiarios de un programa, sector privado o de la cooperación internacional. Corresponderá elaborar las categorías necesarias e incluir el detalle de los montos provenientes de otras fuentes de financiamiento, identificando cada una de ellas. Si no se cuenta con información de presupuesto para este ítem, incluir información de gastos, explicitando esto en una nota al pie del cuadro.

Cuadro N°1
Fuentes de financiamiento del Programa, período 2014-2018 (en miles de pesos año 2018)

Fuentes de Financiamiento	2014		2015		2016		2017		2018		Variación
	Monto	%	Monto	%	Monto	%	Monto	%	Monto	%	2014-2018
1. Presupuestarias	\$ 91.083	100%	\$ 6.129.379	100%	\$ 5.677.048	100%	\$ 15.456.587	100%	\$ 9.599.944	100%	10.440
1.1. Asignación específica al Programa	\$ 0	0%	\$ 5.985.664	98%	\$ 5.222.741	92%	\$ 15.018.510	97%	\$ 9.161.974	95%	-
1.2. Asignación institución responsable (ítem 21, 22 y 29, entre otros)	\$ 91.083	100%	\$ 143.716	2%	\$ 454.307	8%	\$ 438.077	3%	\$ 437.970	5%	381%
1.3. Aportes en presupuesto de otras instituciones públicas	\$ 0	0%	\$ 0	0%	\$ 0	0%	\$ 0	0%	\$ 0	0%	-
2. Extrapresupuestarias	\$ 0	0%	\$ 0	0%	\$ 0	0%	\$ 0	0%	\$ 0	0%	-
2.1 Otras fuentes, sector privado, aportes de beneficiarios, organismos internacionales, etc.	\$ 0	0%	\$ 0	0%	\$ 0	0%	\$ 0	0%	\$ 0	0%	-
Total	\$ 91.083		\$ 6.129.379		\$ 5.677.048		\$ 15.456.587		\$ 9.599.944		10.440%

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

2. Información presupuestaria del Programa respecto del presupuesto de la Institución Responsable, período 2014-2018
En la primera columna de la matriz de datos, se incluyen los montos del presupuesto inicial de la Institución Responsable, considerando la totalidad de los recursos institucionales. La cifra corresponde al presupuesto inicial aprobado en la Ley de Presupuestos del año respectivo.

En la segunda columna de la matriz de datos, se incluyen los montos del presupuesto inicial del Programa, sólo provenientes de la asignación específica al programa y de la asignación de la institución responsable. Las cifras coinciden con la suma de los puntos 1.1. y 1.2. del Cuadro N°1 "Fuentes de Financiamiento del Programa".

Cuadro N°2
Presupuesto del Programa respecto del Presupuesto de la
Institución Responsable, período 2014-2018
(en miles de pesos año 2018)

Año	Presupuesto inicial de la Institución responsable	Presupuesto Inicial del Programa (Asignación en Ley de Presupuesto)	% Respecto del presupuesto inicial de la institución responsable
2014	\$ 65.563.400	\$ 91.083	0,14%
2015	\$ 108.490.458	\$ 6.129.379	5,64%
2016	\$ 123.680.217	\$ 5.677.048	4,59%
2017	\$ 122.158.587	\$ 15.456.587	12,65%
2018	\$ 106.671.368	\$ 9.599.944	8,99%

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

3. Ejecución Presupuestaria del Programa, período 2014-2018

Se debe señalar el total de presupuesto y gasto del programa en evaluación, desagregado en los subtítulos presupuestarios de: (i) personal, (ii) bienes y servicios de consumo, (iii) transferencias, (iv) inversión, y (v) otros, los que se pide identificar. Cuando los recursos que provienen de la Institución Responsable (1.2 Cuadro 1) no tengan una desagregación directa según su aporte al programa, se debe realizar la estimación correspondiente, asumiendo el programa respectivo como un Centro de Costos (adjuntar anexo de cálculo y supuestos de dicha estimación en el punto 7. Metodología). A continuación se especifican los Subtítulos presupuestarios a considerar :

Personal Subtítulo 21
Bienes y Servicios de Consumo Subtítulo 22
Transferencias Subtítulos 24 y 33
Inversión Subtítulos 31 y 29
Otros Otros Subtítulos

En la primera columna de la matriz de datos, corresponde incluir los montos del presupuesto inicial del Programa (A), sólo provenientes de la asignación específica al programa y de la asignación de la institución responsable (Las cifras deben coincidir con la suma de los puntos 1.1. y 1.2. del Cuadro N°1).

En la segunda columna de la matriz de datos, se ingresa el Presupuesto Vigente (B), que se encuentra disponible en los reportes de ejecución elaborados por DIPRES. Ver Informes de Ejecución por Programa al Cuarto trimestre, disponible en www.dipres.gob.cl

El gasto devengado (C) corresponde a todos los recursos y obligaciones del programa que se generen, independientemente de que éstas hayan sido o no percibidas o pagadas. La información contenida en este punto debe ser consistente con la del Cuadro N°4 "Gasto Total del Programa", en lo que se refiere a la columna de gasto devengado del presupuesto inicial.

A efectos de comparar presupuestos y gastos, éstos deben ser expresados en moneda de igual valor. Para actualizar los valores en pesos nominales a valores en pesos reales del año 2017, deberá multiplicar los primeros por los correspondientes factores señalados en la tabla de la hoja "Portada":

Cuadro N°3
Presupuesto Inicial y Gasto Devengado del Programa, período
2014-2018
(en miles de pesos año 2018)

AÑO 2014	Presupuesto Inicial (A)	Presupuesto Vigente (B)	Gasto Devengado del Presupuesto Ejecución (C)	Indicadores Ejecución y Planificación Presupuestaria	
				(C/B) %	(C/A) %
Personal	\$ 84.037	\$ 84.037	\$ 84.037	100,0%	100,0%
Bienes y Servicios de Consumo	\$ 5.033	\$ 5.033	\$ 5.033	100,0%	100,0%
Transferencias	\$ 0	\$ 21.193.018	\$ 21.193.018	100,0%	#¡DIV/0!
Inversión	\$ 2.013	\$ 2.013	\$ 2.013	100,0%	100,0%
Otros (Identificar)	\$ 0	\$ 0	\$ 0	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!
Total	\$ 91.083	\$ 21.284.101	\$ 21.284.101	100,0%	23367,8%

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

AÑO 2015	Presupuesto Inicial (A)	Presupuesto Vigente (B)	Gasto Devengado del Presupuesto Ejecución (C)	Indicadores Ejecución y Planificación Presupuestaria	
				(C/B) %	(C/A) %
Personal	\$ 110.932	\$ 110.932	\$ 110.932	100,0%	100,0%
Bienes y Servicios de Consumo	\$ 24.836	\$ 24.836	\$ 24.836	100,0%	100,0%
Transferencias	\$ 5.985.664	\$ 8.926.754	\$ 8.926.754	100,0%	149,1%
Inversión	\$ 7.947	\$ 7.947	\$ 7.947	100,0%	100,0%
Otros (Identificar)	\$ 0	\$ 0	\$ 0	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!
Total	\$ 6.129.379	\$ 9.070.470	\$ 9.070.470	100,0%	148,0%

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

AÑO 2016	Presupuesto Inicial (A)	Presupuesto Vigente (B)	Gasto Devengado del Presupuesto Ejecución (C)	Indicadores Ejecución y Planificación Presupuestaria	
				(C/B) %	(C/A) %
Personal	\$ 339.867	\$ 339.867	\$ 339.867	100,0%	100,0%
Bienes y Servicios de Consumo	\$ 89.552	\$ 89.552	\$ 89.552	100,0%	100,0%
Transferencias	\$ 5.222.741	\$ 11.392.071	\$ 11.392.071	100,0%	218,1%
Inversión	\$ 24.888	\$ 24.888	\$ 24.888	100,0%	100,0%
Otros (Identificar)	\$ 0	\$ 0	\$ 0	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!
Total	\$ 5.677.048	\$ 11.846.378	\$ 11.846.378	100,0%	208,7%

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

AÑO 2017	Presupuesto Inicial (A)	Presupuesto Vigente (B)	Gasto Devengado del Presupuesto Ejecución (C)	Indicadores Ejecución y Planificación Presupuestaria	
				(C/B) %	(C/A) %
Personal	\$ 348.101	\$ 348.101	\$ 348.101	100,0%	100,0%
Bienes y Servicios de Consumo	\$ 89.976	\$ 89.976	\$ 89.976	100,0%	100,0%
Transferencias	\$ 15.018.510	\$ 19.568.803	\$ 19.568.803	100,0%	130,3%
Inversión	\$ 0	\$ 0	\$ 0	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!
Otros (Identificar)	\$ 0	\$ 0	\$ 0	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!
Total	\$ 15.456.587	\$ 20.006.880	\$ 20.006.880	100,0%	129,4%

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

AÑO 2018	Presupuesto Inicial
Personal	\$ 347.898
Bienes y Servicios de Consumo	\$ 90.072
Transferencias	\$ 9.161.974
Inversión	\$ 0
Otros (Identificar)	\$ 0
Total	\$ 9.599.944

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

4. Gasto Total del Programa, período 2014-2017

En este cuadro se debe incluir el total de gasto por año del Programa, incluídos aquellos con cargo a los recursos aportados por otras instituciones públicas (1.3) o provenientes de "Fuentes Extrapresupuestarias" (2.1. otras fuentes), señaladas en el cuadro N° 1.

En la primera columna de la matriz de datos, corresponde incluir el gasto devengado del presupuesto asignado en la Ley de Presupuestos. En otras palabras, este gasto es el financiado con los recursos consignados en los puntos 1.1. y 1.2. del Cuadro N°1 "Fuentes de Financiamiento del Programa" y presentado en la cuarta columna del Cuadro 3 "Gasto Devengado del Presupuesto Ejecución (C)".

A efectos de comparar presupuestos y gastos, éstos deben ser expresados en moneda de igual valor. Para actualizar los valores en pesos nominales a valores en pesos reales del año 2017, deberá multiplicar los primeros por los correspondientes factores señalados en la tabla de la hoja "Portada".

En la última columna, el monto total de gasto del programa para cada año deberá ser igual al monto total del Cuadro N°5 "Gastos Total del Programa según uso" del respectivo año.

-	Cuadro N°4	-
-	<u>Gasto Total del Programa, período 2014-2017</u>	-
-	<u>(en miles de pesos año 2018)</u>	-
-	-	-

AÑO	Gasto Devengado del Presupuesto	Otros Gastos	Total Gasto del Programa
2014	\$ 21.284.101	\$ 0	\$ 21.284.101
2015	\$ 9.070.470	\$ 0	\$ 9.070.470
2016	\$ 11.846.378	\$ 0	\$ 11.846.378
2017	\$ 20.006.880	\$ 0	\$ 20.006.880

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

5. Gasto Total del Programa, desagregado según uso, período 2014-2017

En este cuadro se debe incluir el total de gasto por año del Programa, incluídos aquellos con cargo a los recursos aportados por otras instituciones públicas o provenientes de las otras fuentes señaladas en el cuadro N° 1 (ingresos obtenidos, aportes privados, etc.) y presentado en la última columna del Cuadro 4.

"Corresponde señalar el desglose del gasto total del programa (incluidas todas las fuentes de financiamiento) en: (i) gastos de administración y (ii) gastos de producción de los componentes del programa.

Los gastos de administración se definen como todos aquellos desembolsos financieros que están relacionados con la generación de los servicios de apoyo a la producción de los componentes, tales como contabilidad, finanzas, secretaría, papelería, servicios de luz, agua, etc..

Los gastos de producción corresponden a aquellos directamente asociados a la producción de los bienes y/o servicios (componentes) del programa, tales como pago de subsidios, becas, prestaciones de salud, etc..

Los gastos de administración y producción deben ser desagregados según su uso, considerando recursos destinados a: (i) Recursos Humanos y (ii) Otros Gastos. Los recursos efectivamente destinados a la contratación de personal (Recursos Humanos) pueden ser independientes de su fuente de financiamiento y de si éstos son dedicados a la producción de los componentes o para la gestión/administración del programa. En los Otros Gastos se deben incorporar todos los gastos que no corresponden a contratación de personal y pueden desagregarse en la medida en que la evaluación lo requiera y la información así lo permita.

A efectos de comparar presupuestos y gastos, éstos deben ser expresados en moneda de igual valor. Para actualizar los valores en pesos nominales a valores en pesos reales del año 2016, deberá multiplicar los primeros por los correspondientes factores señalados en la tabla de la hoja "Portada":

NOTA: 1) Para aclarar la definición de "Gastos de Administración" y "Gastos de Producción" se sugiere revisar el capítulo XV de documento "Evaluación Ex-post: Conceptos y Metodologías", División de Control de Gestión, DIPRES, 2015; en http://www.dipres.gob.cl/594/articles-135135_doc_pdf.pdf

2) Para completar el Cuadro ingrese sólo cada categoría de gasto, pues los totales y porcentajes se calcularán automáticamente.

Cuadro N°5

Gastos Total del Programa según uso, desagregado en gastos de administración y gastos de producción, período 2014-2018

AÑO 2014	Gasto Total del Programa		TOTAL	% (RR.HH vs Otros Gastos)
	Gasto Producción	Gasto Administración		
Recursos Humanos	\$ 0	\$ 84.037	\$ 84.037	0,4%
Otros Gastos	\$ 21.193.018	\$ 7.046	\$ 21.200.065	99,6%
Total	\$ 21.193.018	\$ 91.083	\$ 21.284.101	-----
% (Gasto Produc. Vs Admin)	99,6%	0,004279393	-----	-----

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

AÑO 2015	Gasto Total del Programa		TOTAL	% (RR.HH vs Otros Gastos)
	Gasto Producción	Gasto Administración		
Recursos Humanos	\$ 0	\$ 110.932	\$ 110.932	1,2%
Otros Gastos	\$ 8.926.754	\$ 32.783	\$ 8.959.537	98,8%
Total	\$ 8.926.754	\$ 143.716	\$ 9.070.470	-----
% (Gasto Produc. Vs Admin)	98,4%	0,015844365	-----	-----

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

AÑO 2016	Gasto Total del Programa		TOTAL	% (RR.HH vs Otros Gastos)
	Gasto Producción	Gasto Administración		
Recursos Humanos	\$ 0	\$ 339.867	\$ 339.867	2,9%
Otros Gastos	\$ 11.392.071	\$ 114.440	\$ 11.506.511	97,1%
Total	\$ 11.392.071	\$ 454.307	\$ 11.846.378	-----
% (Gasto Produc. Vs Admin)	96%	0,038349861	-----	-----

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

AÑO 2017	Gasto Total del Programa		TOTAL	% (RR.HH vs Otros Gastos)
	Gasto Producción	Gasto Administración		
Recursos Humanos	\$ 0	\$ 348.101	\$ 348.101	1,7%
Otros Gastos	\$ 19.568.803	\$ 89.976	\$ 19.658.779	98,3%
Total	\$ 19.568.803	\$ 438.077	\$ 20.006.880	-----
% (Gasto Produc. Vs Admin)	97,8%	\$ 0	-----	-----

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

6. Gasto de Producción de los Componentes del Programa, período 2014-2017

Se debe señalar el monto total de gastos involucrados en la producción de cada componente del programa (1). En los casos que corresponda se debe hacer la desagregación por región, considerando el gasto efectivo realizado en cada región.

Los gastos de producción de los componentes del programa son aquellos directamente asociados a la producción de los bienes y/o servicios (componentes) del programa, tales como pago de subsidios, becas, prestaciones de salud, etc. (1)

El total de gasto de producción de cada año, debe ser coincidente con el total anual de Gasto de Producción del Cuadro 5.

Nota: (1) Ver Anexo II de documento "Evaluación Ex-post: Conceptos y Metodologías", División de Control de Gestión, DIPRES, 2015; en http://www.dipres.gob.cl/594/articles-135135_doc_pdf.pdf

Cuadro N°6
Gasto de producción de los Componentes del Programa, período 2014-2017
(en miles de pesos año 2018)

AÑO 2014	Arica y Parinacota	Tarapacá	Antofagasta	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	O'Higgins	Maule	Bío Bío	Araucanía	Los Ríos	Los Lagos	Aysén	Magallanes	Región Metropolitana	Total
Componente 1	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 20.964.840	\$ 20.964.840
Componente 2	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 319.261	\$ 319.261
Componente ...	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Componente N	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Total	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 21.284.101	\$ 21.284.101

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

AÑO 2015	Arica y Parinacota	Tarapacá	Antofagasta	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	O'Higgins	Maule	Bío Bío	Araucanía	Los Ríos	Los Lagos	Aysén	Magallanes	Región Metropolitana	Total
Componente 1	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 8.934.413	\$ 8.934.413
Componente 2	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 136.057	\$ 136.057
Componente ...	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Componente N	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Total	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 9.070.470	\$ 9.070.470

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

AÑO 2016	Arica y Parinacota	Tarapacá	Antofagasta	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	O'Higgins	Maule	Bío Bío	Araucanía	Los Ríos	Los Lagos	Aysén	Magallanes	Región Metropolitana	Total
Componente 1	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 11.668.682	\$ 11.668.682
Componente 2	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 177.696	\$ 177.696
Componente ...	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Componente N	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Total	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 11.846.378	\$ 11.846.378

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

AÑO 2017	Arica y Parinacota	Tarapacá	Antofagasta	Atacama	Coquimbo	Valparaíso	O'Higgins	Maule	Bío Bío	Araucanía	Los Ríos	Los Lagos	Aysén	Magallanes	Región Metropolitana	Total
Componente 1	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 19.706.777	\$ 19.706.777
Componente 2	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 300.103	\$ 300.103
Componente ...	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Componente N	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Total	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 20.006.880	\$ 20.006.880

Fuente: Depto. Planificación Subsecretaría Energía, www.dipres.cl

Anexo 6: Encuesta de satisfacción de beneficiarios

**PROGRAMA DE RECAMBIO DE 200.000
LUMINARIAS DE ALUMBRADO PÚBLICO**



**Ministerio de
Energía**

Gobierno de Chile



ENCUESTA DE SATISFACCIÓN DE USUARIO

**Metodología y Resultados de encuesta de satisfacción
de usuarios del programa de recambio masivo de
200.000 luminarias de alumbrado público.**

MINISTERIO DE ENERGÍA
DIVISIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA
Santiago, viernes 11 de mayo de 2018

METODOLOGÍA**USUARIOS CONVOCADOS**

Se envía la encuesta a 98 municipios, que se encuentran con proyectos finalizados

1. Alto Hospicio	35. Lanco	69. Puqueldón
2. Ancud	36. Lautaro	70. Quellón
3. Antofagasta	37. Lebu	71. Quillón
4. Arica	38. Llay Llay	72. Quilpue
5. Aysén	39. Longaví	73. Quilpue
6. Cabrero	40. Maipu	74. Quinta de Tilcoco
7. Calama	41. Malloa	75. Quintero
8. Calbuco	42. Marchigüe	76. Ránquil
9. Carahue	43. María Elena	77. Rengo
10. Chépica	44. Mejillones	78. Río Bueno
11. Chillan Viejo	45. Molina	79. Río Ibáñez
12. Chimbarongo	46. Monte Patria	80. Saavedra
13. Coihueco	47. Mulchén	81. San Clemente Rural
14. Collipulli	48. Nacimiento	82. San Clemente Urbano
15. Coltauco	49. Nancagua	83. San Esteban
16. Combarbalá	50. Navidad	84. San Gregorio
17. Constitución	51. Ninhue	85. San Nicolás
18. Coronel	52. Ollagüe	86. San Pedro Atacama
19. Corral	53. Ovalle	87. Santa Bárbara
20. Dalcahue	54. Padre Hurtado	88. Santa Juana
21. El Bosque	55. Paillaco	89. Santa María
22. El Carmen	56. Palena	90. Sierra Gorda
23. El Quisco	57. Palmilla	91. Taltal
24. Empedrado	58. Panquehue	92. Tirua
25. Freire	59. Panquehue	93. Tocopilla
26. Frutillar	60. Paredones	94. Tomé
27. Gorbea	61. Parral	95. Trehuaco
28. Hualqui	62. Penciahue	96. Villa Alemana
29. Isla de Pascua	63. Penco	97. Yerbass Buenas
30. La Calera	64. Petorca	98. Yungay
31. La Florida	65. Pinto	
32. La Ligua	66. Placilla	
33. La Pintana	67. Portezuelo	
34. Laja	68. Puente Alto	

HERRAMIENTA UTILIZADA

Se utiliza el formulario web de la empresa Google, el que permite sistematizar las respuestas obtenidas mediante una base de datos de fácil manejo. A continuación, se presentan algunas fotografías de la encuesta.

Encuesta de satisfacción

Estimados colaboradores, en el marco de la ejecución del programa de recambio de alumbrado, es para nosotros importante conocer su opinión sobre la ejecución del mismo.

***Obligatorio**

Dirección de correo electrónico *

Tu dirección de correo electrónico

PROGRAMA DE RECAMBIO DE ALUMBRADO PÚBLICO
200.000 luminarias de alumbrado público

3.- Ahorro de costos en su cuenta de electricidad. (No califique si no esta medido)

1 2 3 4 5 6 7

☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

4.- Valoración o beneficios para la comunidad percibidos por el municipio del recambio de las luminarias *

1 2 3 4 5 6 7

☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

5.- Capacitación recibida por los funcionarios al finalizar el recambio de luminarias para la gestión de la energía eléctrica. (No califique si no recibió capacitación)

1 2 3 4 5 6 7

☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

6.- En general el recambio de las luminarias de alumbrado público en su comuna. *

1 2 3 4 5 6 7

☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

7.- ¿Persisten sectores en su comuna que requieran prioritariamente recambio de alumbrado público? *

☐ SI

Encuesta de satisfacción

***Obligatorio**

Preguntas de satisfacción

Califique los siguientes aspectos del proceso de Recambio de Luminarias de Alumbrado Público de 1 a 7 (siendo 1 muy insatisfactorio y 7 muy satisfactorio)

1.- El tiempo de instalación de las nuevas luminarias fue el esperado. *

1 2 3 4 5 6 7

☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

2.- La comunicación con el administrador del contrato a cargo del recambio de luminarias (Ministerio de Energía o Agencia Chilena de Eficiencia Energética según corresponda), respecto a las etapas del proceso *

1 2 3 4 5 6 7

☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

7.- ¿Persisten sectores en su comuna que requieran prioritariamente recambio de alumbrado público? *

☐ SI

☐ NO

☐ No lo sé

8.- Sugerencias y/u observaciones:

Tu respuesta

Página 2 de 2

Nunca envíes contraseñas a través de Formularios de Google.

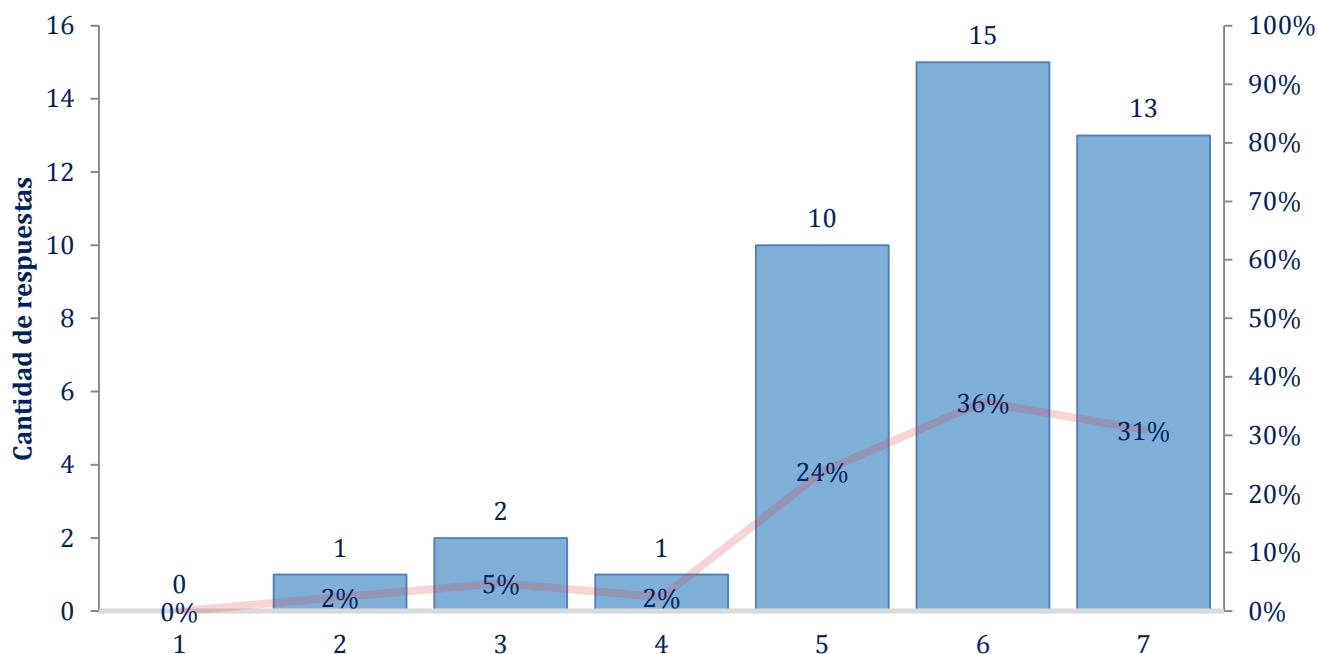
RESULTADOS**Municipios que respondieron**

1. Ancud
2. Arica
3. Cabrero
4. Calama
5. Collipulli
6. Coltauco
7. Combarbalá
8. Constitución
9. Coronel
10. Corral
11. Dalcahue
12. Empedrado
13. Frutillar
14. Laja
15. Lautaro
16. Malloa
17. María Elena
18. Mejillones
19. Mulchén
20. Nacimiento
21. Navidad
22. Ninhue
23. Paillaco
24. Palena
25. Palmilla
26. Panquehue
27. Parral
28. Penciahue
29. Petorca
30. Puente Alto
31. Quilpue
32. Río Ibáñez
33. San Esteban
34. San Gregorio
35. San Pedro Atacama
36. Santa Bárbara
37. Santa Juana
38. Santa María
39. Tirua
40. Tomé
41. Villa Alemana
42. Yerbas Buenas

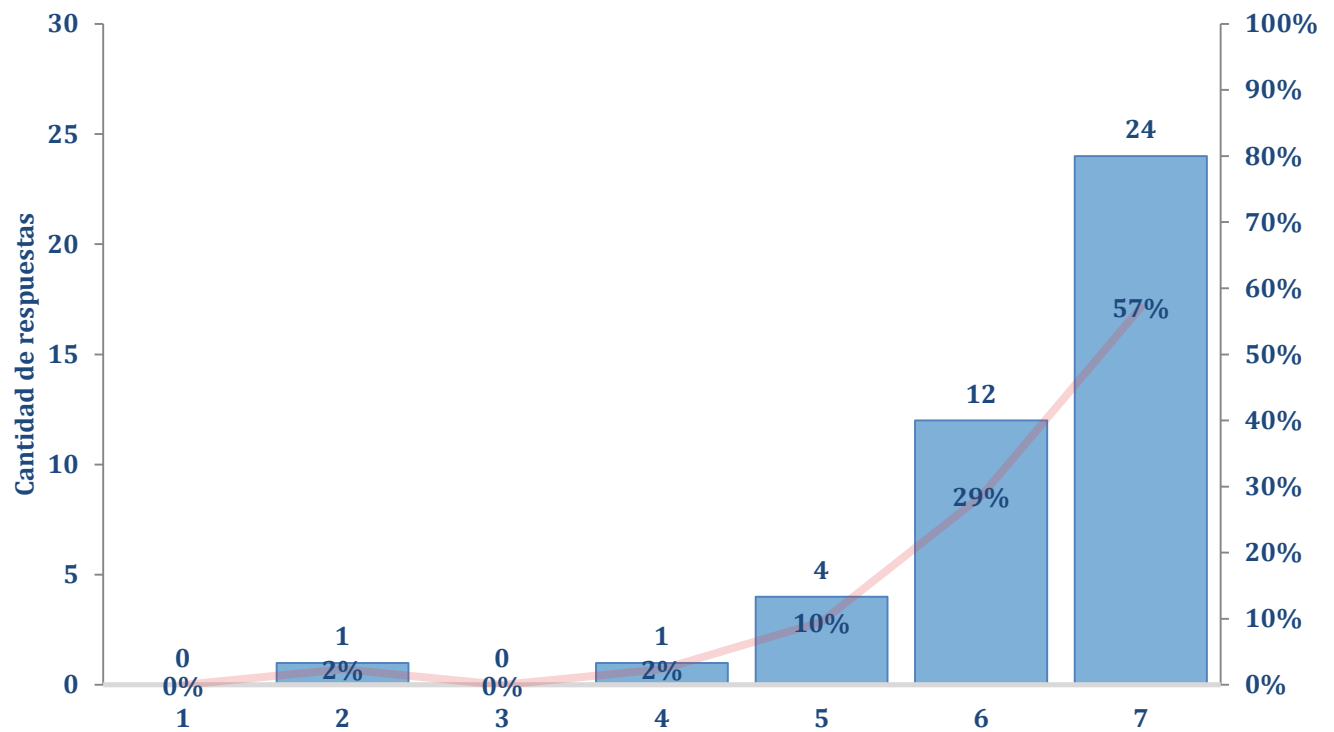
PREGUNTAS REALIZADAS Y SUS RESPUESTAS

Instrucciones: Califique los siguientes aspectos del proceso de Recambio de Luminarias de Alumbrado Público de 1 a 7 (siendo 1 muy insatisfactorio y 7 muy satisfactorio)

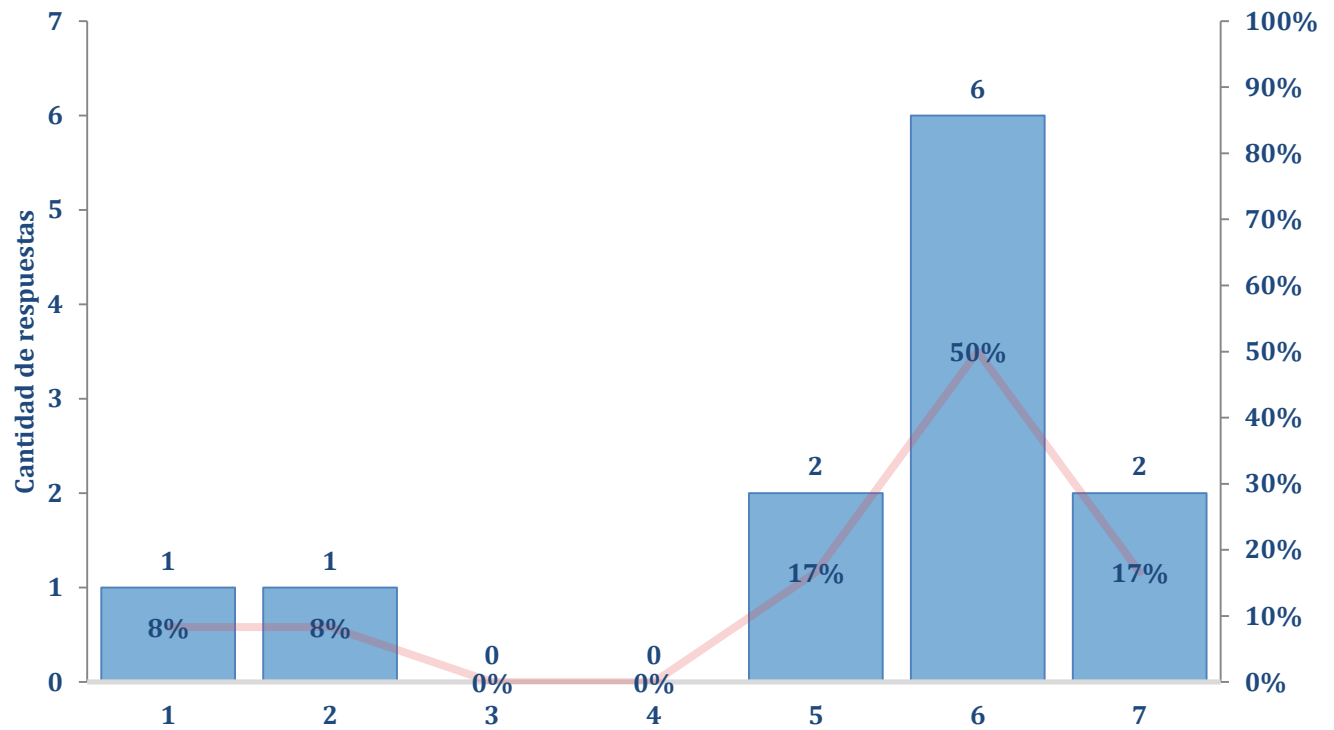
**EL TIEMPO DE INSTALACIÓN DE LAS NUEVAS LUMINARIAS FUE EL ESPERADO.
(42 RESPUESTAS)**



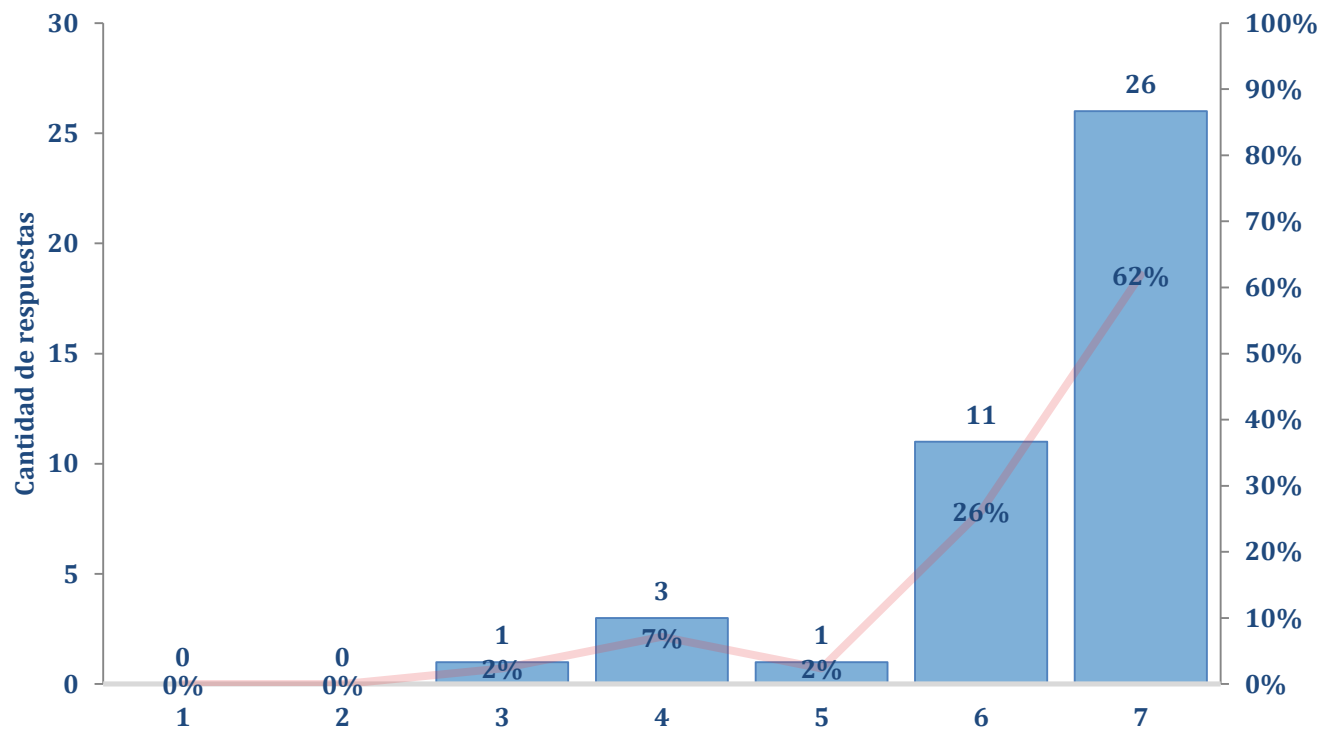
La comunicación con el administrador del contrato a cargo del recambio de luminarias respecto a las etapas del proceso (42 RESPUESTAS)



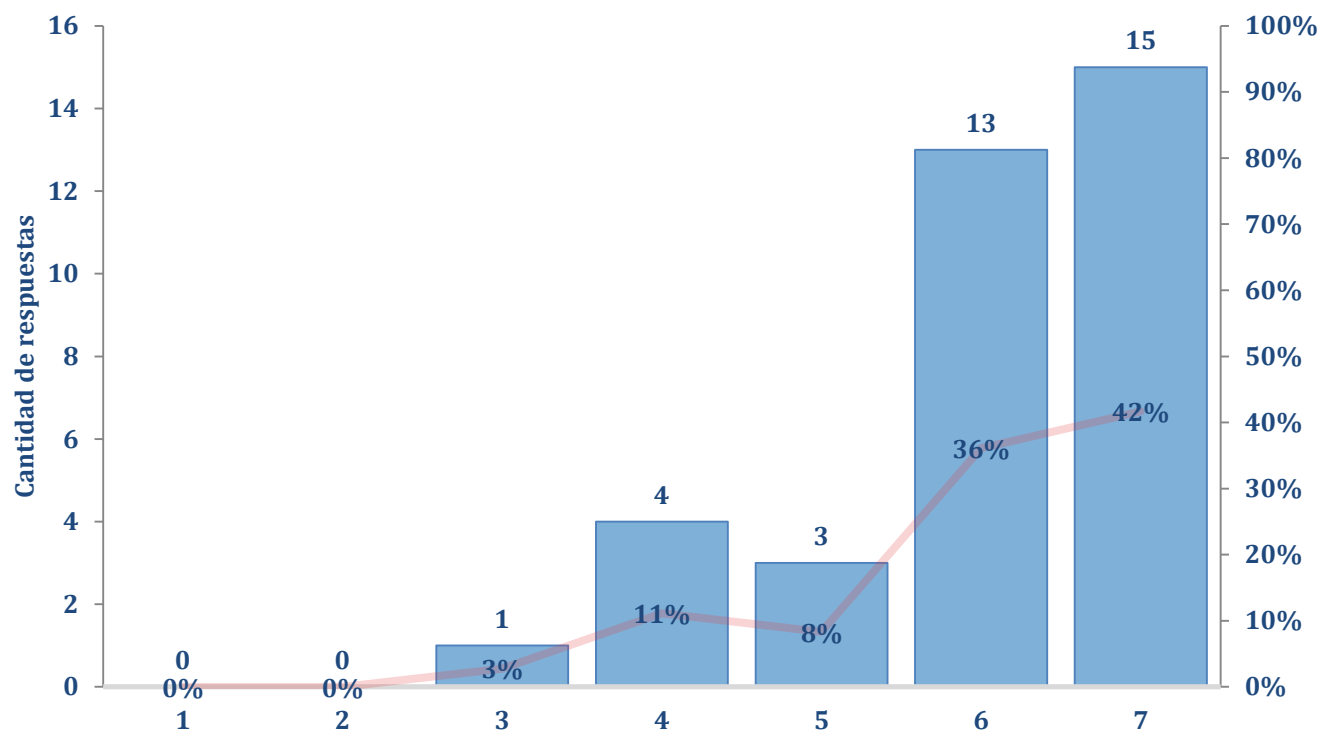
Ahorro de costos en su cuenta de electricidad. (No califique si no está medido) (12 RESPUESTAS)



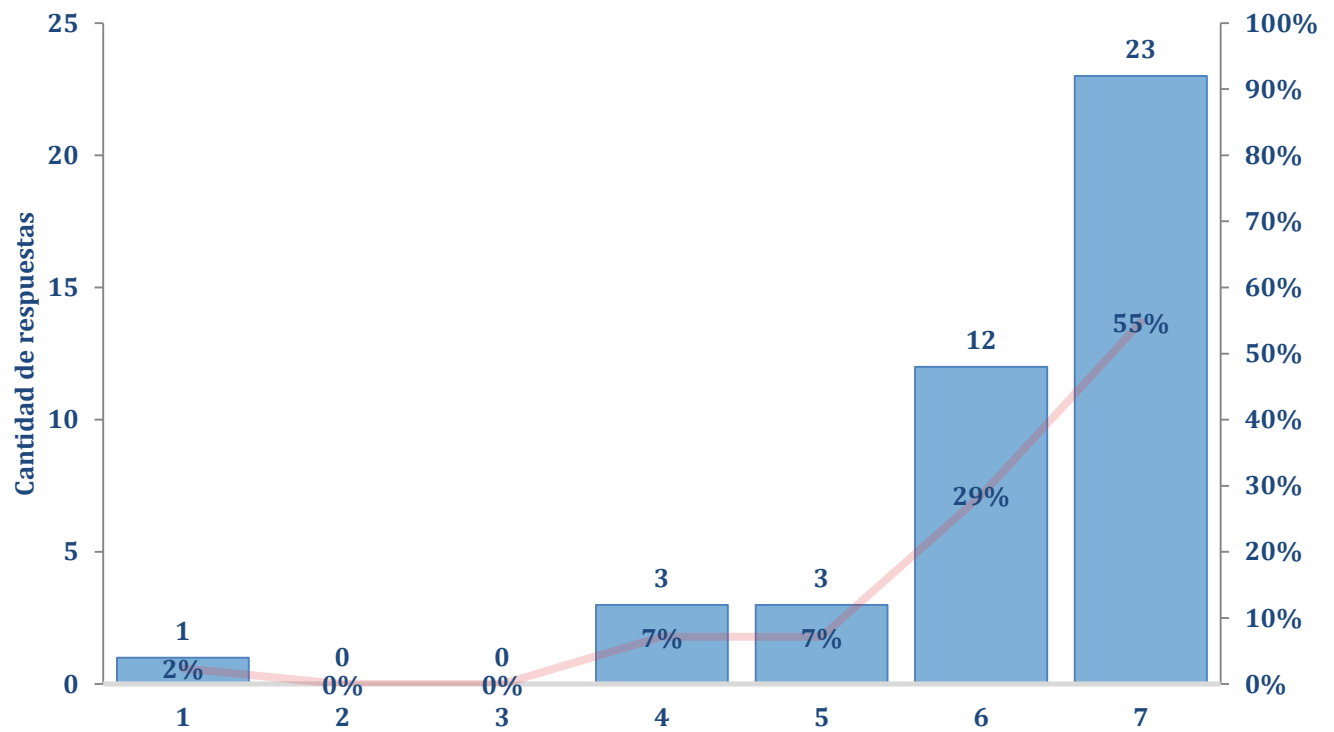
Valoración o beneficios para la comunidad percibidos por el municipio del recambio de las luminarias (42 RESPUESTAS)



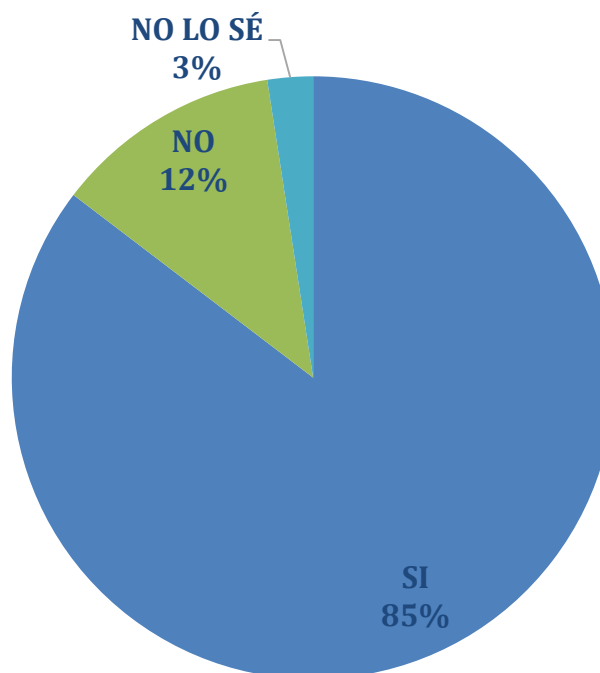
Capacitación recibida por los funcionarios al finalizar el recambio de luminarias para la gestión de la energía eléctrica. (No califique si no recibió capacitación) (36 RESPUESTAS)



En general el recambio de las luminarias de alumbrado público en su comuna. (42 RESPUESTAS)



¿Persisten sectores en su comuna que requieran prioritariamente recambio de alumbrado público? (42 RESPUESTAS)



Sugerencias y/u observaciones (27 RESPUESTAS)

NOTA:RESPUESTAS SIN EDITAR

MUNICIPIO RESPUESTA

Empedrado ; p

Coltauco Generar las instancias par un nuevo proyecto para que la comuna quede con el 100% con Luminarias LED.

Tirua respecto a la solución utilizada en nuestra comuna para conectar el gancho y luminaria al tendido eléctrico a demostrado no ser el optimo esto ya que al parecer al contar nuestra zona costera con vientos muy altos han permitido que este sistema no funcione generando puntos oscuros en todas las lineas de alumbrado

MUNICIPIO	RESPUESTA
	recambiadas, por ende un malestar en la comunidad .. por otro lado no tenemos contacto alguno con la contra parte designada (empresa), hemos intentado por todos los medios pero no hemos tenido resultados optimos.
Palena	Excelente iniciativa por parte del ministerio de energía, teníamos muchos problemas con el alumbrado publico y este cambio nos ayudó muchísimo. La empresa contratista trabajó rápido, sin embargo el inspector técnico por parte del ministerio fue crucial. Se cambiaron todas las luminarias públicas, el problema que tenemos ahora es alumbrar sectores sin iluminación.
Lautaro	mayor preocupación post proyecto por arte del ministerio, no se cumple con la dotación de luminarias para repuestos en las oficinas de frontel, por ende cada vez que falla una luminaria no hay repuestos, tal como lo aseguraba el proyecto.
Tomé	Evaluar posibilidad de abordar recambio de parque lumínico que aun continua en sodio (aprox 850 luminarias equivalente a un 12% del parque lumínico de la comuna)
Dalcahue	DEBERIA EXISTIR UNA SEGUNDA ETAPA, DADO QUE EN LA COMUNA EXISTEN MUCHOS SECTORES CON SISTEMA DE ILUMINACION CON LUMINARIAS DE SODIO.
Mulchén	Falta un periodo de prueba de luminarias ya que la postacion no es homogénea en toda la comuna y por lo tantos se debe usar una potencia mayor u menor como lo hacen las empresas que se dedican a vender estos productos.
Paillaco	Programa debería seguir para el recambio en otras localidades de la Comuna.
San Gregorio	Las luminarias instaladas son de excelente calidad, no así los cables que las conectan al tendido eléctrico, son muy delgados, esta zona se caracteriza por presencia constante de fuertes vientos, los que cortan los delgados cables. También los contactores instalados podrían haber sido de mejor calidad ya que no duran mucho tiempo, se deben cambiar con frecuencia. Lo demás, excelente, un gran proyecto.

MUNICIPIO	RESPUESTA
Arica	Que se considere el cambio de postación y cableado
Pencahue	un nuevo llamado a concurso para recambio de luminarias que faltan, ya que no se alcanzo el 100% de recambio del parque luminico.
Constitución	Poder replicar el proyecto a zonas rurales, las que no fueron abordadas por el proyecto.
Puente Alto	para próximos proyectos se debe incluir en el cálculo de la zona a iluminar no solo las vías, hay que incluir las veredas como parte del proyecto debido a la poca o nula refracción de la luz que presenta la tecnología LED
Coronel	Mejorar el procedimiento para hacer efectiva la garantía de las luminarias, ya que el municipio debe retirarlas, emitir un informe por su falla, enviarlas por un medio de transporte y recibirlas si cubre la garantía por otro medio de transporte, luego volver a instalarla. Además, cada 6 meses hay que lavarlas y limpiarlas para que se haga efectiva la garantía. Y no todos los municipios tienen el presupuesto para realizar esta mantención a 5134 luminarias como es nuestro caso.
Calama	considerar plazos de ejecución mas holgados.
María Elena	la gente de la localidad de Quillagua se encuentra muy agradecida por este recambio de luminarias, ya que mejoró significativamente su calidad de vida.
Villa Alemana	Mejorar el proceso de garantía y entrega de lámparas cuando falla la original.

MUNICIPIO	RESPUESTA
Ancud	No hubo total conocimiento del contrato y de las bases de licitación durante el proceso, de estos documentos se tuvo acceso al finalizar el proyecto y quedaron observaciones por desconocimiento. Hace falta un agregar un proceso de sanción que anticipe como último recurso el cobro de la boleta de garantía. Actualmente tenemos muchos incumplimientos en el tiempo de plazo de reposición de las luminarias o accesorios en garantía. El informe de análisis para el cambio de tarifa recibida es incompleta. El contratista se comprometió hacerlo y a la fecha de hoy no lo han hecho. Saludos y gracias.
Frutillar	que se puedan implementar nuevos proyectos para algunas zonas urbanas y rurales que faltaron recambiar
Santa Bárbara	Nuestra comuna mejoro notablemente la sensación de inseguridad gracias al recambio de de luminarias de sodio por tecnología led.
Navidad	poder generar otro proyecto para completar el recambio de luminarias en la comuna.
Corral	se necesita realizar mayor inspección en la parte de instalación de los circuitos de alumbrado ya que el municipio no cuenta con personal idoneo para realizar esta labor.
Yerbas Buenas	mejorar capacitación de la forma de hacer efectiva las garantías después de la entrega de las luminarias
Nacimiento	Se solicita una comunicación mas fluida con la empresa que tiene a cargo la garantía de las luminarias. Pd. si no se contesto antes es porque nunca me llevo la encuesta a mi persona, yo como encargada de alumbrado público y quien fui parte del recambio de las luminarias en terreno.

MUNICIPIO RESPUESTA

Santa María Realizar nuevamente el proceso de recambio de alumbrado público para abarcar nuevos sectores

Cabrero La postulación realizada por la Municipalidad contemplaba para el Sector Rural de la Comuna luminarias LED, mientras que el proyecto aprobado y ejecutado incorporó luminarias SODIO. La aprobación del proyecto no incorporó una población (Villa Bicentenario), ubicada en el Sector Urbano de la Comuna Cabrero Oriente.
A la fecha no se ha reflejado el ahorro en el costo del consumo de electricidad.
En general este proyecto se evalúa en forma positiva para la comuna y su desarrollo, lo que nos permite seguir mejorando en materias de eficiencia energética.



**APOYO A LA EFICIENCIA ENERGETICA
EN EL SECTOR RESIDENCIAL Y MUNICIPAL
CONSULTORIA TECNICA – ALUMBRADO PÚBLICO
CT-CH-1128-SN1**

Informe PARCIAL

Elaborado por



07-01-2014

ÍNDICE

ACRONIMOS	5
RESUMEN EJECUTIVO	6
1. CATASTRO DE ALUMBRADO PÚBLICO EN CHILE.....	14
1.1. Metodología: Estimación de Catastro 2005 (completo).....	15
1.2. Catastro Completo Estimado Año 2005	18
1.3. Conclusiones Catastro Estimado	19
2. OPCIONES TECNOLOGICAS PARA AP.....	21
2.1 Definiciones.....	21
2.2. Análisis de Tecnologías	24
2.3. Sistemas de control de iluminación	30
2.4. Componentes Eléctricos y Mecánicos de las luminarias	32
2.5. Cuadro comparativo de tecnologías.....	36
2.6. Ventajas y desventajas	36
2.7. Opciones que cumplen el propósito de EE.....	37
3. SEGMENTACION DE MUNICIPIOS.....	39
3.1. Tipología Comunal para la provisión de servicios municipales, Subdere, 2010.	39
3.2. Segmentación por parque de luminarias	44
3.3. Conclusiones	48
4. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y SOCIAL DE UN PROGRAMA DE RECAMBIO TOTAL Y PARCIAL DE AP.	49
4.1. Modelo de cálculo	49
4.1.1. Costos.....	50
4.1.2. Beneficios	51
4.1.3 Análisis de Rentabilidad	53
4.1.4 Horizonte de Evaluación.....	55
4.1.5. Precios Sociales.....	55
4.2. Resultados Evaluaciones Económicas Privadas y Sociales	65
4.3. Sensibilización	66
4.3.1. Escenario 1 evaluación privada: Variación tasa de descuento	66
4.3.2. Escenario 2 evaluación privada: Variación tasa de descuento e incremento del costo tecnológico	68
4.3.3. Escenario 3 evaluación privada: Variación tasa de descuento y disminución del costo tecnológico	70
4.3.4. Escenario 4 evaluación privada: Variación tasa de descuento, disminución del costo tecnológico e incremento del precio de potencia y energía.....	73

4.3.5. Escenario 5 evaluación social: Incremento en el costo tecnológico	75
4.4. Evaluación económica privada y social del reemplazo de tecnologías ineficientes por VSAP o LED	77
4.5. Beneficios a nivel País	80
4.6. Beneficios a nivel municipal segmentado por eficiencia tecnológica:	82
5. PROPUESTA DE MODELO DE GESTIÓN Y FINANCIAMIENTO PARA UN PROGRAMA DE RECAMBIO Y RENOVACIÓN DE AP EN CHILE.	84
5.1. Funcionamiento del mercado de alumbrado público en Chile, debilidades y barreras para el desarrollo de la EE.	84
5.1.1. Roles y atribuciones de autoridades públicas en materia de AP	84
5.1.2. Proceso de adquisición de AP, situación vigente:	86
5.1.3. Facultades legales de contratación de los Municipios en materia de AP.....	91
5.1.4. Disposición final de lámparas retiradas	92
5.1.5. Análisis de Barreras	93
5.2. Análisis tarifario.	95
5.2.1. Tarifas de distribución eléctrica	95
5.2.2. Tarifas predominantes en el sector municipal	103
5.2.3. Costos de Energía en los últimos 11 años.....	104
5.3. Modelos de Gestión para un Programa de Recambio Masivo de AP.....	106
5.4. Población objetivo para cada modelo.	121
5.4.1. Modelo ESCO.....	121
5.4.2 Modelo con financiamiento público	124
5.5. Mecanismos requeridos para su funcionamiento (a nivel de requerimiento, no de diseño específico: regulaciones, normativa, leyes, método de evaluación y priorización de inversiones, costo de la consultoría propuesta).	131
6. PLAN DE INVERSIONES DE UN PROGRAMA DE RECAMBIO DE AP	133
6.1. Primer paso	133
6.2. Segundo paso.....	133
7. INFORME TÉCNICO – ECONÓMICO PARA LA DETERMINACIÓN DE MEPS EN CHILE	137
7.1. Mercado actual y futuro de AP	137
7.2. Información relevante para establecimiento de MEPS	140
7.3. Tecnologías a aplicar MEPS	140
7.4. Definición del MEPS	141
7.5. Establecimiento del MEPS y su valor límite	143
7.6. Impacto por el establecimiento de MEPS	146
7.7. Análisis y recomendaciones análisis financiero	151

7.8.....	151
Análisis y recomendaciones marco para el establecimiento de MEPS	151
7. PROTOCOLO DE M&V&E.....	153

ACRONIMOS

AChEE: Agencia Chilena de Eficiencia Energética

AP: Alumbrado Público

AT: Alta Tensión

BT: Baja Tensión

CERs: Reducciones Certificadas de Emisiones de Gases de efecto Invernadero

EE: Eficiencia Energética

ESCO: Energy Service Company o Empresa de Servicios Energéticos

FNDR: Fondo Nacional de Desarrollo Regional

GEI: Gases Efecto Invernadero

GORE: Gobiernos Regionales

HM: Haluro Metálico

IRC: Índice de rendimiento del color

IPMVP: International Performance Measurement and Verification Professional, o Protocolo Internacional de medición y verificación profesional.

LED: Light Emitting Diode o Diodo emisor de luz

MAP: Mercurio Alta Presión

MDL: Mecanismo Desarrollo Limpio

MEPS: Minimum Energy Performance Standard, o Estándar mínimo de desempeño energético.

MW: Mega Watt

SEC: Superintendencia de Electricidad y Combustibles

SUBDERE: Subsecretaría de Desarrollo Regional, Ministerio del Interior

TIR: Tasa Interna de Retorno

TIRS: Tasa Interna de Retorno Social

VAN: Valor Actual Neto

VANS: Valor Actual Neto Social

VSBP: Vapor de Sodio de Baja Presión

VSAP: Vapor de Sodio de Alta Presión

RESUMEN EJECUTIVO

El presente informe corresponde al documento final de la consultoría **“APOYO A LA EFICIENCIA ENERGETICA EN EL SECTOR RESIDENCIAL Y MUNICIPAL - CONSULTORIA TECNICA – ALUMBRADO PÚBLICO - CT-CH-1128-SN1”**, encargado por el Banco Interamericano del Desarrollo y el Ministerio de Energía del Gobierno de Chile.

El objetivo de la consultoría, conforme las bases técnicas, es *“definir mecanismos de financiamiento para las inversiones para programas de recambio masivo de AP eficiente a nivel municipal con un modelo de gestión costo-efectivo y proponer con fundamentos técnicos y económicos, estándares mínimos lumínicos y energéticos que se deban requerir en proyectos de alumbrado público que permitan asegurar un uso eficiente de la energía en este tipo de proyectos.”*

El informe consta de 8 capítulos, contemplando las siguientes materias:

1. Catastro de alumbrado público (AP) en Chile
2. Análisis de opciones tecnológicas para AP.
3. Segmentación de Municipios en Chile.
4. Evaluación económica y social de un Programa de recambio total y parcial de AP.
5. Propuesta de modelo de gestión y financiamiento para un Programa de recambio y renovación de AP en Chile.
6. Plan de Inversiones de un Programa de recambio de AP
7. Informe técnico – económico para la determinación de MEPS en Chile
8. Protocolo de Medición, Verificación y Evaluación

Las principales conclusiones de cada capítulo se pueden sintetizar en las siguientes:

1. Catastro de alumbrado público (AP) en Chile

- El parque total de luminarias país al año 2005 sería del orden de un total de 2.419.240.- luminarias.
- Es posible agrupar a la totalidad de comunas de acuerdo al tipo de parque con que cuentan, siendo las del Grupo 1 las más eficientes y las del 5 las menos eficientes.
- Existe un alto porcentaje de tecnología VSAP en sus diferentes potencias, entre un 77% y un 89% del parque total entre los diferentes grupos de comunas que se realizaron de acuerdo a los Grupos 5 y 1. Las comunas con

mayor número de habitantes serían más eficientes en su parque de alumbrado público.

- Las comunas pertenecientes al Grupo 5 (menos de 9.999 habitantes, 50 comunas) tienen un indicador de lum/hab mayor a las demás, lo anterior es representativo de una menor densidad poblacional en comparación a comunas “grandes” que concentran su población en espacios territoriales menores.
- Las comunas pertenecientes al Grupo 1, sobre 200.000 habitantes, tienen un alto porcentaje de luminarias de tecnología VSAP (90%) en sus distintas potencias, observándose una predominancia a VSAP 70W (32%).
- Se evidencia que la tecnología de Mercurio predomina de forma relevante en el Grupo 5 de menor población, existe una oportunidad de recambio a tecnología más eficiente que asciende a cerca del 14% del parque de esas comunas.
- Finalmente, la cantidad total de puntos ineficientes corresponde a un total de 266.001 luminarias, el 10,99% del total del parque.

2. Análisis de opciones tecnológicas para AP.

En este capítulo se realizó un exhaustivo análisis de diferentes tecnologías de luminarias, sistemas de control de iluminación, componentes eléctricos y mecánicos. En especial, se hizo un análisis de las siguientes tecnologías, en relación a su descripción de funcionamiento, eficacia lumínica, vida útil y depreciación lumínica:

- Mercurio Alta Presión
- Mixta o Mezcla
- Vapor de Sodio de Baja Presión (VVSBP)
- Vapor de Sodio de Alta Presión (VSAP)
- Haluro Metálico
- LED
- Xenón

Junto con ello, se hizo un cuadro comparativo de las tecnologías y un análisis de ventajas y desventajas.

A modo de conclusión del capítulo, se establece que los factores más relevantes para decisión de compra son el precio y la eficacia lumínica, de acuerdo a los requerimientos de los municipios en sus licitaciones de alumbrado público, extraído desde el portal www.mercadopublico.cl para los dos últimos años

Considerando las distintas tecnologías, las tecnologías que mantienen una larga vida son LED con 50 mil horas, VSAP con 24 mil y MAP con la misma vida que VSAP; asumiendo de esta manera ser las luminarias más duraderas actualmente.

Ahora, quienes poseen una eficacia lumínica mayor son VSAP, HM, LED, VSBP, y Xenón, pero éste último no se encuentra en el mercado del país al ser una tecnología muy nueva y VSBP posee la mayor eficacia lumínica, pero la luz emitida por esta tecnología no permite discriminar de una manera correcta los colores, razón por la cual no es usualmente solicitada por los municipios.

Por ello, en función de las prestaciones actuales, las tecnologías VSAP, HM y LED se ajustan mayormente a los requerimientos con 125, 150 y 100 [Lm/W] de eficacia lumínica máxima respectivamente.

Asimismo, otro punto importante son los costos de las tecnologías más solicitadas en el último tiempo por los municipios, como lo son LED, con \$400.000 aproximadamente en promedio en todas sus potencias y VSAP del orden de los \$80.000 en las potencias de mayor uso (70 a 250W).

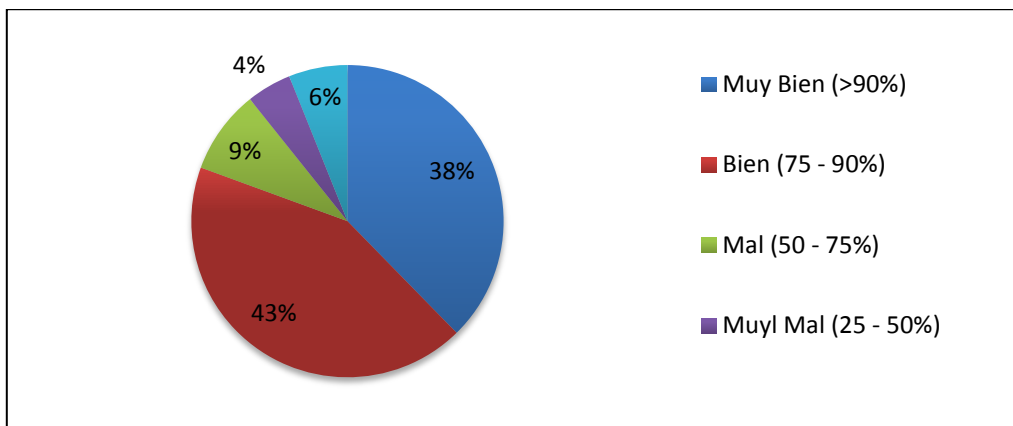
Por ello, a nuestro juicio las tecnologías más atractivas técnicamente serían VSAP y LED, cumpliendo con la mayoría de los requisitos técnicos demandados. Sin embargo existe una gran diferencia entre ellas en relación a los costos de la inversión inicial y de operación, en el primero de los casos el LED puede llegar a triplicar el valor del VSAP(en general), no obstante la primera disminuye los costos operacionales relacionados con el consumo energético y que traen un gran beneficio a quien realiza la inversión.

3. Segmentación de Municipios en Chile.

El capítulo recoge una clasificación realizada por Subdere en 2010, sobre “Tipología Comunal para la provisión de servicios municipales”, la que se basa en una metodología de Matriz Socio Espacial-Territorial-Socio Económica. Dicha clasificación no servía a los propósitos de la consultoría, por lo que se realizó una segmentación en base a las características del parque de luminarias de las diferentes comunas del país, agrupándolas en base al volumen de luminarias “eficientes” con las cuales cuenta cada uno. Por luminarias “eficientes”, se entenderá aquellas que poseen una eficacia lumínica sobre los 70 lúmenes por Watt.:

El resultado de esta clasificación se puede observar en el siguiente gráfico, el cual incluye las 345 comunas del país.

Gráfico: Porcentaje de comunas en cada categoría relación a la eficiencia de su parque de luminarias



Las conclusiones de esta segmentación cualitativa, arrojan resultados positivos en lo que respecta a la utilización de tecnologías con un grado de eficiencia aceptable en la realidad nacional, y que aún existe un 19% de las comunas cuyo parque de AP es, de acuerdo a la clasificación anterior, malo, muy malo o extremadamente malo, esto equivale a un 10,99% del parque de luminarias, específicamente a 266.001 puntos a nivel nacional.

4. Evaluación económica y social de un Programa de recambio total y parcial de AP y Plan de Inversiones propuesto.

Como resultados de los análisis efectuados en el capítulo, podemos destacar los siguientes aspectos:

- Como se señaló en el acápite relativo al catastro de AP, Chile cuenta con aproximadamente 2,42 millones de luminarias equivalentes a 373 MW, lo que totaliza el 2% de la potencia instalada bruta de todos los sistemas eléctricos en Chile. En términos de Gases Efecto Invernadero (GEI), equivale a emitir 626 mil toneladas de CO₂ equivalente al año a la atmósfera, con todos los efectos nocivos que estos produce.
- Si se tomara la decisión de realizar un recambio masivo por tecnología LED, el costo de inversión sería del orden de 2.000 millones de dólares, con beneficios de ahorros de energía a nivel de municipios globales de 130 millones de dólares anuales. Para un recambio por VSAP, los ahorros serían del orden de 8,6 millones de dólares anuales con una inversión asociada de 492 millones de dólares en el caso de recambio de luminaria completa y de 201 millones de dólares en el caso de recambio de lámparas y balastos.
- Dada la alta presencia de parque eficiente, la alternativa más rentable en términos privados hoy en día, es el recambio de las tecnologías “no eficientes”

(266.001 luminarias), por VSAP sin recambio de luminaria. Para lo anterior es fundamental tener un catastro detallado, el cual identifique las luminarias susceptibles a utilizar lámparas y balastos de VSAP. Este recambio, dado que posee rentabilidad privada, debería realizarse en base a un modelo ESCO. El total de la inversión requerida sería de unos \$8.275.696.894.-

- Contando ya con un parque 100% VSAP, sólo cabría la opción de mejora en base a recambio por tecnología LED. Con los precios actuales, ésta opción no es rentable en términos privados ni sociales. Ahora bien, en base al análisis de sensibilización presentado en la sección 5.1., una disminución de los costos de la tecnología LED en un 10%, permitiría rentabilizar, en términos sociales, el reemplazo del parque por ésta tecnología en las categorías 1, 4 y 5. Es en base a lo anterior que, a continuación se presenta el número de puntos e inversión necesaria para realizar dicho recambio.

Tabla: número de puntos e inversión para recambio con LED

Categoría	Nº de puntos Ineficientes	Inversión Recambio LED (reducción de costos en 10%)
1	1.531.876	\$637.797.146.729
4	30.885	\$12.752.988.903
5	4.833	\$1.925.351.711
Total	1.567.594	\$652.475.487.343

El número de puntos a reemplazar con una disminución de un 10% del costo de la tecnología, es equivalente al 65% del parque nacional.

- Por otro lado, con una disminución de un 25% del costo de la tecnología LED, las restantes categorías se rentabilizan en términos sociales. A continuación se presenta tabla con número de puntos e inversión asociada.

5. Propuesta de modelo de gestión y financiamiento para un Programa de recambio y renovación de AP en Chile.

El capítulo parte examinando la situación vigente en materia de AP en Chile, concluyendo con un análisis de barreras para el desarrollo de un parque de AP más “energéticamente eficiente”, las cuales se agruparon de la siguiente manera:

- a) Causas asociadas a asimetría de Información
 - i. Municipios no cuentan en general con expertos técnicos permanentemente actualizados.

- ii. Gobiernos Regionales (Gore) no cuentan con expertos técnicos permanentemente actualizados.
 - iii. No existe catastro georeferenciado actualizado en la mayoría de los casos.
 - iv. No existe auditoría que arroje un proyecto de recambio técnico y económico costo eficiente.
 - v. Las bases de licitación no cuentan en general con estándares técnicos, lo que genera en ocasiones “amarres” tecnológicos.
 - vi. El análisis de las ofertas se realiza con equipos técnicos que no siempre tienen el conocimiento para identificar diferencias en las mismas.
- b) Causas asociadas a problemas normativos
- i. La normativa relativa a AP está desactualizada (ver capítulo correspondiente) frente al salto tecnológico de los últimos años.
- c) Causas asociadas a falta de modelos y protocolos
- i. No existen modelos de licitaciones y contractuales generales validados por instancia técnica.
 - ii. No existen protocolos para catastro y georeferenciamiento.
 - iii. No se difunden ni utilizan los protocolos para M&V.
- d) Causas asociadas a problemas de financiamiento
- i. El Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR) ha destinado para todo el país, en promedio, los dos últimos años, unos \$20.000 MM para proyectos de recambio de AP, cifra insuficiente para un recambio masivo.
 - ii. En la asignación de los recursos del FNDR no se considera la EE entre los criterios de priorización.
 - iii. Financiamiento privado es incipiente y no cuenta con modelos robustos y validados.
 - iv. Financiamiento privado, en teoría, no puede alcanzar a todos los Municipios dada la inexistencia de un sistema de garantía.

En base a dicho análisis, se realizó un valoración de fortalezas y debilidades de distintas alternativas de solución, llegándose a una propuesta para superar las barreras mencionadas.

En el caso de las barreras de (a) asimetría de información, (b) actualización normativa y (c) falta de modelos validados, se propone la generación de un mecanismo de

asesoría centralizado y único a nivel nacional, a cargo de la Agencia Chilena de EE o el Ministerio de Energía, el que debe estar a cargo de todas las etapas que implican el proceso de recambio de AP.

En el caso de la barrera de (d) financiamiento, se proponen dos mecanismos:

- i) Modelo ESCO (financiamiento privado), introduciendo una modificación sustancial al proceso ya que se transformaría de una licitación tecnológica, a la oferta de un “servicio de AP”, que involucra la gestión y el mantenimiento. Dado los análisis realizados en el capítulo 5, como de la dificultad que este mecanismo pueda ser implementado en el 100% de los Municipios, también se propone un segundo mecanismo de financiamiento;
- ii) Fondos públicos a través de un Programa de recambio administrado por la Subsecretaría de Desarrollo Regional (Subdere), el cual puede contemplar aportes reembolsables y a fondo perdido.

6. Plan de Inversiones de un Programa de recambio de AP

Señalado en capítulo 4

7. Informe técnico – económico para la determinación de MEPS en Chile

Desde una perspectiva financiera, las principales conclusiones que arroja el capítulo son:

- Bajo las condiciones actuales, escenario base de compras año 2012 y precio de mercado año 2013 tecnologías de AP y energía, no es recomendable avanzar a la opción de MEPS analizada, sin embargo se recomienda realizar una nueva sensibilización cada año para evaluar la conveniencia de su aplicación.
- Se evidencia una alta sensibilidad al precio de la tecnología, en la medida que el precio de una luminaria LED 55W se acerca a los \$150.000 el establecimiento de MEPS bajo estas condiciones es rentable en el escenario 65 EFLum (desplazamiento de luminarias de 70W y 100W VSAP hacia LED 55W).
- Respecto de la energía, fijas las condiciones de precio de luminarias, aún no comenzaría a ser rentable la incorporación de MEPS sobre un precio superior a 200 \$/kWh (considerado muy poco probable).
- Un escenario combinado de precio de energía de \$150/kWh y un precio promedio de luminaria LED de \$210.000/Luminaria sería propicio para una incorporación de MEPS para recambio de luminarias de 100 y 70 W por tecnología LED 55W (65 EFLum).

8. Protocolo de Medición, Verificación y Evaluación

El último capítulo propone emplear el protocolo más utilizado y conocido a nivel mundial, y principalmente el que ha sido impulsado en Chile por la Agencia Chilena de Eficiencia Energética, correspondiente a “International Performance Measurement and Verification Profesional” (IPMVP), el cual es operado por la Evaluation Validation Organization (EVO World).

Para los proyectos de recambio masivo de Alumbrado Público, se recomienda el uso de dos opciones que propone el IPMVP, en función de las características del sistema de AP que se deberá medir.

1. CATASTRO DE ALUMBRADO PÚBLICO EN CHILE

La única fuente relativa a la cantidad y tipo de tecnologías existente a nivel país es el catastro realizado por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) en el año 2005. En dicho catastro fue levantada información acerca de la cantidad de luminarias y su tipo de alrededor del 62% de las comunas a nivel nacional, el restante 38% no respondió a la consulta. Para los análisis que requiere el desarrollo de esta consultoría, la información contenida en este catastro fue considerada de “base”, para proyectarla a la totalidad de las comunas del país.

Bajo este escenario se decidió analizar la mejor forma de contar con el total de la información requerida, considerándose las siguientes opciones:

- a) Proyección del catastro en base a información de mercado público: Esta metodología consistía en actualizar la información del catastro 2005 con la información de licitaciones contenidas en los últimos años en el portal www.mercadopublico.cl , actualizando la información de los municipios que habían realizado licitaciones para proyectos de recambio y de nuevas instalaciones. Esta metodología fue desechada ya que no permitía completar la información de todas las comunas faltantes, dado que no todas las comunas actualizaron o aumentaron su parque.
- b) Actualización catastro en base a censo poblacional 2002 vs 2012: Se analizó proyectar la cantidad de luminarias (por cantidad en primera instancia) basándose en el indicador por comuna luminaria/habitantes del año 2005 (base poblacional 2002) y proyectarlo al año de estudio 2013, en función esta vez de la población a ese año. Al no contar con información censo 2012 se utilizó información de proyección INE (link del documento, http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/familias/demograficas_vitales.php) y se estimó la población en primera instancia para luego estimar las luminarias totales por comuna. Finalmente no se validó esta opción ya que no se dieron resultados “lógicos”, se evidenció comunas que crecen hasta un 60 % y otras decrecen hasta un 70 % aproximadamente solo en tres años.
- c) Completar el catastro 2005 tomando como información de base el mismo catastro y la población al censo 2002: Esta resultó ser la metodología utilizada, ya que finalmente resulta ser la que entrega los valores más confiables en función de los indicadores a nivel mundial conocidos y tendrían la consistencia en función de los tamaños de las comunas y su cantidad de luminarias.

1.1. Metodología: Estimación de Catastro 2005 (completo)

Esta metodología consistió en dos etapas, la primera es la modificación del catastro 2005 en base a información entregada por el Ministerio de Energía y la segunda etapa es la estimación del 100% del catastro en base al censo 2002.

1ra Etapa: Catastro Modificado

Con los datos entregados por el Ministerio de Energía a 6 comunas de la región de Valparaíso (Juan Fernández, La Calera, Putaendo, Valparaíso, Villa Alemana, Viña del Mar), que mostraban solo el total de luminarias sin especificar el tipo, se pudo realizar una modificación proporcional de los datos en ellas, en las cantidades de luminarias por cada tipo.

Ejemplo: Si en el Catastro SEC 2005 la comuna "X" poseía 200 luminarias en total, y tenía 150 tipo "A" y 50 tipo "B" y la información del Ministerio señalaba que esa comuna arrojaba un total de 400 significaba que estaban en razón de 1:2 por lo tanto la luminaria tanto tipo "A", como tipo "B" se duplicaban en número.

2da Etapa: Catastro Estimado

El principal objetivo de esta etapa es completar la base de datos de luminarias realizado por la SEC en 2005, a través de estimaciones por segmentación de comunas.

Tomando como datos fijos el "Catastro SEC 2005 modificado" y el "Censo 2002" se procede a realizar lo siguiente:

1. Segmentación de Comunas por número de habitantes.

Solo las comunas catastradas se dividieron, por tamaño de población, en cinco grupos enumerados del 1 al 5, ya que presentaban un factor de Luminaria por habitantes muy similar; el rango de habitantes y número de comunas en cada grupo se muestra en la siguiente tabla:

Tabla: Segmentación por cantidad de habitantes

Grupo	Rango [Habitantes]	Numero Comunas
Grupo 1	más de 200.000	16
Grupo 2	entre 100.000 y 199.999	26
Grupo 3	entre 50.000 y 99.999	27
Grupo 4	entre 10.000 y 49.999	95
Grupo 5	menor a 9.999	50

Con la segmentación realizada, solamente el Grupo 1 se encontraba completo, es decir, con sus comunas correspondientes todas catastradas, en contraste con los otros grupos que mantenían un porcentaje alto de comunas sin datos. Por esta razón, se realizó un **promedio de Luminaria por Habitante (Lum/Hab) total** en cada grupo sin discriminar tipo de luminaria, para que operase como base de trabajo (el promedio es la suma total de las luminarias del grupo, dividido por la suma de los habitantes de las comunas dentro del grupo).

2. Luego, en cada grupo se calculó **el promedio de cada tipo de luminaria (información desde el catastro 2005)**, con el propósito de generar una “comuna tipo” por cada grupo. A esta “comuna tipo” se le sumaron todos los promedios obtenidos por cada tipo de luminaria, de tal manera de tener un “total” de luminarias y generar una “fracción” y “porcentaje” por tipo.
3. **Factor específico (FE):** con el producto del **promedio de Lum/Hab total** por cada grupo y el **promedio de luminaria por tipo**, encontramos el factor específico el cual multiplicaremos al número de habitantes de cada comuna SIN CATASTRO, dependiendo en que Grupo se encuentre.

Ejemplo:

*El Grupo 2 entrega una tabla (de izquierda a derecha) con el tipo de luminaria (en este ejemplo no se encuentran todos los tipos de luminaria), el promedio de luminaria por tipo, la fracción, la fracción porcentual y el factor específico que resulta de multiplicar Promedio Lum/Hab con el **PORCENTAJE**:*

Tabla: Ejemplo de proporciones y factores resultantes

PROMEDIO	LUMINARIA	FRACCIÓN	PORCENTAJE	FACTOR ESPECÍFICO
Mixta160	152	0,007	0,7%	0,1077%
Halógena0	12	0,001	0,1%	0,0088%
Mercurio125	1.399	0,064	6,4%	0,9918%
Mercurio250	103	0,005	0,5%	0,0733%
Mercurio400	22	0,001	0,1%	0,0154%

Promedio Lum/Hab	0,15481295
------------------	-------------------

*Luego, con el factor específico de cada tipo de luminaria se multiplica por el número de habitantes de la comuna que queramos obtener, en este caso Algarrobo, y se ingresa a la columna de **CANTIDAD** de luminarias como lo muestran las dos siguientes tablas.*

Tabla: Ejemplo de aplicación Algarrobo

COMUNA	TOTAL HAB.	CANTIDAD	Tipo de Luminaria
Algarrobo	8.601	FE-Mixta160*8.601	Mixta160
Algarrobo	8.601	FE-Halógena0*8601	Halógena0
Algarrobo	8.601	FE-Mercurio125*8601	Mercurio125
Algarrobo	8.601	FE-Mercurio250*8601	Mercurio250
Algarrobo	8.601	FE*Mercurio400*8601	Mercurio400

El resultado es:

Tabla: Ejemplo de aplicación Algarrobo - Resultado

COMUNA	TOTAL HAB.	CANTIDAD	Tipo de Luminaria
Algarrobo	8.601	76	Mixta160
Algarrobo	8.601	17	Halógena0
Algarrobo	8.601	316	Mercurio125
Algarrobo	8.601	3	Mercurio250
Algarrobo	8.601	2	Mercurio400

- Finalmente se completa el 38% de las comunas sin información, para cada tipo de tecnología se cuenta con catastro al año 2005 con el 100% de las comunas “catastradas”.

Sobre la segmentación aplicada solamente para efectos de estimación del catastro se obtiene el siguiente indicador de N° Luminarias/N° Habitantes para las comunas asociadas por grupo.

Tabla: Luminarias por habitante por grupo

Grupo	Lum/Hab
1	0,157
2	0,154
3	0,177
4	0,140
5	0,272

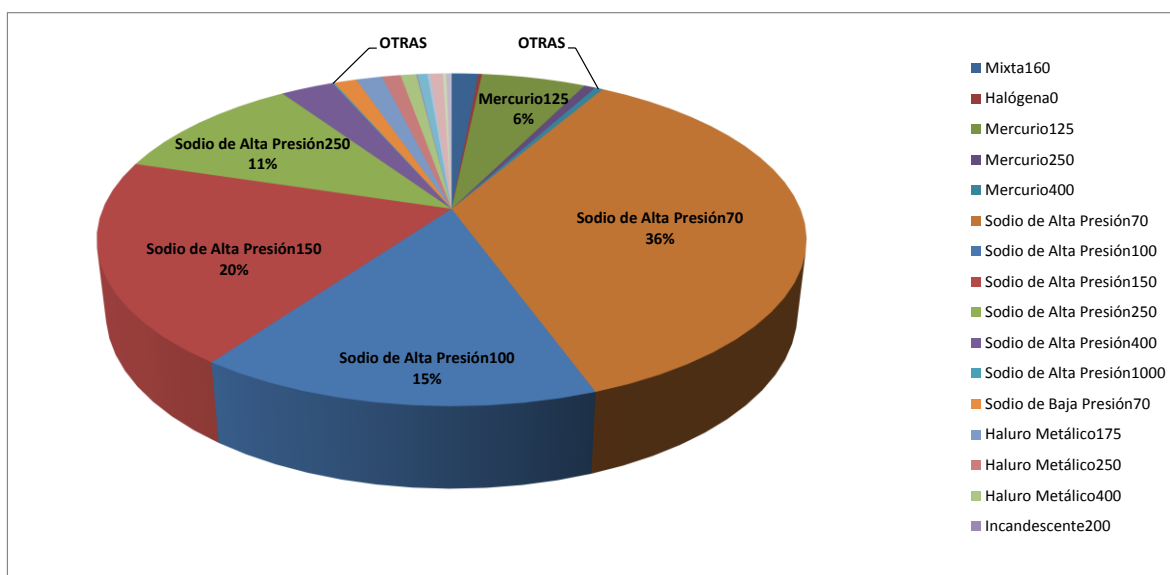
1.2. Catastro Completo Estimado Año 2005

Aplicando la metodología descrita se pudo obtener/completar el Catastro SEC 2005 para las 345 comunas del país y todos los tipos de tecnologías.

Cabe señalar que el total de luminarias declaradas en el año 2005 ascendía a la suma de **2.000.416.- luminarias**, correspondientes al 62% de los municipios que completaron la información.

Con la metodología señalada previamente, aplicada a las comunas que no contaban con información, la cantidad total de luminarias ascendió a **2.419.240.-** a nivel país. En anexo se presenta en planilla de datos el nuevo catastro realizado.

A continuación se muestra la distribución por tecnología resultante del total país y sus principales proporciones:

Gráfica: Proporción principales tecnologías catastro final estimado**Tabla: Proporción de tecnologías catastro final estimado**

Tipo de luminaria	Cantidad	%
Mixta160	35.222	1,46%
Halógena0	4.604	0,19%
Mercurio125	137.835	5,70%
Mercurio250	14.768	0,61%
Mercurio400	10.455	0,43%
Sodio de Alta Presión70	872.852	36,08%
Sodio de Alta Presión100	374.204	15,47%
Sodio de Alta Presión150	479.516	19,82%
Sodio de Alta Presión250	260.895	10,78%
Sodio de Alta Presión400	70.494	2,91%
Sodio de Alta Presión1000	2.240	0,09%
Sodio de Baja Presión70	29.903	1,24%
Haluro Metálico175	34.432	1,42%
Haluro Metálico250	24.708	1,02%
Haluro Metálico400	20.606	0,85%
Incandescente200	1.311	0,05%
Haluro Metálico150	13.292	0,55%
Sodio de Baja Presión1000	36	0,00%
Sodio de Baja Presión100	3.850	0,16%
Sodio de Baja Presión150	16.433	0,68%
Incandescente100	4.554	0,19%
Sodio de Baja Presión250	5.826	0,24%
Sodio de Baja Presión400	1.204	0,05%

1.3. Conclusiones Catastro Estimado

- El parque total de luminarias país al año 2005 bajo la nueva estimación crece en más de un 20%, de **2.000.416 de luminarias a un total de 2.419.240**

- El Grupo 1 de comunas declaró íntegramente su parque de luminarias en el catastro original 2005, no fue necesario aplicar la metodología de estimación a ninguna comuna de este grupo.
- Existe un alto porcentaje de tecnología VSAP en sus diferentes potencias, entre un 77% y un 89% del parque total respectivamente entre los Grupos 5 y 1, indicando que las comunas con mayor número de habitantes serían más eficientes en su parque de alumbrado público (considerando esta tecnología como tal).
- Las comunas pertenecientes al Grupo 5 (menos de 9.999 habitantes, 50 comunas) tienen un indicador de lum/hab mayor a las demás, lo anterior es representativo de una menor densidad poblacional en comparación a comunas “grandes” que concentran su población en espacios territoriales menores.
- Las comunas pertenecientes al Grupo 1, sobre 200.000 habitantes, tienen un alto porcentaje de luminarias de tecnología VSAP (90%) en sus distintas potencias, observándose una predominancia a VSAP 70W (32%).
- Se evidencia que la tecnología de Mercurio predomina de forma relevante en el Grupo 5 de menor población, existe una oportunidad de recambio a tecnología más eficiente que asciende a cerca del 14% del parque de esas comunas, en cuanto al total país la oportunidad de recambio por esta tecnología asciende al 6% del total del parque.
- Finalmente, la cantidad total de puntos ineficientes corresponde a un total de 266.001 luminarias, el 10,99% del total del parque.

2. OPCIONES TECNOLOGICAS PARA AP

La siguiente información se ha obtenido en base a recopilación desde la iniciativa AP Eficiente llevada a cabo el año 2010 por el Programa País de Eficiencia Energética (www.apeficiente.cl) e información certificada de proveedores.

2.1 Definiciones

- a) **Flujo luminoso:** El flujo luminoso (Φ) es la potencia emitida en forma de radiación luminosa a la que el ojo humano es sensible. Es la cantidad de luz que emite una fuente luminosa por unidad de tiempo. La unidad de flujo luminoso es el lumen (lm). La ecuación para el cálculo del Flujo Luminoso se muestra en la Ecuación flujo luminoso.

$$\Phi = \frac{Q}{t}$$

Ecuación. Flujo luminoso.

Dónde:

- Φ : Flujo luminoso en lúmenes (lm).
 - Q: Cantidad de luz emitida por una fuente de luz (lm x seg.).
 - t: Unidad de tiempo (seg.).
- b) **Eficacia luminosa:** Relación entre el flujo total emitido por la fuente y el suministro total de potencia de la fuente en lúmenes por watt (Lm/W).

Una eficacia luminosa elevada disminuye a la vez los costos de instalación y los gastos por consumo energético.

- c) **Vida útil:** La vida útil de una lámpara es su vida económica. Esto corresponde al momento en el cual el flujo luminoso de la lámpara ha descendido a un valor tal, para el cual la fuente de luz ya no es rentable, aunque esté en condiciones de seguir funcionando. En la vida de una lámpara influyen los siguientes aspectos.

Factores internos:

- Degradación de electrodos por agotamiento del material.
- Cambio en la composición del gas de relleno.
- Fuga en el tubo de descarga.

Factores externos:

- Desviaciones en la tensión de red.

- Frecuencia en las conexiones.
- Clases de equipos de control.
- Temperatura ambiente.
- Posición de trabajo.
- Choques mecánicos o vibraciones.

d) **Depreciación del flujo luminoso:** Representa la disminución del flujo luminoso (lúmenes) a través del tiempo desde el momento de instalación de la lámpara. La depreciación del flujo se representa a través de la curva de depreciación del flujo luminoso. Se considera que una lámpara pierde sus características eficientes en el momento en el cual el flujo luminoso es inferior al 70% del flujo luminoso inicial.

Entre las causas que pueden producir una disminución del flujo luminoso de una lámpara se puede mencionar.

- Ennegrecimiento de las paredes del tubo de descarga.
- Agotamiento de los polvos fluorescente al interior de la lámpara.

e) **Temperatura del color (T_c):** La temperatura de color es una expresión que se utiliza para indicar el color de una fuente de luz por comparación de ésta con el color del cuerpo negro. Como cualquier otro cuerpo incandescente, un cuerpo negro cambia de color a medida que aumenta su temperatura, adquiriendo al principio, el tono de un rojo sin brillo, para luego alcanzar el rojo claro, el naranja, el amarillo y finalmente el blanco, el blanco azulado y el azul.

Por lo tanto, la temperatura del color no es en realidad una medida de temperatura, define sólo color y sólo puede ser aplicada a fuentes de luz que tengan una gran semejanza de color con el cuerpo negro. La equivalencia práctica entre apariencia del color y temperatura del color, se establece convencionalmente según lo mostrado en la siguiente tabla:

Tabla: Apariencia de la fuente de luz según temperatura del color.

Apariencia de Color	Temperatura de color (K)
Cálida	Menor a 3.300
Intermedia	Entre 3.300 a 5.300
Fria	Mayor a 5.300

- f) **Índice de rendimiento del color (IRC):** El índice de reproducción cromática (IRC), caracteriza la capacidad de reproducción cromática de los objetos iluminados con una fuente de luz. El IRC ofrece una indicación de la capacidad de la fuente de la luz para reproducir colores normalizados, en comparación con la reproducción proporcionada por una luz patrón de referencia.

La siguiente tabla muestra los índices de rendimiento del color de algunas de las fuentes de luz más tradicionales.

Tabla: IRC de fuentes luminosas más comunes.

Fuentes Luminosas	T _c (K)	IRC
Cielo azul	10.000 a 30.000	85 a 100
Cielo nublado	7.000	85 a 100
Luz Solar día	6.000	85 a 100
Lámpara de descarga (excepto Sodio)	6.000	96 a 100
Luz día (Haluros)	6.000	96 a 100
Blanco neutral	3.000 a 5.000	70 a 84
Blanco cálido	menos de 3.000	40 a 69
Lámpara de descarga (Sodio)	2.900	Menos de 40
Lámpara Incandescente	2.100 a 3.200	85 a 100
Lámpara fotográfica	3.400	85 a 100
Llama de vela	1.800	40 69

2.2. Análisis de Tecnologías

A continuación se analizan las opciones tecnológicas comúnmente disponibles para uso en alumbrado público de vías de tránsito vehicular.

2.2.1. Lámparas:

a) Mercurio Alta Presión (MAP)

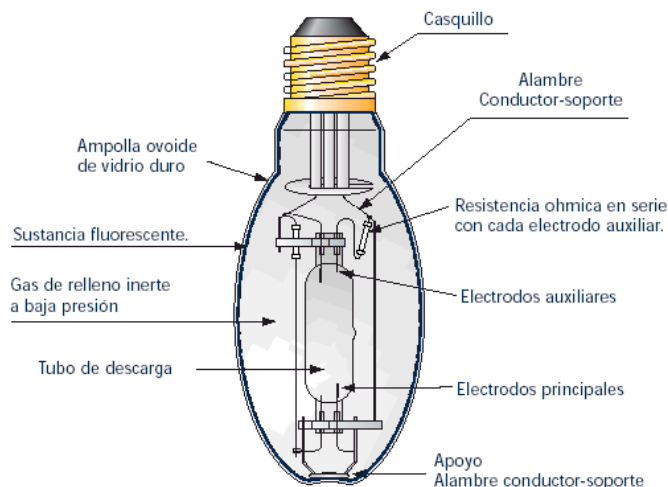


Figura: Descripción de una Lámpara MAP

Descripción: Construida de dos envolturas; el tubo de descarga (envoltura interior) el cual contiene gases de argón y de mercurio. El arco inicial se establece por ionización del argón. Luego el calor generado vaporiza el mercurio que se encuentra en estado líquido en el tubo de descarga. La envoltura exterior protege el tubo de descarga de corrientes de aire y cambios de temperatura además de contener un gas inerte para evitar la oxidación interna de ésta y aumentar la tensión de ruptura a través del bulbo.

Eficacia Luminosa: los valores típicos pueden variar entre los 54 y 60 Lm/W. No así en el alumbrado público mostrando su mínima para lámparas de menor potencia (50W) una eficacia de 36 Lm/W.

Vida Útil: En una lámpara de mercurio de alta presión la vida útil dependerá totalmente de la potencia de ella. En potencias del rango de 50 a 400 W la vida en será de 16.000 horas y las de un rango de 700 a 1.000 W su mortandad es en 12.000 horas.

Depreciación Luminosa: se asume que la lámpara deja de ser eficiente al disminuir su flujo luminoso al 80% del inicial; en el caso de la lámpara de mercurio a vapor se deprecia a las 4.000 horas de funcionamiento para las de rango de potencia menor y 3000 horas para las de alta potencia.

b) Luz Mixta o Mezcla

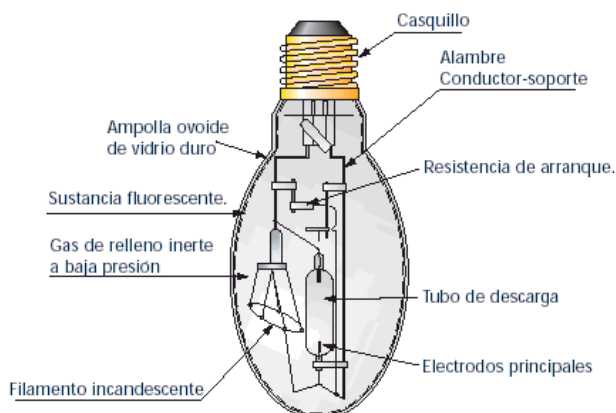


Figura: Descripción de la Lámpara Luz Mixta o Mezcla

Descripción: combina la tecnología de lámparas MAP y la iluminación incandescente. Esta lámpara posee un balasto incorporado en forma de filamento de tungsteno conectado en serie con el tubo de descarga. La luz de descarga del mercurio y la del filamento se mezclan para lograr una lámpara con características operativas distintas a las de mercurio puro.

Eficacia Luminosa: los valores típicos pueden variar entre los 20 y 28 Lm/W dependiendo de la potencia de la lámpara.

Vida Útil: La vida útil está entre las 8.000 y 10.000 horas.

Depreciación Luminosa: La depreciación es notoria en dos casos, el primero es el ennegrecimiento de la ampolleta por culpa del wolframio evaporado y el segundo por la pérdida de eficacia de los polvos fosforescentes. La depreciación de la lámpara dependerá de su rango de potencia; en rangos de 100 a 250 W la reducción del flujo luminoso será entre las 8.000 y 10.000 horas.

c) Sodio de Baja Presión (VSBP)

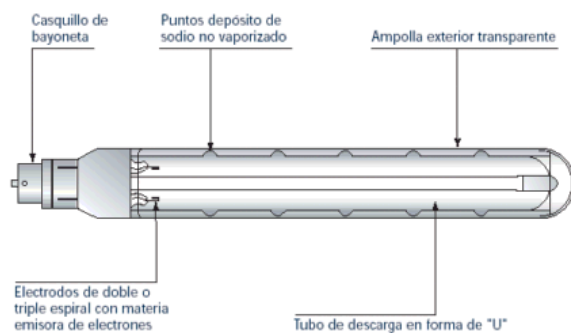


Figura: Descripción de Lámpara VSBP

Descripción: Convierte la radiación ultravioleta producida por la descarga de sodio en radiación visible, utilizando un polvo fluorescente en la superficie interna. Produce una luz color amarilla por su característica monocromática (característica del vapor de sodio). Estas lámpara requieren de tensiones más elevadas para encender y es requerido un equipo auxiliar (autotransformador de dispersión) para su funcionamiento.

Eficacia Luminosa: Su eficacia se encuentra entre los 100 y 200 Lm/W dependiendo de la potencia de la lámpara.

Vida Útil: Al poseer un índice de fallo bajo la lámpara VSBP puede tener una vida útil de hasta los 22.000 horas.

Depreciación Luminosa: Estas lámparas comienzan a descender su flujo luminoso cerca de las 20.000 horas

d) Vapor de Sodio Alta Presión (VSAP)

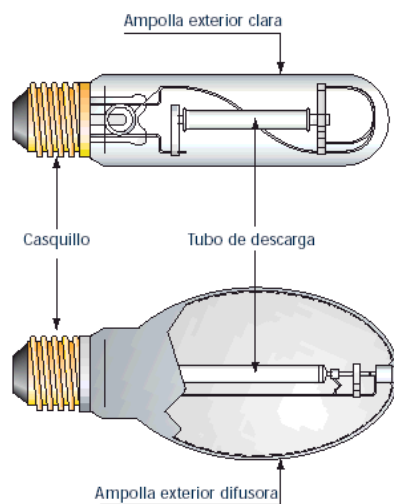


Figura: Descripción Lámpara VSAP

Descripción: El foco de vapor de sodio está compuesto de un tubo de descarga de cerámica translúcida, esto con el fin de soportar la alta corrosión del sodio y las altas temperaturas que se generan; en los extremos tiene dos electrodos que suministran la tensión eléctrica necesaria para que el vapor de sodio encienda. Para operar estas lámparas se requiere de un balasto y uno o dos condensadores para el arranque.

Para su encendido requiere alrededor de 9-10 minutos y para el reencendido de 4-5 minutos.

Eficacia Luminosa: el rango de su eficacia se encuentra entre los 80 y 130 Lm/W, dependiendo de la potencia de la lámpara.

Vida Útil: La vida útil para estas lámparas es de aproximadamente 30.000 horas dependiendo de su diseño. Sin embargo este valor está limitado por el aumento en la tensión, aunque lento, que ocurre durante su vida. Este aumento es principalmente debido al ennegrecimiento de los extremos del tubo de arco debido a la dispersión del material emisor del electrodo. La parte ennegrecida absorbe radiación, la cual calienta los extremos del tubo de arco y vaporiza las mezclas de sodio adicional. Esto incrementa la presión en el tubo de arco y consecuentemente la tensión del arco. La difusión de sodio a través de los extremos sellados de tubo de arco y la combinación de sodio contenido en el arco con impurezas del tubo limitan también la vida de estas lámparas.

Depreciación Luminosa: se comienza a notar la depreciación a las 20.000 horas de funcionamiento.

e) Haluro Metálico (HM)

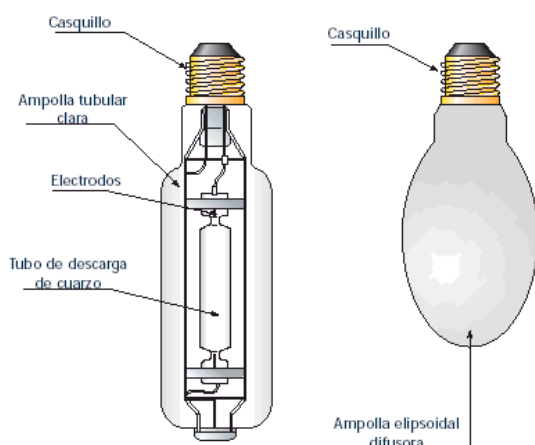


Figura: Descripción de Lámpara HM

Descripción: La luz es generada a través de la mezcla de gases. El tubo de descarga donde se forma el arco contiene una mezcla de argón mercurio y una variedad de haluros metálicos. La mezcla de estos últimos afecta la naturaleza de la luz producida, variando correlacionadamente la T_c y su intensidad.

Como las lámparas de VSAP y VSBP, las de haluro metálico necesitan de un equipo auxiliar para proporcionar el voltaje apropiado para realizar el encendido y la regulación de la electricidad para mantener la lámpara en funcionamiento.

Eficacia Luminosa: La eficiencia luminosa en las lámparas de haluros metálicos se encuentra aproximadamente entre los 80 Lm/W y los 90 Lm/W. Mientras mayor sea la potencia mejor es la eficiencia luminosa de la lámpara.

Vida Útil: 10.000 horas debido a que presentan altas temperaturas en los electrodos, esto genera que los óxidos que los recubren se evaporicen rápidamente.

Depreciación Luminosa: su depreciación luminosa es de 5.000 horas.

f) LED



Figura: Luminaria LED

Descripción: El Diodo emisor de luz con sigla en inglés LED (Light Emitting Diode) está compuesto por la superposición de varias capas de material semiconductor que emite luz en una o más longitudes de onda (colores) cuando se polariza correctamente.

Eléctricamente hablando el diodo es un dispositivo que permite la circulación de la corriente eléctrica a través de él en un solo sentido.

La tecnología LED ha alcanzado un alto nivel de desarrollo, con los LEDs de última generación que cubren muchos aspectos que anteriormente no lo hacían (altas temperaturas de color, contribución de emisión luminosa de todo el espectro visible y elevadas intensidades y posibilidad de agrupación e incorporación de elementos ópticos que permiten regular, direccionar y apantallar la iluminación según convenga para cada aplicación)

Eficacia luminosa: La eficacia luminosa de la lámpara LED se encuentra entre los 40 y 100 Lm/W.

Vida útil: La vida útil de los LEDs en un sistema de alumbrado público es de aproximadamente 35.000 y 50.000 horas

Depreciación Luminosa: en condiciones nominales de funcionamiento en una luminaria LED es superior a las 20.000 horas.

g) XENÓN



Figura: Lámpara Xenón

Descripción: Tecnología HID Xenón (descarga de alta intensidad o de alta potencia, en inglés High Intensive Discharge). La potencia generada por el xenón está sobre el común de las lámparas de descargas (tales como la lámpara de haluro de metal), de modo que se expandirá el rango de temperatura de color y aumentará el IRC. Estas lámparas irradian casi el mismo espectro que el sol y produce un mayor efecto de la luz que la de otras fuentes de luz. Las lámparas HID de Xenón pueden reemplazar a las de vapor de VSAP sin cambiar el equipo auxiliar (balasto, carcasa).

T_c : 2000-12000K

Eficacia Luminosa: entre los 90 y 149Lm/W

IRC: >75

Flujo Luminoso: 4400Lm

Vida útil: 12000 horas.

Depreciación lumínica: No disponible desde proveedor analizado único(link del documento, <http://www.tonxenlights.com/Street Light Bulb 736201>).

2.3. Sistemas de control de iluminación

- a) **Interruptor crepuscular:** dispositivo electrónico capaz de conmutar un circuito en función de la luminosidad ambiente. El funcionamiento de este es a través de una celda fotoeléctrica sensible a la luz, que detecta la cantidad de luz natural que existe en el lugar de a instalación, previamente comparándolo con el valor ajustado. Para un buen funcionamiento se requiere que incorporen un retardo antes de las maniobras que posibilite eliminar fallos de encendidos o apagados debido a fenómenos meteorológicos o luces provenientes de otras fuentes (autos por ejemplo).
- b) **Interruptor Astronómico:** interruptores electrónicos que incorporan un programa que se basa en seguir los horarios ortos y ocaso de la zona geográfica donde se ha instalado. Las fechas de cambio automático verano/invierno se programan en la memoria del dispositivo.
- c) **Sistemas de regulación de Nivel Luminoso:** Basado en un solo principio que es reducir la potencia del alumbrado durante periodos de ahorro disminuyendo el flujo luminoso y de esta manera generar ahorro energético.
- d) **Balasto electrónico:** El balasto electrónico es un dispositivo que realiza las funciones del Equipo Auxiliar y, por tanto, sustituye al balasto electromagnético, condensador y arrancador (en las lámparas de sodio a alta presión). Lleva incorporado los elementos necesarios para efectuar de forma autónoma y automática y, en consecuencia, sin necesidad de una línea auxiliar de mando, la reducción del flujo luminoso de la lámpara y la potencia en determinados períodos de funcionamiento del alumbrado (potencia reducida o segundo nivel), con el consiguiente ahorro energético.

El balasto electrónico estabiliza la potencia en lámpara y, consecuentemente, el consumo en red tanto en funcionamiento a régimen reducido como a máxima potencia lo que mantiene la vida media de la lámpara.

En todas las condiciones de funcionamiento (máxima potencia y nivel reducido), las pérdidas propias del balasto electrónico no superan el 4 ó 5% de la potencia eléctrica consumida en lámpara.

Frente a los reguladores estabilizadores de voltaje, los balastos electrónicos presentan, además de menores pérdidas propias por consumo del Equipo Auxiliar, cierta ventaja en el mantenimiento de la vida útil de las lámparas al no influir negativamente sobre la misma. En cambio, respecto a estos mismos dispositivos en instalaciones de alumbrado existentes, la instalación de balastos electrónicos tiene la desventaja de que precisan una intervención

punto a punto de luz, lo que implica un costo económico a considerar, además de resultar, más sensibles a las condiciones meteorológicas.

- e) Balasto de doble nivel de potencia:** De manera cronológica son los primeros en comercializarse y son utilizados para regular el flujo luminoso de las lámparas de sodio de alta presión y de vapor de mercurio. Los balastos de doble nivel, son balastos de tipo inductivo de construcción semejante a los modelos estándar, pero a los que se ha añadido un bobinado adicional sobre un mismo núcleo magnético, de manera que pueda obtenerse la impedancia nominal para la potencia nominal de lámpara (primer nivel), y por conmutación a la conexión del bobinado adicional, una impedancia superior que da lugar a la potencia reducida en lámpara (segundo nivel).

En las instalaciones de AP existentes, la instalación de los balastos de doble nivel de potencia con o sin línea de mando (temporizador) requiere una intervención punto a punto de luz, lo que supone un costo económico a considerar.

- f) Reguladores estabilizadores de voltaje:** reducen la tensión de alimentación a los equipos (balasto y lámpara en este caso) obteniendo una baja de potencia considerable. Son equipos electrónicos estáticos que actúan sobre cada una de las fases de la red tratando de estabilizar la tensión de cada una de ellas con respecto al neutro común en el circuito de salida y disminuir el nivel de la tensión señalada a través de alguna orden señalada, para que al fin se produzca una reducción de flujo luminoso de la lámpara y lograr de esta forma un ahorro energético.

Los estabilizadores de tensión reducen en más de un 20% la tensión nominal (220 volts) para las lámparas de sodio de alta presión y en un 16% aproximadamente las de vapor de mercurio de alta presión.

La instalación de este aparato se realiza en la cabecera de línea, es decir en el mismo tablero de tensión o en un armario independiente cerca de éste; con esto se evita excesos de consumo en las luminarias y prolongación de vida de las lámparas (solo si va unido a un reductor de flujo luminoso).

2.4. Componentes Eléctricos y Mecánicos de las luminarias

- a) **Armadura:** Elemento que soporta estructuralmente al todo el conjunto de la luminaria, conjunto eléctrico y óptico, y que debe ser resistente mecánicamente, liviana y con buenas propiedades de dispersión, resistencia térmica y duración, además de ser estéticamente aceptable.

Existen distintos tipos de armaduras, las hay de elementos plásticos y armaduras de aleación ligera (inyección de aluminio), las últimas señaladas tienen una vida útil más extensa debido a su resistencia a condiciones ambientales y elementos externos que puedan afectar el funcionamiento de la luminaria.



Figura: Armadura de Luminaria Alumbrado Público

La armadura de la luminaria se puede clasificar según el grado de protección contra el polvo, los líquidos y los golpes. Esta clasificación se designa por las letras IP seguidas de dos dígitos. El primer número va de 0 (sin protección) a 6 (máxima protección, luminaria hermética al ingreso de polvo talco) e indica la protección contra la entrada de polvo y cuerpos sólidos en la luminaria. El segundo va de 0 (sin protección) a 8 (luminaria aprueba de oleaje hasta sumergibles) e indica el grado de protección contra la penetración de líquidos.

- b) **Equipo óptico:** la función principal del equipo es distribuir y redirigir la luz que emite una lámpara de la mejor manera, que dependerá totalmente del objetivo de ésta. La composición general es que contenga un reflector y un difusor (refractor).
- c) **Reflector:** la función de un reflector es determinar una orientación precisa de la luz dependiendo de lo que se requiera siendo de esta manera un elemento fundamental para el rendimiento de la luminaria, en palabras técnicas el

reflector redirige el flujo luminoso de la fuente de luz hacia el difusor o hacia la salida de la luminaria. En su mayoría, las luminarias están equipadas con el reflector para entregar una mejor y adecuada distribución lumínica.



Figura: Bajo la Armadura y Sobre la Lámpara se encuentra el refractor.

El material más usado para la construcción por excelencia es el aluminio en versiones básicas de superficies brillante o semimate. Otros reflectores son los de material sintético como el plástico, o el acrílico que son más económicos pero poseen una carga térmica limitada, al contrario del aluminio que al ser anodizado soporta altas temperatura que emite el conjunto de la luminaria.

- d) **Refractor o Difusor:** el refractor es un elemento óptico de la luminaria actúa de acuerdo a las leyes de refracción, es decir cuando un rayo de luz es desviado de su trayectoria al atravesar una superficie de separación entre dos medios ópticos diferentes. Esto se debe a que la propagación de la luz en cada uno de los dos medios ópticos es diferente.

El difusor también cumple la función de recubrir o cerrar la luminaria en la dirección de la radiación luminosa (protección ante elementos externos) y disminuye la luminancia producida por las lámparas. El diseño del difusor incide en la eficiencia de la luminaria. Las características ópticas del difusor deben permitir la mayor transmisión de luz a través de éste evitando el deslumbramiento. Para lograr esto el difusor debe ser construido con filtros, principalmente de rayos ultravioleta, y su material debe poseer un buen coeficiente de refracción.



Figura: Difusor de Alumbrado Público.

La vida útil del difusor debe ser adecuada para su uso ya que se enfrenta a cambios bruscos de temperatura, y mantención de altas temperatura por tiempo prolongado, para así evitar el rompimiento y descoloramiento. Los materiales más usados para la construcción del difusor son el vidrio templado de seguridad y el policarbonato de alto impacto.

- e) **Equipo Eléctrico:** todo equipo que esté asociado eléctricamente a una lámpara, que posibilite el encendido y/o reencendido de ésta, que permita la estabilización en los valores nominales de funcionamiento, que ejerza el control de la lámpara ya sea para encenderla apagarla o atenuar su flujo luminoso y que monitoree los parámetros de funcionamiento de la lámpara, para programar su mantenimiento es llamado parte del equipo eléctrico.

El equipo eléctrico tiene la finalidad de proveer los medios de arranque, fijando la corriente de la lámpara a los parámetros preestablecidos de funcionamiento. Los componentes generales de una luminaria son los arrancadores o ignitores, los balastos y los condensadores.

- i. **Arrancador o Ignitor:** es el componente que proporciona en el momento del encendido de la lámpara la tensión requerida. Esta acción la puede realizar él mismo o en combinación con el balasto. El ignitor puede ser eléctrico, electrónico o electromecánico. Estos dispositivos están basados en aprovechar la energía almacenada en un condensador que se descarga, mediante un sistema de disparo adecuado, sobre el bobinado primario de un transformador. Debido a la brusca variación de flujo en el núcleo del mismo aparece un impulso de tensión inducido en el secundario del transformador, de un valor peak muy elevado y de corta duración que superpuesto a la tensión de red provoca la emisión del arco en el interior del tubo de descarga.

2.5. Cuadro comparativo de tecnologías

A continuación se presenta un cuadro comparativo de los componentes presentes distintas tecnologías.

Tabla: Comparativa de componentes

Componentes	Vapor de Sodio Alta Presión	Aditivos (Haluro) Metálicos	Inducción Magnética	LED	Vapor de Sodio Baja Presión	Vapor de Mercurio de Alta Presión	Xenón HID	Luz Mixta o Mezcla
Armadura	SI	SI	SI	INCLUIDO	SI	SI	SI	NO
Equipo Óptico								
Reflector	SI	SI	SI	INCLUIDO	SI	SI	SI	NO
Refractor o Difusor	SI	SI	SI	INCLUIDO	SI	SI	SI	NO
Equipo Eléctrico								
Arrancadores o Ignitores	SI	SI		NO	SI	SI	SI	NO
Balastos Inductivos	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI	NO
Balastos Doble Nivel de Potencia	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO
Balastos Electrónicos	NO RECOMENDABLE	SI	INCLUIDO	NO	NO RECOMENDABLE	NO RECOMENDABLE	SI	NO
Condensadores	SI	SI	OPCIONAL	NO	SI	SI	SI	NO

A continuación se presenta una relación de características técnicas entre las distintas tecnologías:

Tabla: Comparativa de características técnicas

Características	Vapor de Sodio Alta Presión	Aditivos (Haluro) Metálicos	LED	Vapor de Sodio Baja Presión	Vapor de Mercurio de Alta Presión	Xenón HID	Luz Mixta o Mezcla
Vida Útil [h]	24.000	12.000	50.000	18.000	24.000	12.000	8.000 a 10.000
Vida media [h]	22.000 a 36.000	10.000 a 15.000	50.000 a 100.000				
Eficacia luminosa [Lm/W]	83 a 150	75 a 125	40 a 150	100 a 200	36 a 58	110 a 149	20 a 28
Índice de Rendimiento de Color	25	65	65 a 90	Sin IRC	15 a 52	75	50
Temperatura de Color [K]	2.000	2.500 a 5.000	2.700 a 5.700	1800	4300 a 6000	4300	3600
Costos Total Luminaria [\$/Luminaria]	54.000 a 240.000	121.000 a 145.000	350.000 a 485.000	Descontinuadas	2.500 a 50.000	N/D	2000 a 4000
Costos Asociados (Lamp+Balasto) [\$/Luminaria]	14.000 a 48.000	44.000 a 68.000	0	Descontinuadas	2.500 a 19.000	N/D	0
LLMF a las 12.000 horas [%]	81	54	98,5	86,6	75		> 50

2.6. Ventajas y desventajas

Para las principales tecnologías utilizadas en la actualidad en nuestro país, en base a información de compras de los dos últimos años obtenida de www.mercadopublico.cl (VSAP, HM y LED), se realiza una análisis comparativo de las principales características técnicas y económicas de cada una de ellas.

- 1) Vida útil:** Sin duda la vida útil resulta relevante al realizar una elección, esto permitirá dilatar la decisión de inversión de recambio, la vida útil de una

luminaria LED se encuentra por sobre la tecnología de VSAP y muy lejos de la HM, casi 5 veces, lo anterior permite sin duda considerar a esta tecnología como la más apropiada desde este punto de vista.

- 2) **Eficacia Lumínica (Lum/Watt):** Nuevamente la tecnología LED se posiciona muy bien comparativamente por sobre la tecnología de HM y es mayor en algunos casos de potencia sobre las VSAP, este factor resulta el de mayor impacto cuando la decisión resulta por eficacia lumínica.
- 3) **Precio:** En cualquier proyecto de inversión está presente el factor precio como uno de los más relevantes a la hora de la toma de decisión, en el contexto analizado (VSAP, HM y LED), resulta en pérdida de competitividad el precio de la tecnología LED respecto de las otras dos, el cual podría llegar a ser hasta 4 veces sobre otra tecnología equivalente VSAP o HM.
- 4) **Tasa de falla:** Las tecnologías incandescente, mixta y halógena, a las 7.000 horas de operación, poseen una tasa de falla del 100%, siendo la tecnología incandescente la con peor desempeño en esta materia con un 100% a las 3.000 horas, dentro de las tecnología con menor tasa de falla se encuentran las luminarias VSAP y LED, las primeras con comportamiento casi sin variación hasta las 15.000 (1%) horas para luego exponencialmente llegar al 100% a las 20.000 horas de funcionamiento, en el caso de tecnología LED mantienen una baja tasa de falla (2%) por periodos por sobre las 36.000 horas.
- 5) **Depreciación lumínica:** Sin duda la tecnología menos atractiva desde este punto de vista es la de Mercurio de Alta Presión, que comienza a perder sus propiedades de iluminación a las 4.000 horas, dentro de las que presentan un mejor desempeño en este aspecto son las tecnologías VSBP, VSAP y LED, con más de 20.000 horas antes que su prestación comience a decaer significativamente.

2.7. Opciones que cumplen el propósito de EE.

Más allá de las múltiples características técnicas de las luminarias, las que consideraremos ya estandarizadas para el presente análisis, los factores más relevantes para decisión de compra a nuestro juicio son el precio y la eficacia lumínica, lo anterior se desprende claramente desde los requerimientos de los municipios en sus licitaciones de alumbrado público extraído desde el portal www.mercadopublico.cl para los dos últimos años

Si consideramos, entonces, la tabla comparativa de las características técnicas entre las distintas tecnologías, y discriminamos las que poseen una vida útil mayor, las tecnologías que mantienen una larga vida son LED con 50 mil horas, VSAP con 24 mil

y MAP con la misma vida que VSAP; asumiendo de esta manera ser las luminarias más duraderas actualmente.

Ahora, quienes poseen una eficacia lumínica mayor son VSAP, HM, LED, VSBP, y Xenón, pero éste último no se encuentra en el mercado del país al ser una tecnología muy nueva y VSBP posee la mayor eficacia lumínica, pero la luz emitida por esta tecnología no permite discriminar de una manera correcta los colores, razón por la cual no es usualmente solicitada por los municipios, en función de las prestaciones actuales, las tecnologías VSAP, HM y LED se ajustan mayormente a los requerimientos con 125, 150 y 100 [Lm/W] de eficacia lumínica máxima respectivamente.

Otro punto importante son los costos de las tecnologías más solicitadas en el último tiempo por los municipios como lo son LED, con \$400.000 aproximadamente en promedio en todas sus potencias y VSAP del orden de los \$80.000 en las potencias de mayor uso (70 a 250W).

A nuestro juicio las tecnologías más atractivas técnicamente serían VSAP y LED, cumpliendo con la mayoría de los requisitos técnicos demandados. Sin embargo existe una gran diferencia entre ellas en relación a los costos de la inversión inicial y de operación, en el primero de los casos el LED puede llegar a triplicar el valor del VSAP(en general), a esta condición se deben considerar los costos de operación a lo largo de la vida útil de las luminarias LED que aportan a disminuir los costos operacionales altamente relacionados con el consumo energético y que traen un gran beneficio a quien realiza la inversión. A fin de tomar una decisión, se recomienda evaluar caso a caso considerando, entre otros, el presupuesto para la inversión inicial, y presupuestos para gastos de operación los que al tratarse de recursos públicos toman mayor relevancia. Señalado lo anterior y considerando la tendencia en el mercado del alumbrado público, podemos concluir que pueden ser consideradas tecnologías que cumplen con el propósito de eficiencia energética las tecnologías LED y VSAP en función de una correcta especificación técnica.

3. SEGMENTACION DE MUNICIPIOS

Referente a la segmentación de los municipios para poseer un marco basal de referencia para la evaluación de planes y programas referidos a Alumbrado Público (AP), se realizó una revisión y análisis del “Catastro de luminaria de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles del año 2005”, siendo la única información oficial actualizada de las instalaciones de AP en el país. Junto a este catastro, se analizó el informe de “Tipología Comunal para la Provisión de Servicios Municipales”, encargado por el Ministerio del Interior – Subsecretaría de Desarrollo Regional el año 2010”, y la información del CENSO del año 2002 del Instituto Nacional de Estadísticas.

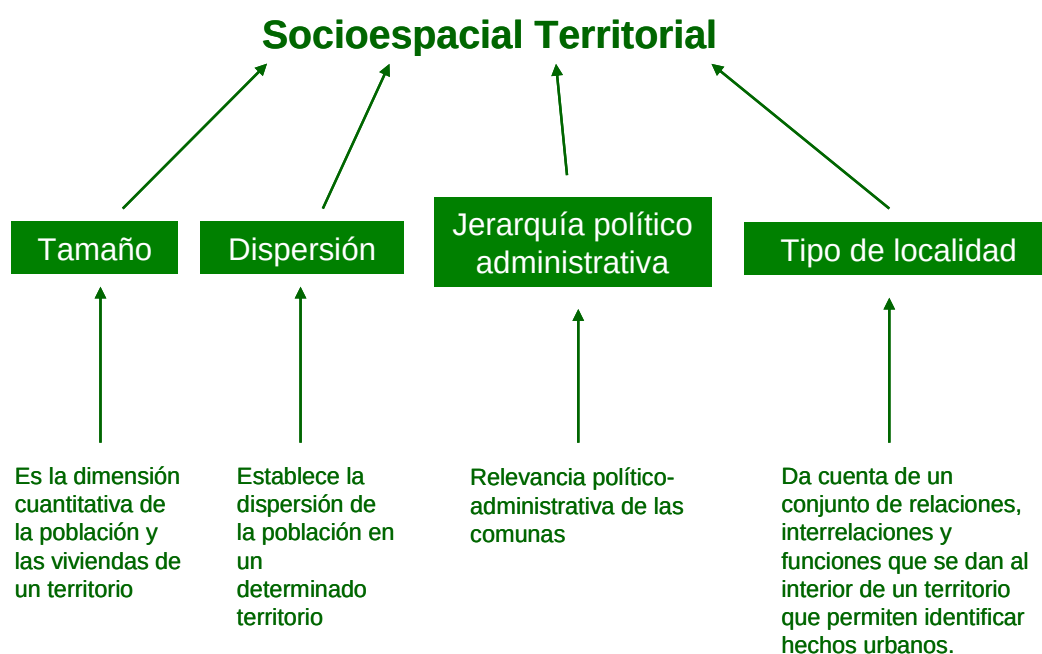
3.1. Tipología Comunal para la provisión de servicios municipales, Subdere, 2010.

Con respecto al estudio “Tipología Comunal para la Provisión de Servicios Municipales”, este utilizó una metodología de Matriz Socio Espacial-Territorial-Socio Económica, considerando los siguientes indicadores para la conformación de la segmentación:

Eje Socio Espacial Territorial

La secuencia del estudio contempló tres etapas:

En primer lugar, se identificaron las dimensiones más relevantes para caracterizar la componente socio espacial y territorial de las comunas. Estas fueron las siguientes que se presentan en la siguiente imagen:



A continuación para cada dimensión se seleccionaron y/o construyeron aquellas variables que mejor representaran el concepto involucrado, estuvieran disponibles en sitios oficiales para todas las comunas del país y que además tuvieran asidero en la literatura y estudios anteriores.

Así se obtuvieron las siguientes variables por dimensión:

a. Tamaño:

Población censal actualizada año 2008

Cantidad de Predios no Agrícolas Habitacionales 2008

b. Dispersión:

Nivel de Ruralidad (Censo 2002)

Densidad Poblacional (Población actualizada 2008)

Entropía

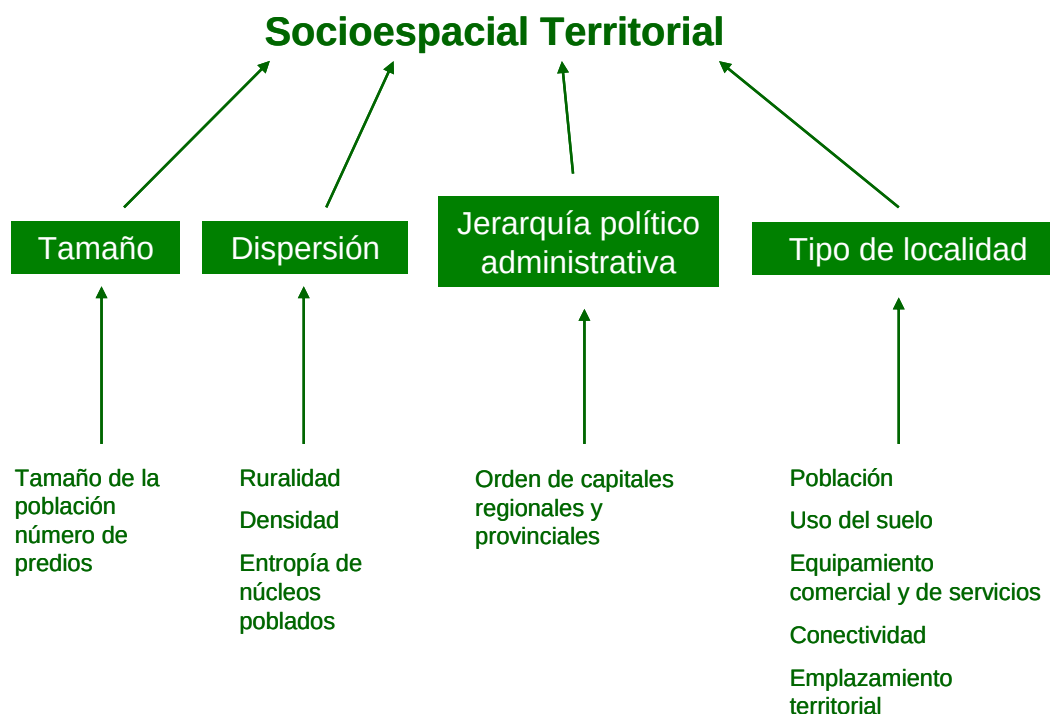
c. Jerarquía Político Administrativa

Condición de Capital Regional

Condición de Capital Provincial

d. Tipo de Localidad

Carácter de ciudad de acuerdo a clasificación del MINVU (Observatorio Urbano) en base a población; uso del suelo; equipamiento comercial y servicios; conectividad y por último emplazamiento territorial



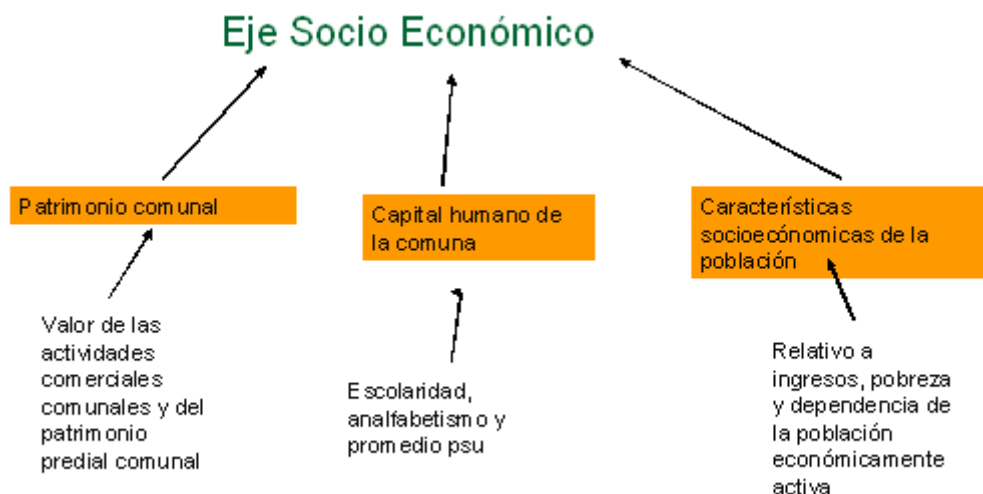
Por último, se aplicó una transformación lineal o de reescalamiento de todas las variables con el fin de contar con variables adimensionales en una escala de 0 a 1, y así poder construir un indicador consolidado, promediando cada variable por dimensión y finalmente promediando cada una de las dimensiones en un solo indicador o eje socio espacial y territorial.

Eje Socioeconómico

La secuencia del trabajo contempló tres etapas:

En primer lugar, se identificaron las dimensiones más relevantes para caracterizar la componente socio económica de las comunas. Estas fueron las siguientes:

- Patrimonio Comunal:
- Capital Humano
- Características Socio Económicas de la Población



A continuación para cada dimensión se seleccionaron y/o construyeron aquellas variables que mejor representaran el concepto involucrado, estuvieran disponibles en sitios oficiales para todas las comunas del país y que además tuvieran asidero en la literatura y estudios anteriores.

Así se obtuvieron las siguientes variables por dimensión:

a) Patrimonio Comunal

Avalúo total promedio

% de Avalúo afecto total promedio

Promedio recaudación total Patentes comerciales

b) Capital Humano

Escolaridad promedio

Promedio Ponderado PSU

% de Analfabetismo

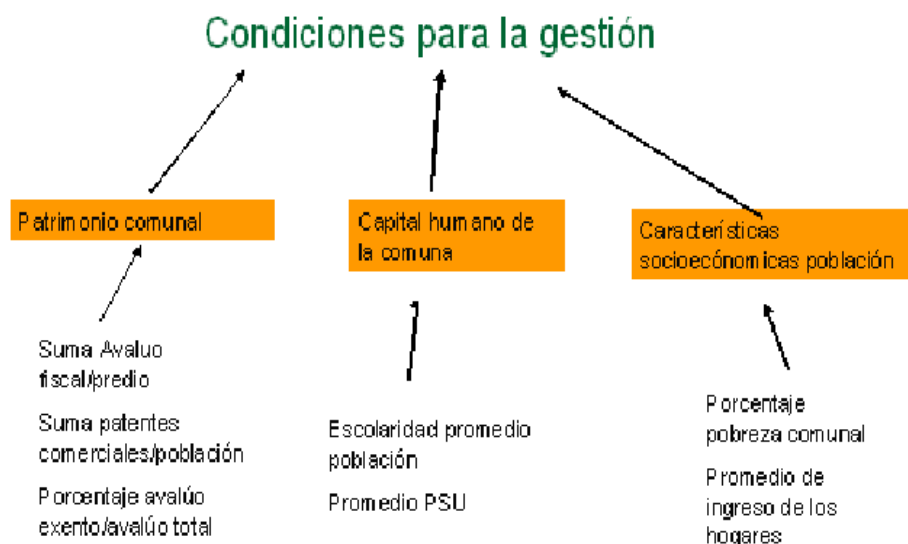
c) Características socio económicas de la población

% Pobreza Casen

Promedio ingreso monetario del hogar

Índice de dependencia

Características Socio Económicas de la Población



Por último, se aplicó una transformación lineal o de reescalamiento de todas las variables con el fin de contar con variables adimensionales en una escala de 0 a 1, y así poder construir un indicador consolidado, promediando cada variable por dimensión y finalmente promediando cada una de las dimensiones en un solo indicador o eje socio económico.

Finalmente, se llegó a la siguiente segmentación:

Segmentación de Municipios - Subdere

Nº	Nº COMUNAS	NOMBRE GRUPO	POBLACIÓN	%
1	8	Grandes comunas metropolitanas, alto desarrollo.	1.010.515	6%
2	39	Grandes comunas metropolitanas y/o urbanas, con desarrollo medio.	7.595.844	45%
3	37	Comunas urbanas mayores, con desarrollo medio.	3.543.432	21%
4	56	Comunas urbanas medianas con desarrollo medio	1.777.524	11%
5	96	Comunas semi urbanas y rurales, desarrollo medio.	1.718.931	10%
6	109	Comunas semi urbanas y rurales, bajo desarrollo.	1.117.127	7%
	345	Total Nacional.	16.763.373	100%

Fuente: Subdere

3.2. Segmentación por parque de luminarias

Se realizará una segmentación en base a las características del parque de luminarias de las diferentes comunas del país, agrupándolas en base al volumen de luminarias “eficientes” con las cuales cuenta cada uno. Por luminarias “eficientes”, se entenderá aquellas que poseen una eficacia lumínica sobre los 70 lúmenes por Watt.:

Para ello, se realizó una categorización cualitativa en base a eficacia lumínica de las diferentes lámparas, tal como se muestra en la tabla que sigue, siendo las de color más oscuro las que presentan un menor índice de eficacia.

Tabla: Categorización cualitativa en base a eficacia lumínica de las diferentes lámparas

Código color	Tipo lámpara
	Vapor de Sodio alta presión (VSAP)
	Haluro Metálico
	Vapor de Mercurio/Vapor de Sodio de Baja Presión
	Mixta
	Halógena
	Incandescente

La segmentación se realizó en base al porcentaje de luminarias asociadas a tecnologías no eficientes que utilizan las comunas, de acuerdo con los siguientes criterios cualitativos:

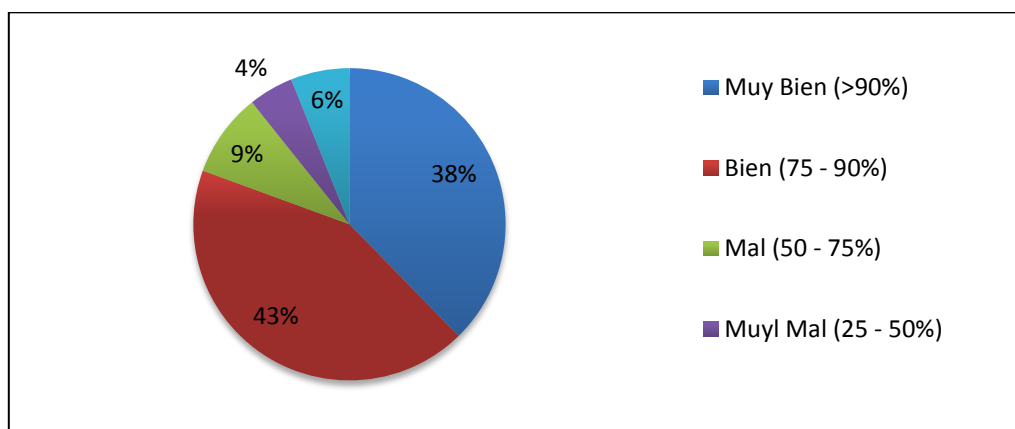
Eficientes		Vapor de Sodio Alta presión (VSAP)
		Haluro Metálico
No eficientes		Sodio Baja Presión/ Vapor de Mercurio
		Mixta
		Halógena
		Incandescente

Considerando lo expuesto anteriormente, la siguiente tabla presenta una categorización de los diferentes municipios, en función de la cantidad de luminarias “ineficientes” que tienen instaladas. Con esto, se definen 5 rangos que describen la situación de las comunas, considerándose que aquellas que dentro de su parque de alumbrado público tienen instaladas menos de un 10% de luminarias (consideradas ineficientes de acuerdo a la segmentación previa), se encuentra en una muy buena situación, las demás categorías se muestran a continuación.

Tabla: Categorías Municipales en relación a la eficiencia de sus luminarias

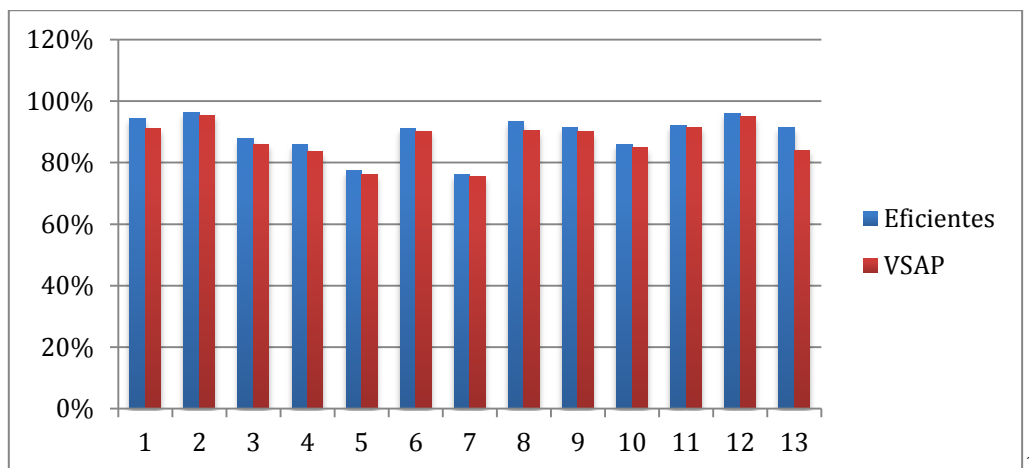
CLASIFICACIÓN	RANGO
MUY BIEN	$0 < X < 10\%$
BIEN	$10\% < X < 25\%$
MAL	$25\% < X < 50\%$
MUY MAL	$50\% < X < 75\%$
EXTREMADAMENTE MAL	$75\% < X < 100\%$

El resultado de ésta clasificación se puede observar en el siguiente gráfico, el cual incluye las 345 comunas del país.

Gráfico: Porcentaje de comunas en cada categoría relación a la eficiencia de su parque de luminarias

Las conclusiones de esta segmentación cualitativa, arrojan resultados positivos en lo que respecta a la utilización de tecnologías con un grado de eficiencia aceptable en la realidad nacional, y que aún existe un 19% de las comunas cuyo parque de AP es, de acuerdo a la clasificación anterior, malo, muy malo o extremadamente malo, esto equivale a un 10,99% del parque de luminarias, específicamente a 266.001 puntos a nivel nacional.

Ahora bien, al desagregar los resultados de la clasificación cualitativa a nivel de regiones, se puede observar que todas las regiones cuentan con al menos un 75% de su parque de AP con tecnología considerada eficiente, además, tal como era de esperar, existe una alta presencia de VSAP, la que debiera haber aumentado desde el 2005. El detalle a nivel regional se presenta en el siguiente gráfico.

Gráfico: Grado de eficiencia del parque de AP y participación de VSAP por región

Continuando con la segmentación cualitativa expuesta, a continuación se especifica la cantidad de comunas que componen las diferentes categorías y también, se explicita el número de puntos de luz considerados en cada una de ellas, esto se muestra en la siguiente tabla.

Tabla: Número de comunas y puntos por categorías

Categoría	Nº de comunas	Número de Puntos
1	130	1.578.121
2	148	598.265
3	30	115.753
4	16	71.444
5	21	55.657
Total	345	2.419.240

Cabe mencionar que el número de puntos ineficientes alcanza los 266.001 luminarias, las cuales están mayormente concentradas en las categorías 3, 4 y 5, pero que de todas maneras, en las categorías 1 y 2, también existen (aunque en mucho menor cantidad), equipos considerados ineficientes.

¹ Dado que el catastro existente y utilizado para realizar los análisis es del año 2005, el país estaba dividido en trece regiones en esa época.

3.3. Conclusiones

- Es fundamental la realización de un nuevo catastro, además, de manera de obtener información fidedigna, este nuevo catastro debiera realizarse a nivel comunal, aplicando una metodología de catastro única. Con esto, la información recopilada en las diferentes comunas será comparable, además podrá utilizarse para generar indicadores tanto comunales, regionales o nacionales, permitiendo una priorización de futuros.
- Junto con lo anterior, se sugiere la verificación del catastro comunal, mediante un muestreo con validez estadística. Ésta verificación debiera ser realizada por una entidad independiente a las comunas y transversal a todas ellas.
- La segmentación cualitativa presentada (en base a porcentajes de tecnologías eficientes) arroja resultados positivos con relación a la introducción de tecnologías por parte de los municipios, además cabe mencionar que, de acuerdo a información entregada por Chilectra, también existe una alta presencia de balastos de doble nivel potencia en la región Metropolitana, lo cual se traduciría en un nivel mejor del esperado en términos de eficiencia del parque de AP actual.
- Finalmente, la gran presencia de tecnología VSAP explica el alto grado de eficiencia existente en el parque de luminarias nacional.

4. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y SOCIAL DE UN PROGRAMA DE RECAMBIO TOTAL Y PARCIAL DE AP.

4.1. Modelo de cálculo

En el presente capítulo se describe la metodología utilizada para la cuantificación de los costos y beneficios asociados al reemplazo de todo el parque de AP del país utilizando la segmentación presentada en el segundo apartado del presente informe, específicamente la segmentación cualitativa, además, se hace presente que, tal como fue discutido y acordado en diversas reuniones con la contraparte y el equipo consultor, se realizarán las siguientes evaluaciones:

- Evaluación económica para inversión 100 % privada
- Evaluación económica para inversión 100% pública
- En base a los resultados de las evaluaciones anteriores, se evalúa la necesidad de una evaluación mixta, esto es, considerando una inversión con aporte de fondos públicos.
- Además, se presentará un análisis de reemplazo punto a punto de sólo las tecnologías no eficientes, ya sea por VSAP o LED.

Para todas las evaluaciones se considera un escenario Con Proyecto (CP) y Sin Proyecto (SP), calculando para cada uno de ellos los costos y beneficios asociados.

El escenario “Sin Proyecto” es conocido como BAU (Business as usual), e implica que no existirán cambios mayores en las instalaciones, debiéndose solo ir realizando los reemplazos en función de las tasas de fallas de las tecnologías existentes.

Por otro lado, el escenario “Con Proyecto” se define como aquel cuya materialización se espera con mayor probabilidad por la ejecución del proyecto; es decir, corresponde a la situación a la cual se espera llegar una vez realizado el proyecto. Los beneficios y costos de este escenario, se obtienen de la comparación de las situaciones Sin Proyecto (SP) y Con Proyecto (CP).

Como ha sido presentado, se evaluarán los reemplazos de las tecnologías existentes por aquellas que presenten un beneficio asociado a la reducción en el consumo de energía, beneficio que será convertido en económico a partir del precio de la energía, con respecto a éste último, cabe mencionar que se considerará un ajuste anual de 1,5%, y no se realizan ajustes adicionales pues no se cuenta con una estimación actual del precio social de este factor, por lo cual se supone que el precio privado es igual al precio social.

Adicionalmente, se realiza la evaluación económica con los mismos escenarios descritos, pero en primera instancia se considera el reemplazo únicamente de lámpara

y balasto, mientras que en segunda instancia, se evalúa el recambio de la luminaria completa.

Se hace presente que, adjunto al presente informe en formato digital, se hace entrega de la planilla de cálculo de cada uno de los escenarios descritos anteriormente.

A continuación se describe la forma en la cual se determinan los diferentes factores asociados a la evaluación económica:

4.1.1. Costos

Costos de Inversión

Los costos de inversión corresponden a la adquisición de los equipos, incluyendo la inversión total en la compra, puesta en funcionamiento, modificaciones y/o adaptaciones de infraestructura requeridas y las instalaciones complementarias (tales como, instalación de faenas, insumos, capital de trabajo, etc.), gasto que se efectúa en el momento inicial del proyecto (año cero).

Para la determinación de los costos de las inversiones requeridas, en primera instancia se realiza un análisis de las licitaciones de alumbrado público de los años 2011 y 2012, además, se solicitan cotizaciones tanto a proveedores (o distribuidores) y a fabricantes de lámparas. Tras este análisis, y dada el diverso rango de precios junto con el gran volumen de equipos, se opta por realizar la evaluación económica utilizando los precios cotizados por proveedor / distribuidor, y luego sensibilizar los resultados en función de las variaciones de éstos precios. La razón por la cual se toman las cotizaciones recae en que son los proveedores quienes serán los futuros adjudicatarios de las licitaciones, por lo cual, es necesario considerar dentro de los costos el margen de los oferentes, además, la información recopilada a partir de Mercado Público incluyen en muchos de los casos, accesorios adicionales, costos de mantención, entre otros. Algunos elementos a considerar en la estimación de este monto son:

- Número de equipos a reemplazar;
- Costo de adquisición por equipo;
- Costo de remoción y reemplazo de equipos existentes. Se incluye costo de disposición de equipos en desuso en bodegas municipales.
- Costo de instalación por equipos;
- Costo de reemplazo de lámparas y otros componentes cuya vida útil sea inferior al período de análisis.
- Los costos de operación y mantenimiento son aquellos que se debe incurrir periódicamente y que se requieren a efectos de mantener el equipo en buen

estado de funcionamiento y de la manera previstas; entre ellos, insumos y materiales, remuneraciones del personal, gastos generales y especialmente la energía consumida. Cabe mencionar que para la evaluación socioeconómica, los costos de inversión, operación y mantenimiento serán ajustados a precios sociales.

Es importante mencionar que todos los costos se determinarán para el reemplazo de Vapor de Mercurio, Vapor de Sodio de Baja Presión, Haluro Metálico, Incandescente y Mixta por Vapor de Sodio de Alta Presión y LED, considerando para VSAP balastos de doble nivel de potencia.

Para el caso de las evaluaciones y costos sociales, se utilizarán los criterios e indicaciones impuestas por el Ministerio de Desarrollo Social, en el documento “Metodología para la formulación y evaluación Socioeconómica de proyectos de reemplazo de alumbrado en la vía pública”. Dicho documento establece los siguientes criterios que difieren de la evaluación privada, y los cuales son explicados en detalle más adelante en este mismo apartado:

- Impuestos
- Precio Social de la Mano de Obra
- Tasa Social de Descuento
- Horizonte de Evaluación del Proyecto
- Precio Social de la Divisa
- Precio Social del Carbono

Costos Fijos:

- Insumos y materiales necesarios para la prestación del servicio de iluminación.
- Remuneración del personal (operarios, profesionales, ayudantes, etc.).

Costos Variables:

- Consumo de energía y potencia.
- Mantenimiento (Relamping)

4.1.2. Beneficios

Los beneficios corresponden al valor que tiene para el país ejecutar el proyecto, medido conceptualmente a través del aumento del consumo de los bienes y servicios producidos por el proyecto y por la liberación de recursos de los insumos que el proyecto genera. Los beneficios están dados exclusivamente por las diferencias en los costos totales (inversión, operación y mantención) entre las situaciones CP y SP.

Los beneficios a considerar serán:

- **Ahorro en costos de operación y mantenimiento:** Se considerará un Relamping en el periodo anterior al que establece la Vida Media Útil de la lámpara, dicho de otra manera, si una tecnología en particular tiene una vida útil de 12.000, y de acuerdo a las horas de uso anuales ésta vida útil se cumple en el año 3, el reemplazo de ésta tecnología se realizará el año 2. La razón de esta decisión se debe a que la Vida Media Útil es determinada en condiciones de laboratorio, las cuales son diferentes a la realidad a las que las lámparas se ven expuestas, además, para la tasa de falla, dado que es un valor que aumenta junto con las horas de uso, se considerará un valor promedio por tecnología antes de que llegue al periodo final de la Vida Útil Media, éste valor será el mismo en cada uno de los años de utilización de cada tecnología en particular. La vida útil y tasas de falla de cada tecnología se presentan en Anexo 2.
- **Ahorros debido a la reducción de la potencia instalada y por ende, en menor consumo de energía a lo largo del horizonte de evaluación del proyecto:** En Anexo 1, se presentan las equivalencias de recambio de potencia por cada tecnología, la cual se basa en la mantención de los flujos luminosos de las tecnologías actuales.
- **Valorización del ahorro energético (en energía y potencia):** Dado el menor consumo de energía y además, la reducción en la potencia instalada, se valorizarán éstos beneficios utilizando la tarifa BT 2 de la Región Metropolitana, con un incremento anual de 1,5% anual para el precio de la energía y un 0,24% anual para el caso de la potencia.
- **Ahorro en emisión de gases de efecto invernadero:** Se utilizará un Factor de Emisión de 0,46 [ton/MWh], siendo éste el valor oficial para proyectos MDL, calculado por el Ministerio de Energía el año 2009.
- **Beneficios por menor disposición de lámparas contaminantes:** Se considera un ahorro asociado a la menor disposición de lámparas con contenido de mercurio.

Referente al último punto anterior, para medir los beneficios generados debido a la menor disposición de lámparas o aparatos de alumbrado contaminantes, es importante considerar que no todos poseen elementos tóxicos, variando con esto la forma en que debe ser realizada su disposición final. Las lámparas que contienen mercurio deben ser dispuestas en rellenos de seguridad para residuos peligrosos, mientras que aquellas que no contienen mercurio, son desechadas en rellenos sanitarios. El ahorro en costos de disposición final depende de tipo de lámparas utilizadas en las situaciones CP y SP, la siguiente tabla indica las tecnologías que

contienen mercurio y el tipo de relleno en el cual deben ser dispuestas.

Tabla: Tipo de AP y disposición final

Tipo de Aparato de Alumbrado	Disposición Final
<i>Con mercurio</i>	Relleno de Seguridad
Fluorescentes	
Vapor de mercurio	
Otras de descarga	
<i>Sin mercurio</i>	Relleno Sanitario
Incandescentes, halógenas y LED	

4.1.3 Análisis de Rentabilidad

El análisis de rentabilidad permite estimar los indicadores que servirán de guía para la toma de decisión y recomendación de ejecución del proyecto, su reformulación o su rechazo. Como se indica anteriormente, las condiciones de evaluación social y evaluación privada son diferentes, por lo cual, tanto los beneficios y los costos, como también los flujos de caja deberán abordarse de formas consecutivas: primero, la evaluación a precios privados y luego, la evaluación social. A continuación se explican las principales diferencias y usos de ambas formas de evaluación:

- **Evaluación a precios privados:** Permite estimar la factibilidad y viabilidad de las inversiones privadas asociadas al proyecto y estimar la pertinencia y conveniencia de establecer mecanismos de transferencias (subsidios o impuestos) cuando el valor actual neto de los beneficios privados es diferente del valor actual neto de los beneficios sociales. Asimismo, la evaluación a precios privados permite identificar la potencialidad de financiamiento del proyecto por parte del sector privado.
- **Evaluación social:** Tiene por objetivo desarrollar el análisis comparado de la conveniencia de realizar el proyecto desde el punto de vista social y considerando todos los propósitos. La evaluación desde el punto de vista de la sociedad puede hacerse a precios de mercado, siempre que dichos precios reflejen adecuadamente la escasez de insumos y productos desde el punto de vista social. En caso contrario, deberían hacerse todos los ajustes correspondientes.

Dado que se trata de estimar la rentabilidad de proyectos de remplazo punto a punto, que mantienen la calidad y nivel de servicio, sólo será relevante la comparación de

costos entre las situaciones CP y SP y los efectos derivados del cambio en la tecnología empleada por los equipos (emisiones de gases de efecto invernadero), excluyendo la contaminación lumínica o el aumento de los niveles de iluminancia. Si bien esto último representa beneficios adicionales al remplazo tecnológico, no serán evaluados dado que no son considerados por la metodología impuesta por el Ministerio de Desarrollo Social.

En general, en los proyectos de reemplazo de equipo que mantienen el nivel de servicio, se comparan alternativas de proyectos que tienen iguales beneficios y por lo tanto, para la recomendación de implementación desde el punto de vista social, lo relevante es la comparación de los costos; por ello, debería usarse el Valor Actual de Costos (VAC) de cada proyecto como indicador para seleccionar la mejor alternativa.

Sin embargo, dado que esta propuesta metodológica mide beneficios derivados de cambios en los niveles de servicio de los diferentes equipos (emisión de gases – efecto invernadero y disposición de desechos de mercurio), lo que corresponde es un análisis costo – beneficio, para lo cual son relevantes los indicadores que se presentan a continuación:

- Valor Actual Neto Social (VANS)
- Tasa Interna de Retorno Social (TIRS),

Estos dos indicadores serán calculados a partir de las comparaciones de las situaciones CP y SP.

Además, y de acuerdo a la metodología de evaluación social de proyectos del Ministerio de Desarrollo Social, dentro del análisis de rentabilidad, debe considerarse el valor residual económico de las inversiones, el cual se estimará en base al diferencial de Vida Media útil que le reste a las luminarias en el periodo de evaluación del proyecto.

Con todas las consideraciones anteriores, si el proyecto tiene VANS positivo, es conveniente su ejecución; en caso contrario debe recomendarse su rechazo o reformulación. Si el VANS es cero, en ausencia de otro tipo de consideraciones, la sociedad debería ser indiferente a ejecutar o no el proyecto. No obstante, al tomar la decisión sobre la ejecución del proyecto, también deben considerarse variables que la metodología del Ministerio de Desarrollo Social no cuantifica.

Por otro lado, la TIRS mide la rentabilidad promedio que tiene un determinado proyecto, suponiendo que los flujos se reinvierten en el mismo proyecto y a una tasa constante. Matemáticamente, corresponde a la tasa de descuento que hace el VANS igual a cero.

4.1.4 Horizonte de Evaluación

El horizonte de evaluación corresponde a los años de vida útil del proyecto. En promedio, en los proyectos de reemplazo de equipos, la vida útil económica de los equipos siempre es menor que su vida útil técnica. En términos generales, la vida útil económica del alumbrado finaliza cuando los beneficios que proporciona el operar un período adicional son menores que los costos que involucra mantenerlo operando un período más. En las evaluaciones económicas que se realizarán, se tomará un horizonte de evaluación de 10 años, lo anterior se sustenta en las indicaciones de la Metodología del Ministerio de Desarrollo Social, junto con lo estipulado por el Servicio de Impuestos Internos, quien establece que todo equipo eléctrico tiene una vida útil económica de 10 años. Cabe destacar que la vida útil económica no guarda relación con la vida útil real de las diferentes tecnologías, por lo cual, cuando ésta última es mayor a la vida útil económica, se incorpora el valor residual de los equipos.

4.1.5. Precios Sociales

Los precios sociales se definen como el “costo económico o de oportunidad de los bienes y servicios producidos y consumidos en la sociedad. En situación de equilibrio competitivo, el “costo de oportunidad” de los factores de producción es igual a su precio de mercado. No obstante, cuando los mercados presentan distorsiones es necesario incorporar en la evaluación social las correcciones correspondientes para determinar los verdaderos costos de oportunidad de los factores. Cabe mencionar que éstos precios se actualizan e informa anualmente.”

Con lo expuesto anteriormente, a continuación se presentan los precios sociales que se utilizarán en las evaluaciones económicas

IVA y Arancel Aduanero

Las principales variables de corrección que se utilizan para el cálculo de los precios sociales corresponden a la tasa de Impuesto al Valor Agregado, la cual para éstas evaluaciones no debe ser considerada, y el Arancel Aduanero, cuyo valor para el año 2013 es de 1,7%.

Precio Social de la Mano de Obra

El precio social del trabajo corresponde al costo marginal en que incurre la sociedad por emplear un trabajador adicional de cierta calificación. Para uniformar criterios respecto de la calificación de la mano de obra, se define:

- Mano de Obra Calificada: Aquellos trabajadores que desempeñan actividades cuya ejecución requiere estudios previos o vasta experiencia, por ejemplo: profesionales, técnicos, obreros especializados. Entre estos últimos se debe considerar maestros de primera en general, ya sean mecánicos, electricistas,

albañiles, pintores, carpinteros u otros.

- Mano de Obra Semi Calificada: Aquellos trabajadores que desempeñan actividades para las cuales no se requiere estudios previos y que, teniendo experiencia, esta no es suficientes para ser clasificados como maestros de primera.

Por tanto los factores de corrección a utilizar en los costos de mano de obra privada son los siguientes:

Categoría de Mano de Obra	Factor de Corrección (G)
Calificada	0,98
Semi Calificada	0,68

Precio Social del Carbono

El precio social del carbono, recientemente estimado por el Ministerio de Desarrollo Social, permite incorporar dentro de la evaluación el costo o beneficio social neto que tiene aumentar y/o disminuir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Este precio se podrá utilizar para cualquier tipo de proyectos en que exista una medida de sus emisiones de GEI, tales como Residuos Sólidos, Hidroeléctricas, transporte, entre otros y que puedan ser expresados en equivalentes de carbono. La elaboración de este precio resulta relevante para la contribución de Chile en los esfuerzos mundiales para la reducción de los GEI causantes del calentamiento global.

El precio de mercado a considerar es de los instrumentos que se transan bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), ya que es en este mercado en el que Chile participa. Las Reducciones Certificadas de Emisiones de Gases de efecto Invernadero (CERs) son los instrumentos que se transan en las bolsas internacionales. Para establecer el precio de mercado se propone calcular un precio ponderado por las cantidades transadas en el mercado considerando toda la información histórica disponible. La siguiente tabla muestra el Precio Social del Carbono por tonelada (**“Estimación precio social del carbono, Ministerio de Desarrollo Social, 2013”**).

Variable	Valor/tonelada
Precio Social Carbono	\$1.933

Tasa Social de Descuento

La tasa social de descuento representa el costo de oportunidad en que incurre el país cuando utiliza recursos para financiar proyectos.

Estos recursos provienen de las siguientes fuentes:

- De menor consumo (mayor ahorro).
- De menor inversión privada
- Del sector externo.

Por lo tanto, depende de la tasa de preferencia intertemporal del consumo, de la rentabilidad marginal del sector privado y de la tasa de interés de los créditos externos.

La Tasa Social de Descuento a emplear para el periodo 2013 corresponde a un 6%, estimada a partir del estudio **“Cálculo de la Tasa Social de Descuento”, MIDEPLAN (2002).**

Precio Social de la Divisa

La discrepancia entre el costo social de la divisa y el costo privado se origina si la economía valora una divisa adicional en más o menos de lo que efectivamente le cuesta en términos de recursos productivos sacrificados. La causa de esta discrepancia es la existencia de distorsiones en la economía, especialmente en los sectores de bienes y servicios transables internacionalmente (aranceles y/o subsidios).

El tipo de cambio social, o precio social de la divisa, deberá calcularse sobre la base del tipo de cambio del dólar observado.

Variable	Factor de Corrección
Precio Social de la Divisa	1,01

Expuestas las consideraciones anteriores, a continuación se presentan los valores que se considerarán en el análisis económico:

Las consideraciones aplicadas para las evaluación son las siguientes:

- Equipos
 - Para todos los equipos y accesorios se consideran precios sin IVA.
- Tasa de Descuento Social
 - 6 %, vigente durante el 2013.
- Tasa de Descuento Privada
 - Se consideró un valor de 14% en base a lo esperado por los inversionistas.
- Horizonte de Evaluación del Proyecto
 - 10 años

- Valor Terminal
 - Este será el diferencial de Vida Útil Media restante en el último periodo
 - Depreciación (evaluación privada) Lineal a 10 años
- Costos equipos de iluminación
 - En base a cotizaciones de distribuidor y un fabricante².
 - Además se analizó la información disponible en Mercado Público, referente a los proyectos de AP, licitados en los últimos dos años,
 - En las evaluaciones económicas realizadas se utilizan los precios de los distribuidores
 - En anexo 1 se presenta el desglose de los valores.
- Costos asociados a mano de obra y disposición final
 - En base a información suministrada por el Ministerio de Energía e información levantada en base a datos de mercado.
 - Cabe mencionar que se separan los costos de inversión de los de mano de obra, de manera tal de calcular de forma más expedita los costos sociales asociados a este último.
 - Los costos asociados a instalación, retiro y disposición final de lámparas con contenido de mercurio son:
 - Instalación por punto : \$14.706
 - Retiro por punto : \$7.639
 - Disposición final de Hg : Si bien fue imposible levantar este dato, en la planilla de cálculo se deja espacio para ingresar valor en el futuro, el cual no debería afectar de manera significativa los resultados de la evaluación económica. Lo anterior, dado que la tecnología VSAP también posee mercurio, por lo cual el potencial beneficio asociado a disminución del costo de disposición final no es efectivo.
 - Para los costos sociales atribuibles a precio social de mano de obra, se considera un 20% de los costos anteriores asociados a personal calificado y el restante a mano de obra semi - calificada.

² Cotizaciones por parte de Philips (fabricante) Blue Now (distribuidor nacional)

- Vida Media Útil y depreciación lumínica
 - Determinada en base a información de mercado.
 - Además, dicha información se corrobora con las siguientes fuentes:
 - Green Public Procurement: Street Lighting and Traffic Lights – Technical Background Report.
 - Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs, Public Street lighting.
 - El detalle de las tablas de Vida Útil Media y Potencia se presentan en anexo 2.
 - En el caso de la tecnología LED, dado que no existe mucha información de su performance en términos de tasa de falla, se utilizará en la evaluación un valor de 2% anual.
 - En términos gráficos, a continuación se presenta a modo de resumen la tasa de falla y depreciación lumínica para las distintas tecnologías.

Gráfico: LSF- Tasa de Falla

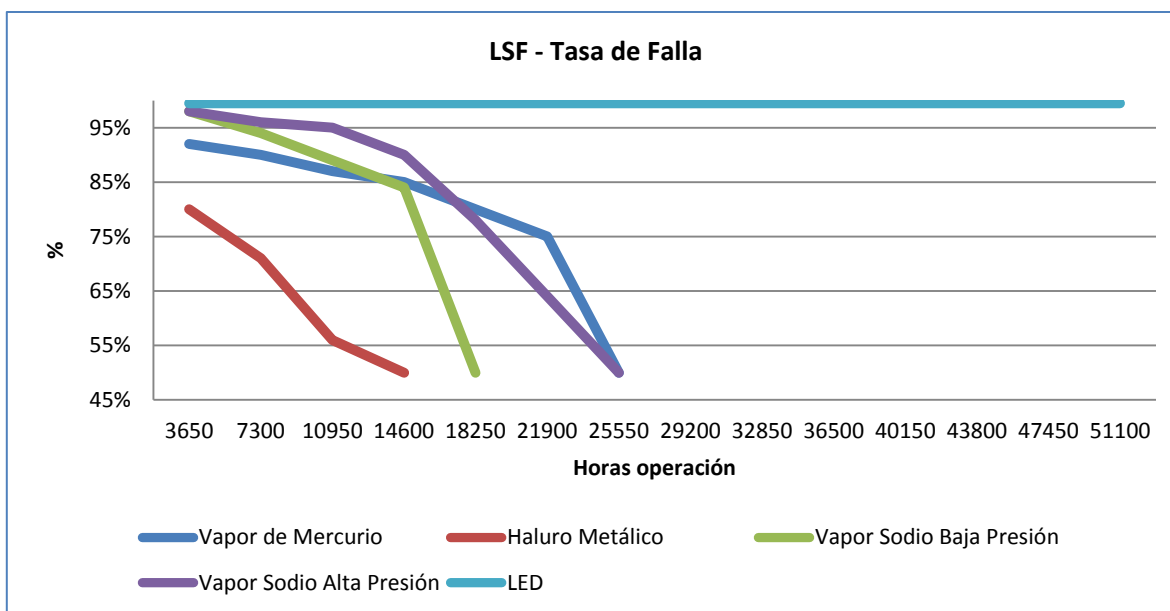
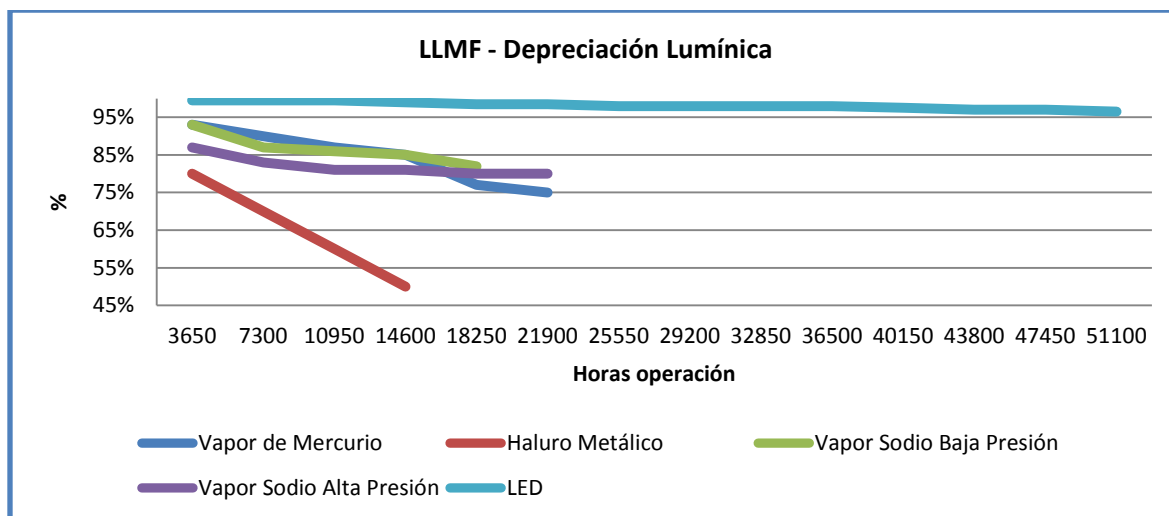


Gráfico: LLMF - Depreciación Lumínica

- En base a la información anterior, y tal como se indicó anteriormente, se obtuvo el promedio de la tasa de falla en los periodos previos a alcanzar su Vida Media Útil (VMU), lo anterior dado a que la tasa de falla es un valor que aumenta junto con las horas de uso, por tanto se considerará un valor promedio por tecnología antes de que llegue al periodo final de la Vida Útil Media, éste valor será el mismo en cada uno de los años de utilización de cada tecnología en particular. La vida útil y tasas de falla de cada tecnología se presentan en Anexo 2.
- Además, superada la VMU, se realiza una renovación, incluido balasto, del 100% de los equipos, dicho de otra manera, si una tecnología en particular tiene una vida útil de 12.000, y de acuerdo a las horas de uso anuales ésta vida útil se cumple en el año 3, el reemplazo de ésta tecnología se realizará el año 2. La razón de esta decisión se debe a que la Vida Media Útil es determinada en condiciones de laboratorio, las cuales son diferentes a la realidad a las que las lámparas se ven expuestas.
- La tabla siguiente muestra para cada tecnología, el promedio de tasas de falla y, a la vez, el año en el cual se realiza la renovación total de los equipos, tomando en consideración lo expuesto anteriormente. Se hace presente que para el caso de las lámparas incandescentes, el reemplazo anual del 300% se debe a que la vida útil de ésta tecnología es de aproximadamente 1.000 horas, mientras que las horas de uso del AP al año es de 3.650 horas.

Tabla: Promedio de tasas de falla y año en el cual se realiza la renovación total de los equipos, por tecnología

Hora de uso	3.650	7.300	10.950	14.600	18.250	21.900	25.550	29.200	32.850	36.500
Tecnología	AÑO									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Haluro Metálico	10%	10%	100%	10%	10%	100%	10%	10%	100%	10%
Vapor de Mercurio	6%	6%	6%	6%	6%	100%	6%	6%	6%	6%
Sodio de Baja Presión	7%	7%	7%	100%	7%	7%	7%	100%	7%	7%
Sodio de Alta Presión	6%	6%	6%	6%	6%	100%	6%	6%	6%	6%
LED	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
Incandescente	300%	300%	300%	300%	300%	300%	300%	300%	300%	300%
Mixta	20%	100%	20%	100%	20%	100%	20%	100%	20%	100%
Halógena	25%	100%	25%	100%	25%	100%	25%	100%	25%	100%

- Con lo anterior se resuelve una potencial sobrestimación de la vida media útil de los equipos de iluminación, lo que se originaría al considerar los valores del fabricante, además de absorber los recambios asociados a depreciación lumínica. Cabe mencionar que los porcentajes presentados en la tabla anterior corresponden al porcentaje de equipos (por cada tecnología) que deben remplazarse en el año específico.
- Equivalencia de recambio
 - En anexo 2 se presentan las tablas de conversión de tecnología – potencia para los recambios realizados
 - Se realizaron tres tipos de recambio:
 - LED
 - VSAP sin luminaria (lámpara y balasto): Esto debido a la compatibilidad existente entre las luminarias para distintas tecnologías, siempre que la potencia sea similar.

- VSAP incluyendo luminaria.
- Segmentación a utilizar
 - Se realizan evaluaciones económicas en base a las cinco categorías asociadas al grado de eficiencia del parque para distintas comunas, cuyo detalle se presentó en el segundo apartado del presente informe.
 - En la siguiente tabla aparecen los número de puntos a reemplazar por cada categoría y el número de comunas respectiva. Cabe mencionar que ésta tabla es la misma que se presenta en el capítulo dos y será éste el parque para el cual se evaluarán los diferentes escenarios de reemplazo.

Tabla: Número de puntos a reemplazar por cada categoría municipal

Categoría	Nº de columnas	Número de Puntos
1	130	1.578.121
2	148	598.265
3	30	115.753
4	16	71.444
5	21	55.657
Total	345	2.419.240

- Costos de Inversión y Beneficios Energéticos valorizados
 - A modo de resumen, las siguientes tablas presentan los montos de inversión asociados a equipos, mano de obra y los beneficios relacionados con ahorro de energía y potencia anual. Los valores en ellas presentados se determinan en base a los criterios expuestos anteriormente, en este mismo apartado.
 - Evaluación privada recambio LED

Tabla: Evaluación privada cambio LED

Categorí a	Inversión en equipos	Inversión en mano de obra	Beneficios Ahorro Energía Anual	Beneficios Ahorro Potencia Anual
1	\$651.315.858.847	\$35.262.374.971	\$20.880.571.868	\$12.962.687.793
2	\$247.619.297.950	\$13.367.956.219	\$7.733.820.468	\$4.801.166.405
3	\$48.734.124.214	\$2.586.447.286	\$1.355.395.520	\$841.431.407
4	\$29.291.449.854	\$1.596.373.382	\$1.197.753.594	\$743.567.082
5	\$23.295.602.707	\$1.243.629.941	\$724.269.381	\$449.627.430

Tabla: Evaluación Privada recambio VSAP (lámpara y balasto)

Categorí a	Inversión en equipos	Inversión en mano de obra	Beneficios Ahorro Energía Anual	Beneficios Ahorro Potencia Anual
1	\$31.239.190.750	\$35.262.374.971	\$891.477.194	\$553.430.271
2	\$11.351.828.790	\$13.367.956.219	\$825.930.490	\$512.738.786
3	\$1.889.597.234	\$2.586.447.286	\$378.668.288	\$235.077.795
4	\$1.365.662.087	\$1.596.373.382	\$411.592.427	\$255.517.146
5	\$908.833.641	\$1.243.629.941	\$145.954.806	\$90.608.945

Tabla: Evaluación Privada recambio VSAP (luminaria completa)

Categorí a	Inversión en equipos	Inversión en mano de obra	Beneficios Ahorro Energía Anual	Beneficios Ahorro Potencia Anual
1	\$125.264.582.498	\$35.262.374.971	\$891.477.194	\$553.430.271
2	\$47.612.438.173	\$13.367.956.219	\$825.930.490	\$512.738.786
3	\$9.044.155.836	\$2.586.447.286	\$378.668.288	\$235.077.795
4	\$5.798.600.334	\$1.596.373.382	\$411.592.427	\$255.517.146
5	\$4.307.652.277	\$1.243.629.941	\$145.954.806	\$90.608.945

Tabla: Evaluación Social recambio LED

Categorí a	Inversión en equipos	Inversión en mano de obra	Beneficios Ahorro Energía Anual	Beneficios Ahorro Potencia Anual
1	\$646.645.924.139	\$26.094.157.478	\$20.880.571.868	\$12.962.687.793
2	\$245.843.867.583	\$9.892.287.602	\$7.733.820.468	\$4.801.166.405
3	\$48.384.700.543	\$1.913.970.991	\$1.355.395.520	\$841.431.407
4	\$29.081.430.159	\$1.181.316.303	\$1.197.753.594	\$743.567.082
5	\$23.128.573.236	\$920.286.156	\$724.269.381	\$449.627.430

Tabla: Evaluación Social recambio VSAP (lámpara y balasto)

Categorí a	Inversión en equipos	Inversión en mano de obra	Beneficios Ahorro Energía Anual	Beneficios Ahorro Potencia Anual
1	\$31.015.205.752	\$26.094.157.478	\$891.477.194	\$553.430.271
2	\$11.270.436.178	\$9.892.287.602	\$825.930.490	\$512.738.786
3	\$1.876.048.822	\$1.913.970.991	\$378.668.288	\$235.077.795
4	\$1.355.870.290	\$1.181.316.303	\$411.592.427	\$255.517.146
5	\$902.317.304	\$920.286.156	\$145.954.806	\$90.608.945

Tabla: Evaluación Social recambio VSAP (luminaria completa)

Categorí a	Inversión en equipos	Inversión en mano de obra	Beneficios Ahorro Energía Anual	Beneficios Ahorro Potencia Anual
1	\$124.366.435.442	\$26.094.157.478	\$891.477.194	\$553.430.271
2	\$47.271.056.991	\$9.892.287.602	\$825.930.490	\$512.738.786
3	\$8.979.309.239	\$1.913.970.991	\$378.668.288	\$235.077.795
4	\$5.757.024.370	\$1.181.316.303	\$411.592.427	\$255.517.146
5	\$4.276.766.410	\$920.286.156	\$145.954.806	\$90.608.945

4.2. Resultados Evaluaciones Económicas Privadas y Sociales

A continuación se presentan los resultados de las evaluaciones económicas realizadas para las distintas categorías de la segmentación y en base a los escenarios previamente definidos, para todos ellas, aquellas destacadas en color naranja, representa los escenarios en los cuales existe rentabilidad positiva.

Evaluación Privada						
	LED		VSAP sin luminaria		VSAP con luminaria	
Categoría	TIR	VAN	TIR	VAN	TIR	VAN
1	-	\$-95.311.047.981	2%	\$-26.792.432.704	4%	\$-12.969.598.283
2	-	\$-146.021.036.374	22%	\$8.883.863.102	4%	\$-23.007.091.148
3	2%	\$-30.421.873.042	22%	\$1.514.184.008	3%	\$-4.701.346.408
4	4%	\$-14.900.224.090	32%	\$2.474.068.214	-	\$-6.617.132.688
5	3%	\$-12.969.598.283	29%	\$1.547.752.003	-	\$-5.974.833.215

Evaluación Social			
	LED		
Categoría	TIRS	VANS	VAC
1	-	\$-45.121.337.329	\$1.300.358.825.907
2	5%	\$-19.767.253.710	\$491.705.056.661
3	4%	\$-6.651.494.275	\$93.945.848.795
4	7%	\$1.190.284.368	\$61.715.777.291
5	5%	\$-1.148.610.975	\$46.949.107.809

Evaluación Social						
	VSAP sin luminaria			VSAP con luminaria		
Categoría	TIRS	VANS	VAC	TIRS	VANS	VAC
1	32%	\$93.892.696.654	\$208.111.423.115	6%	\$3.669.077.309	\$304.590.263.149
2	31%	\$34.400.731.877	\$76.726.179.436	6%	\$-393.735.419	\$113.932.953.768
3	32%	\$6.164.484.199	\$13.744.523.825	5%	\$-700.790.807	\$21.085.769.653
4	45%	\$6.603.754.726	\$11.678.127.912	12%	\$2.350.055.533	\$16.226.736.878
5	40%	\$4.249.875.922	\$7.895.082.842	10%	\$988.483.301	\$11.382.588.434

4.3. Sensibilización

Tal como se mencionó anteriormente, los resultados de las evaluaciones económicas, ya sean sociales o privadas, pueden presentar grandes fluctuaciones frente a variaciones de determinadas variables. En el presente apartado, se analizarán diversas fluctuaciones de variables claves, y se analizará su repercusión en los indicadores económicos, especialmente en el VAN y TIR para la evaluación privada, y VAC, VANS y TIRS para la evaluación social. A continuación se plantean los diferentes escenarios, en primera instancia para la evaluación privada y posteriormente, se plantearán los escenarios para la evaluación social. Cabe destacar que los escenarios de sensibilidad no son iguales para la evaluación de recambio por VSAP y LED, en la evaluación privada o social, esto porque en los escenarios que no presentan rentabilidad por amplios márgenes, la sensibilización entregaría resultados aún menos rentables (en el caso de incrementos de precios), o seguirán siendo no rentables frente a mejoras de las condiciones de evaluación. Finalmente, se hace presente que existen casos en los que la tasa de descuento y la tasa interna de retorno (TIR) son iguales y se obtiene un valor actual neto positivo, esto se debe a que la TIR presentada en las tablas fueron redondeados sin decimales, de todas maneras, en las planillas de cálculo que se entregan junto con éste informe, se muestran los resultados con los decimales correspondientes.

4.3.1. Escenario 1 evaluación privada: Variación tasa de descuento

Como se ha presentado en el apartado 5.1, para la evaluación económica base, se consideró una tasa de descuento del 14%, éste valor corresponde a una tasa usual para un inversionista privado, pese a lo anterior, en función de los intereses y

aversiones al riesgo de los inversionistas, es factible enfrentar escenarios donde la tasa de descuento sea menor, por tanto, el objetivo de esta sensibilización busca determinar los potenciales beneficios al resultado económico del proyecto en el caso de tener un inversionista con menor tasa, en base a experiencia del equipo consultor, una tasa mínima aceptable por un inversionista será del 10%.

Cabe mencionar que también existe la posibilidad de encontrar tasas de descuento mayores, pero dados los resultados presentados en el numeral 5.2, una tasa de descuento mayor no viabilizaría ninguna de los casos evaluados.

Es necesario indicar que aquellas alternativas de recambio cuya TIR sea inferior a la tasa mínima de descuento, no serán evaluadas, ya que la variación de ésta tasa sólo afecta al resultado del VAN, y los criterios de decisión para una evaluación privada se basan en un VAN lo más positivo posible y una TIR mayor a la tasa de descuento del inversionista.

A continuación se presentan los resultados de la sensibilización para cada una de las categorías, realizando un remplazo de la totalidad de lámparas y balastos del parque de AP nacional.

Tabla: Resultados sensibilización variación tasa descuento al 12% y 10%

Categoría	Tecnología	Tasa de Descuento	
	VSAP sin recambio de luminaria	12%	10%
1	VAN	\$-23.864.194.953	\$-20.534.056.897
	TIR	2%	2%
2	VAN	\$11.880.101.511	\$15.295.844.627
	TIR	22%	22%
3	VAN	\$2.046.342.550	\$2.652.872.536
	TIR	22%	22%
4	VAN	\$2.951.526.862	\$3.495.854.453
	TIR	32%	32%
5	VAN	\$1.880.239.419	\$2.259.405.491
	TIR	29%	29%

Como resultado de esta sensibilización, se observa que para el reemplazo descrito anteriormente, se sumaría al grupo de categorías rentables en términos privados la categoría 2, quedando sólo la categoría 1 como no rentable en lo que respecta al recambio por VSAP sin recambio de luminaria.

4.3.2. Escenario 2 evaluación privada: Variación tasa de descuento e incremento del costo tecnológico

En este escenario, además de las variaciones de la tasa de descuento mostradas en el numeral 5.1.7.1, se fluctuarán al alza los costos de la tecnología VSAP (sólo lámpara más balasto). Tal como se indicó anteriormente, sólo se analizará éste remplazo dado que es el único que presenta tasas internas de retorno superiores a la mínima tasa de descuento.

Referente a la fluctuación de los precios, para éste escenario se incrementarán en 30%, 50% y 75% del costo considerado en el caso base.

En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos, en orden de incremento de costo tecnológico (30, 50 y 75% respectivamente).

Tabla: Sensibilización con incremento del 30% de los costos para distintas tasas de descuento

Categoría	Tecnología	TD		
	VSAP	14%	12%	10%
1	VAN	\$-38.315.932.634	\$-34.760.375.034	\$-30.691.479.817
	TIR	0%	0%	0%
2	VAN	\$-13.546.785.002	\$-12.161.732.141	\$-10.582.074.344
	TIR	1%	1%	1%
3	VAN	\$-830.634.864	\$-449.857.217	\$-15.738.822
	TIR	10%	10%	10%
4	VAN	\$415.287.144	\$751.985.488	\$1.135.977.421
	TIR	17%	17%	17%
5	VAN	\$126.465.917	\$361.478.559	\$629.629.978
	TIR	15%	15%	15%

En esta primera sensibilización, con un incremento de 30% del costo de los equipos, los proyectos rentables de recambio resultantes corresponden a las categorías 4 y 5 para todas las tasas de descuento analizadas (2 menos que en el caso base).

Tabla: Sensibilización con incremento del 50% de los costos para distintas tasas de descuento

Categoría	Tecnología	TD		
	VSAP	14%	12%	10%
1	VAN	\$-39.065.698.622	\$-34.968.131.943	\$-30.278.434.440
	TIR	1%	1%	1%
2	VAN	\$-15.752.123.627	\$-14.359.809.450	\$-12.771.203.259
	TIR	0%	0%	0%
3	VAN	\$-1.232.228.203	\$-853.934.526	\$-422.522.830
	TIR	8%	8%	8%
4	VAN	\$104.391.319	\$437.212.480	\$816.886.994
	TIR	15%	15%	15%
5	VAN	\$-15.732.975	\$222.622.734	\$494.665.476
	TIR	14%	14%	14%

En esta segunda sensibilización, incremento de 50% del costo de los equipos, los proyectos rentables de recambio resultantes corresponden a las categorías 4 para las tres tasas de descuento utilizadas y la categoría 5 para tasas de descuento de 12% y 10%.

Tabla: Sensibilización con incremento del 75% de los costos para distintas tasas de descuento

Categoría	Tecnología	TD		
	VSAP	14%	12%	10%
1	VAN	\$-40.002.906.105	\$-35.227.828.079	\$-29.762.127.720
	TIR	-	-	-
2	VAN	\$-18.655.224.666	\$-17.264.379.775	\$-15.676.574.410
	TIR	-2%	-2%	-2%
3	VAN	\$-1.734.219.878	\$-1.359.031.161	\$-931.002.839
	TIR	6%	6%	6%
4	VAN	\$-284.228.461	\$43.746.220	\$418.023.959
	TIR	12%	12%	12%
5	VAN	\$-193.481.590	\$49.052.953	\$325.959.849
	TIR	12%	12%	12%

En ésta última sensibilización, incremento de 75% del costo de los equipos, se obtiene que sólo las categorías 4 y 5 para tasas de descuento de 12% y 10% resultan positivas.

En términos generales, el escenario de recambio masivo por VSAP sin incluir luminaria, puede soportar incrementos de hasta un 75% en los costos tecnológicos, con tasas de descuento de hasta un 12%.

4.3.3. Escenario 3 evaluación privada: Variación tasa de descuento y disminución del costo tecnológico

El presente escenario se evalúa la disminución de los costos tecnológicos de las luminarias LED en un 25%, 35% y 50% del costo.

Nuevamente, los resultados para las sensibilizaciones de las diferentes tasas de descuento y consecutivamente para las diferentes reducciones de precios, se presentan a continuación.

Tabla: Sensibilización con reducción del 25% de los costos para distintas tasas de descuento

Categoría	Tecnología	TD		
	LED	14%	12%	10%
1	VAN	\$-237.262.522.603	\$-200.749.076.133	\$-157.560.250.702
	TIR	-	-	-
2	VAN	\$-91.693.784.090	\$-77.952.329.099	\$-61.692.569.572
	TIR	5%	5%	5%
3	VAN	\$-19.729.689.182	\$-17.178.387.502	\$-14.152.922.661
	TIR	4%	4%	4%
4	VAN	\$-8.473.729.875	\$-6.647.309.266	\$-4.494.826.787
	TIR	7%	7%	7%
5	VAN	\$-7.926.659.850	\$-6.570.214.701	\$-4.967.763.849
	TIR	5%	5%	5%

En ningún escenario, al igual que en el caso base, no se obtiene una rentabilidad privada, pese a la disminución tanto del 25 % del costo, como de la tasa de descuento.

Tabla: Sensibilización con reducción del 35% de los costos para distintas tasas de descuento

Categoría	Tecnología	TD		
	LED	14%	12%	10%
1	VAN	\$-180.103.486.496	\$-145.825.777.049	\$-105.395.755.482
	TIR	-	-	-
2	VAN	\$-69.962.883.176	\$-57.071.417.671	-41860508815
	TIR	-	-	-
3	VAN	\$-15.452.815.638	\$-13.068.800.973	\$-10.249.761.153
	TIR	5%	5%	5%
4	VAN	\$-5.932.400.123	\$-4.210.265.117	\$-2.186.207.290
	TIR	8%	8%	8%
5	VAN	\$-5.924.895.967	\$-4.652.699.145	\$-3.153.801.839
	TIR	7%	7%	7%

Nuevamente, pese a la reducción de la tasa de descuento y una reducción del 35% de los costos de la tecnología LED, no es posible obtener proyectos rentables para la inversión privada.

Tabla: Sensibilización con reducción del 50% de los costos para distintas tasas de descuento

Categoría	Tecnología	TD		
	LED	14%	12%	10%
1	VAN	\$-95.472.546.915	\$-64.677.837.156	\$-28.537.203.051
	TIR	-	-	-
2	VAN	\$-37.674.516.741	\$-26.094.989.491	\$-12.500.622.495
	TIR	-	-	-
3	VAN	\$-9.037.505.321	\$-6.904.421.179	\$-4.395.018.891
	TIR	7%	7%	7%
4	VAN	\$-2.510.810.050	\$-977.084.764	\$817.875.999
	TIR	11%	11%	11%
5	VAN	\$-2.967.318.972	\$-1.826.645.793	\$-489.040.695
	TIR	9%	9%	9%

Finalmente para una disminución de un 50% del costo, sólo para la categoría 4 (una de las menos eficientes en términos de parque), logra obtener un valor rentable, únicamente para una tasa de descuento de 10%.

De este escenario se puede concluir que, pese a fuertes reducciones de los precios, los proyectos únicamente de remplazo del parque de AP por tecnología LED, no son rentables para un inversionista privado.

4.3.4. Escenario 4 evaluación privada: Variación tasa de descuento, disminución del costo tecnológico e incremento del precio de potencia y energía

Para el presente escenario, además de lo descrito en el escenario 3, además se fluctuarán los precios de energía y potencia, de manera de aumentar el beneficio económico y obtener un “mix de variables” que viabilicen el recambio del parque actual por tecnología LED. Por tanto, se considerará una tasa anual de crecimiento del valor de la energía de 6% y de 0,96% para el caso de la potencia.

A continuación se presentan los resultados de dicha sensibilización.

Tabla: Sensibilización con reducción del 35% de los costos para distintas tasas de descuento e incremento del precio de la energía y potencia

Categoría	Tecnología	TD		
	LED	14%	12%	10%
1	VAN	\$-146.657.342.206	\$-108.578.616.678	\$-63.737.385.208
	TIR	-	-	-
2	VAN	\$-57.521.729.012	\$-43.212.952.934	-26.356.814.616
	TIR	7%	7%	7%
3	VAN	\$-13.223.385.595	\$-10.582.263.358	\$-7.464.413.397
	TIR	6%	6%	6%
4	VAN	\$-4.259.244.186	\$-2.348.608.190	\$-105.798.645
	TIR	10%	10%	10%
5	VAN	\$-4.810.820.255	\$-3.411.825.701	\$-1.765.686.699
	TIR	8%	8%	8%

Si bien, en comparación con el escenario base, los resultados económicos mejoran, aún pese a la disminución de costo de 35% y un incremento en el precio de la energía y potencia, el recambio no resulta rentable.

Tabla: Sensibilización con reducción del 50% de los costos para distintas tasas de descuento e incremento del precio de la energía y potencia

Categoría	Tecnología	TD		
	LED	14%	12%	10%
1	VAN	\$-66.893.073.864	\$-32.844.891.464	\$7.073.416.456
	TIR	-	-	-
2	VAN	\$-27.004.139.785	\$-14.216.190.894	\$781.027.144
	TIR	-	-	-
3	VAN	\$-7.018.128.568	\$-4.659.213.300	\$-1.887.946.081
	TIR	9%	9%	9%
4	VAN	\$-898.514.095	\$821.029.365	\$2.831.830.151
	TIR	13%	13%	13%
5	VAN	\$-1.973.034.792	\$-719.426.050	\$749.303.120
	TIR	11%	11%	11%

A diferencia del caso anterior, al reducir los costos en un 50% y aumentando el precio de la energía y de la potencia en 6% y 0,96% respectivamente, se obtienen proyectos rentables para la categoría 4, con tasas de descuento de hasta 12%, además de la categoría 5 para el caso de tasa de descuento de 10%.

4.3.5. Escenario 5 evaluación social: Incremento en el costo tecnológico

Tal como se indica anteriormente, los escenarios de sensibilización realizados para la evaluación social, no son los mismos que para la evaluación privada, debido a que no se consideran aquellos resultados no rentables por amplio margen en la situación base.

En este escenario se sensibiliza la evaluación social mediante un incremento en el costo de la tecnología para VSAP, considerando sólo el reemplazo de las lámparas y balastos (manteniendo las luminaria), se evaluarán incrementos de los costos en 30%, 50% y 75%

Además, para el caso de luminarias LED, se realizará el mismo análisis pero con una disminución de costo tecnológico en 10%, 25% y 35%.

A continuación se presenta la tabla con los resultados respectivos, se hace presente que todos los criterios de evaluación fueron definidos previamente en este mismo capítulo.

Tabla: Sensibilización con incrementos costo tecnología VSAP

Categoría	Tecnología	Incremento Costo Tecnología		
	VSAP	30%	50%	75%
1	VANS	\$-27.443.567.732	\$-33.949.468.495	\$-42.081.844.448
	TIRS	-3%	-5%	-6%
	VAC	\$105.384.282.180	\$111.284.463.718	\$118.659.690.641
2	VANS	\$-3.425.197.165	\$-5.955.279.189	\$-9.117.881.719
	TIRS	3%	1%	-1%
	VAC	\$45.662.512.100	\$47.640.604.548	\$50.113.220.107
3	VANS	\$2.331.994.347	\$1.841.202.804	\$1.227.713.375
	TIRS	16%	13%	10%
	VAC	\$11.037.663.266	\$11.297.291.252	\$11.621.826.234
4	VANS	\$3.184.504.418	\$2.791.515.570	\$2.300.279.510
	TIRS	24%	21%	18%
	VAC	\$9.072.399.778	\$9.221.759.046	\$9.408.458.131
5	VANS	\$1.941.669.587	\$1.828.574.700	\$1.687.206.091
	TIRS	21%	19%	17%
	VAC	\$6.128.266.890	\$6.376.098.924	\$6.685.888.967

Como era de esperar, en base a análisis previos realizados a dicha tecnología, se obtiene una gran cantidad de categorías rentables para distintos escenarios de incremento de costo tecnológico. Ahora bien, respecto a escenario base, un incremento en los costos a partir del 30%, ocasiona que el remplazo propuesto no sea socialmente rentable.

A continuación, se presentan los resultados de la sensibilización para el remplazo por tecnología LED, considerando la reducción de los costos de ésta en 10%, 25% y 50%.

Tabla: Sensibilización con reducción costos Tecnología LED

Categoría	Tecnología	Disminución Costo Tecnología		
	LED	-10%	-25%	-35%
1	VANS	\$175.299.147	\$68.120.253.861	\$113.416.890.337
	TIRS	6%	-	-
	VAC	\$1.216.326.277.555	\$1.090.277.455.027	\$1.006.244.906.675
2	VANS	\$-2.546.236.946	\$23.285.288.199	\$40.506.304.963
	TIRS	-	-	10%
	VAC	\$459.757.299.908	\$411.835.664.778	\$379.887.908.025
3	VANS	-3.262.214.130	\$1.821.706.088	\$5.210.986.233
	TIRS	5%	7%	9%
	VAC	87.658.188.831	\$78.226.698.886	\$71.939.038.922
4	VANS	\$3.227.397.603	\$6.283.067.455	\$8.320.180.689
	TIRS	8%	10%	13%
	VAC	\$57.936.604.494	\$52.267.845.298	\$48.488.672.501
5	VANS	\$471.513.014	\$2.901.698.997	\$4.521.822.986
	TIRS	6%	9%	11%
	VAC	\$43.943.517.151	\$39.435.131.163	\$36.429.540.505

Sólo bajo este análisis, la tecnología LED arroja valores positivos en prácticamente todas las categorías, salvo en la 2 y 3 con una disminución de costo de un 10%. Ahora bien, con reducción de costos del 25%, todas las alternativas resultan socialmente rentables.

4.4. Evaluación económica privada y social del reemplazo de tecnologías ineficientes por VSAP o LED

Como pudo observarse, en base al catastro actualizado y la categorización cualitativa presentada en los capítulos anteriores, el parque de AP nacional está compuesto en su gran mayoría por tecnología eficiente, pese a lo anterior, existe aún un 10.99% de éste que se considera malo, muy malo o extremadamente malo (en particular 266.001

puntos de iluminación). Por tanto, el primer paso a seguir debiera corresponder al reemplazo de este parque, tomando como hipótesis que a la fecha aún no ha sido reemplazado³, para lo cual, las inversiones necesarias son las que se presentan a continuación⁴.

Tabla: Inversiones requeridas por categoría de Municipios para reemplazo

Categoría	LED	VSAP sin luminaria	VSAP con luminaria
	Inversión \$		
1	\$19.613.905.481	\$1.742.796.792	\$4.423.984.150
2	\$37.110.132.078	\$3.186.767.013	\$8.308.793.957
3	\$18.807.871.300	\$1.600.339.067	\$4.208.146.724
4	\$17.545.929.435	\$1.620.279.200	\$4.195.619.987
5	\$22.521.170.355	\$1.931.348.100	\$5.036.498.307
Total	\$115.599.008.649	\$10.081.530.171	\$26.173.043.125
Total en US\$	\$231.198.017	\$20.163.060	\$52.346.086

A modo de comparación en términos presupuestarios, de acuerdo a la información disponible, para el año 2011, el FNDR poseía un presupuesto del orden de los 20 mil millones de pesos, presupuesto que duplica el nivel de inversión requerido para el reemplazo de la totalidad del parque ineficiente (considerando mantener la luminaria actual). Además, si se quisiese realizar un recambio de luminaria completa de VSAP, se requeriría del orden de 1,3 veces el presupuesto del FNDR del 2011, mientras que para el recambio por tecnología LED, sería necesario un presupuesto del orden de 6 veces.

Determinadas las inversiones, en las siguientes tablas se presentan los resultados de las evaluaciones económicas (privada y social), utilizando los mismos criterios expuestos anteriormente.

Tabla: Evaluación privada de recambio de tecnologías ineficientes

Evaluación Privada						
Categoría	LED		VSAP sin luminaria		VSAP con luminaria	
	TIR	VAN	TIR	VAN	TIR	VAN
1	4%	\$-9.178.745.467	41%	\$2.191.110.176	13%	\$-12.413.010.424
2	4%	\$-18.602.146.778	37%	\$3.411.734.364	11%	\$-1.093.052.779
3	4%	\$-9.531.889.173	37%	\$1.744.545.007	11%	\$-549.003.726
4	5%	\$-7.857.024.731	37%	\$1.792.571.790	11%	\$-471.744.076
5	3%	\$-12.413.010.424	16%	\$129.484.907	0%	\$-2.566.229.358

³ Se hace presente que los datos disponibles corresponden al catastro realizado el año 2005. A la fecha, es probable que la cantidad de puntos ineficientes haya disminuido.

⁴ Los reemplazos de VSAP, ya sea con o sin luminaria, incluyen el recambio del balasto.

Tabla: Evaluación social de recambio de tecnologías ineficientes por LED

Evaluación Social			
Categoría	LED		
	TIRS	VANS	VAC
1	7%	\$642.685.001	\$39.066.728.393
2	6%	\$-466.928.116	\$72.252.559.785
3	6%	\$-346.224.769	\$36.517.955.635
4	7%	\$1.490.206.612	\$35.872.200.311
5	5%	\$-1.816.122.057	\$42.329.017.959

Tabla: Evaluación social de recambio de tecnologías ineficientes por VSAP

Evaluación Social						
Categoría	VSAP sin luminaria			VSAP con luminaria		
	TIRS	VANS	VAC	TIRS	VANS	VAC
1	57%	\$5.008.266.081	\$7.946.363.794	17%	\$2.435.488.418	\$10.697.512.621
2	52%	\$8.209.691.812	\$13.568.910.637	14%	\$3.294.766.166	\$18.824.589.014
3	52%	\$4.197.871.757	\$6.893.743.707	14%	\$1.695.506.800	\$9.569.598.102
4	52%	\$4.371.004.949	\$7.130.072.002	15%	\$1.899.794.114	\$9.772.612.355
5	22%	\$1.613.321.153	\$4.874.074.711	0%	\$-1.366.277.071	\$8.060.249.047

Como era de esperar, se incrementa la rentabilidad de todos los proyectos en comparación a las evaluaciones realizadas anteriormente, esto debido a que sólo se evalúa el reemplazo del parque ineficiente. Pese a lo anterior, la tecnología LED aún no presenta resultados rentable en términos privados, pero en los resultados de evaluación social se puede apreciar dos categorías que arrojan valores de VANS positivo, mientras que en las restantes la TIRS es cercana a la Tasa de Descuento Social (6%). Esto último implica que, ante una eventual disminución del costo tecnológico, el recambiar tecnologías no eficientes por tecnología LED entregaría resultados rentables en términos sociales.

El reemplazo por VSAP, lámpara y balasto, entrega resultados rentables en términos privados para todas las categorías de comunas, no así en el caso del recambio por toda la luminaria. Ésta última, entrega resultados rentables en términos sociales.

En base a los resultados anteriores, se recomienda el reemplazo de las tecnologías ineficientes por VSAP (manteniendo la luminaria actual), debido a que éste reemplazo presenta altas rentabilidades en términos privados, lo que permitiría la utilización de un modelo ESCO. Cabe destacar que ésta recomendación se basa en que el 10,99% del parque es ineficiente, lo cual puede haber disminuido notoriamente desde el año 2005 a la fecha.

Ligado a lo anterior, y en el escenario de que a la fecha el parque ineficiente haya sido reemplazado por tecnología considerada eficiente, se debiera mantener los reemplazos de VSAP actuales, por la misma tecnología (procurando incentivar la utilización de aquellos equipos de mejor eficacia lumínica dentro de la misma

tecnología), otra alternativa es la entrada de nuevos actores más agresivos en términos comerciales, que estén dispuestos a obtener menores márgenes

Otra opción a considerar es la participación directa de los fabricantes de tecnología, lo cual implicaría una reducción de los costos de inversión, ya que los márgenes de los distribuidores fluctúa entre el 30 y 80%, según la tecnología, lo que perjudica considerablemente los resultados económicos. Además, la participación de los fabricantes, podría potenciar el desarrollo del modelo ESCO, debido a que las empresas fabricantes, no suelen tener barreras para el financiamiento de sus proyectos

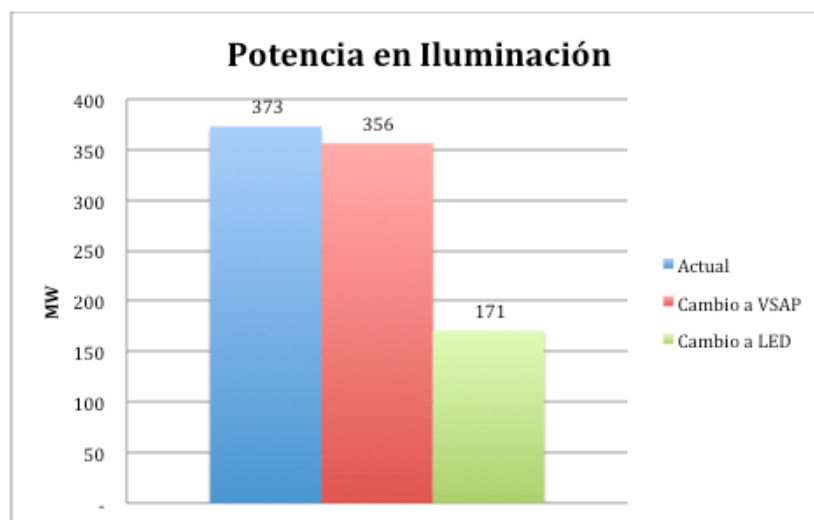
Finalmente, se hace presente que, dados los resultados expuestos en éste escenario, existen proyectos con rentabilidades privadas que podrían ser abordados bajo el modelo ESCO, por tanto, es recomendable contar con los mecanismos necesarios para que las municipalidades puedan optar por este tipo de contratos.

4.5. Beneficios a nivel País

El parque nacional en base al catastro del año 2005 y completado en este estudio, arroja cerca de 2,42 millones de luminarias equivalentes a 373 MW, equivalentes al 2% de la potencia instalada bruta de todos los sistemas eléctricos en Chile. En términos de Gases Efecto Invernadero (GEI), equivale a emitir 626 mil toneladas de CO₂ equivalente al año a la atmósfera, con todos los efectos nocivos que estos produce.

El reemplazar por tecnología VSAP, significaría reducir la potencia asociada de AP a 356 MW, disminuyendo en 28 mil toneladas de CO₂ equivalente y en el escenario de reemplazar por tecnología LED significaría bajar a 171 MW, o sea 330 mil toneladas de CO₂ equivalente al año⁵.

⁵ Los datos anteriores fueron estimados en base a la potencia instalada en los distintos sistemas eléctricos en el país (18.278 [MW] y un factor de emisión de 0,46 [ton/MWh]

Gráfico: Ahorro de Potencia en iluminación por cambio de AP

En el caso de implementar un modelo ESCO, lo cual depende de que exista rentabilidad privada al evaluar los proyectos de recambio y de un cambio en la política de AP en el país, permitiría obtener con mayor velocidad los recambios de tecnologías no eficientes, sin utilizar recursos públicos para ello como es hoy en día. De esta manera, no se dependería de un presupuesto público, sino que el financiamiento vendría de fondos privados. Lo anterior, significaría al Estado chileno liberar recursos del FNDR que se invierten en AP (del orden de \$20.000MM al año), los cuales podrían ser utilizados en otras áreas.

Si se tomara la decisión de realizar un recambio masivo por tecnología LED, el costo de inversión sería del orden de 2.000 millones de dólares, con beneficios energéticos globales de 130 millones de dólares anuales. Para un recambio por VSAP, los ahorros serían del orden de 8,6 millones de dólares anuales con una inversión asociada de 492 millones de dólares en el caso de recambio de luminaria completa y de 201 millones de dólares en el caso de recambio de lámparas y balastos.

Otros beneficios complejos de cuantificar, serían:

- Disminución de pérdidas energéticas en sistema de distribución;
- Mejor tipo de iluminación (eficacia lumínica), lo cual se traduce en mayor seguridad y menor accidentabilidad;
- Mejora de seguridad energética;
- Reducción de potencia máxima en horario punta;
- Prevención de lesiones producto de accidentes nocturnos;
- Reducción de la delincuencia callejera;

- Reducción del miedo a la delincuencia callejera;
- Promoción del transporte sostenible, como el transporte público y caminar y ciclismo;
- Facilitar la inclusión social;
- La promoción del desarrollo económico, y
- Ayudar a los servicios de emergencia en la identificación de lugares.

4.6. Beneficios a nivel municipal segmentado por eficiencia tecnológica:

Los beneficios producto de recambios masivos, ya sea por tecnología LED o VSAP se muestran a continuación en al siguiente tabla.

Tabla: Beneficios a nivel municipal por cambio de tecnología de AP

Categoría	LED		VSAP	
	Beneficios Ahorro Energía Anual	Beneficios Ahorro Potencia Anual	Beneficios Ahorro Energía Anual	Beneficios Ahorro Potencia Anual
1	\$20.880.571.868	\$12.962.687.793	\$891.477.194	\$553.430.271
2	\$7.733.820.468	\$4.801.166.405	\$825.930.490	\$512.738.786
3	\$1.355.395.520	\$841.431.407	\$378.668.288	\$235.077.795
4	\$1.197.753.594	\$743.567.082	\$411.592.427	\$255.517.146
5	\$724.269.381	\$449.627.430	\$145.954.806	\$90.608.945
Total \$	\$31.891.810.832	\$19.798.480.118	\$2.653.623.205	\$1.647.372.943
Total US\$	\$63.783.622	\$39.596.960	\$5.307.246	\$3.294.746

Haciendo un análisis de beneficios económicos por comuna, se dividió el beneficios de energía sumado al de potencia, dividido el número de comunas por cada categoría. Los resultados de beneficios anuales son los siguientes.

Tabla: Beneficios anuales por cada categoría, sumados beneficios de energía y potencia

Categoría	Beneficios LED	Beneficios VSAP
1	\$260.332.767	\$11.114.673
2	\$84.695.857	\$9.045.063
3	\$73.227.564	\$20.458.203
4	\$121.332.542	\$41.694.348
5	\$55.899.848	\$11.264.941

5. PROPUESTA DE MODELO DE GESTIÓN Y FINANCIAMIENTO PARA UN PROGRAMA DE RECAMBIO Y RENOVACIÓN DE AP EN CHILE.

5.1. Funcionamiento del mercado de alumbrado público en Chile, debilidades y barreras para el desarrollo de la EE.

En el informe de avance N° 1 se realizó un completo análisis jurídico y de mercado (años 2011 y 2012) en relación a la provisión de alumbrado público (AP) en Chile. Las principales conclusiones que se obtuvieron fueron las siguientes:

5.1.1. Roles y atribuciones de autoridades públicas en materia de AP

- a) **Ministerio de Energía:** Tiene a su cargo elaborar y coordinar los planes, políticas y normas para el buen funcionamiento y desarrollo del sector energético, velar por su cumplimiento y asesorar al Gobierno en todas aquellas materias relacionadas con la energía. El sector energía comprende todas las actividades de estudio, exploración, explotación, generación, transmisión, transporte, almacenamiento, distribución, consumo, uso eficiente, importación y exportación, y cualquiera otra que concierna a la electricidad, carbón, gas, petróleo y derivados, energía nuclear, geotérmica y solar, y demás fuentes energéticas.

En consecuencia, toda reglamentación general relativa al alumbrado público es materia de competencia del Ministerio de Energía.

- b) **Ministerio de Medio Ambiente:** es el órgano del Estado encargado de colaborar con el presidente de la República en el diseño y aplicación de políticas, planes y programas en materia ambiental, así como en la protección y conservación de la diversidad biológica y de los recursos naturales renovables e hídricos, promoviendo el desarrollo sustentable, la integridad de la política ambiental y su regulación normativa.

En consecuencia, toda reglamentación general relativa a la disposición final del alumbrado público, es materia de competencia del Ministerio de Medio Ambiente, en conjunto con el Ministerio de Salud, en caso que las normas respectivas tengan por objeto no solo la protección del ambiente, sino que también la salud de las personas.

- c) **Superintendencia de Electricidad y Combustibles:** El objeto de la SEC es fiscalizar y supervigilar el cumplimiento de las disposiciones legales y reglamentarias, y normas técnicas sobre generación, producción, almacenamiento, transporte y distribución de combustibles líquidos, gas y electricidad, para verificar que la calidad de los servicios que se presten a los

usuarios sea la señalada en dichas disposiciones y normas técnicas, y que las antes citadas operaciones y el uso de los recursos energéticos no constituyan peligro para las personas o cosas.

En consecuencia, en materia de AP le corresponderá fiscalizar el cumplimiento de las normas reglamentarias pertinentes en materia de AP.

- d) Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE):** organismo público / privado encargado de la ejecución de planes de EE encargados por el Ministerio de Energía, mediante convenio, o que le sea encomendado por cualquier otra entidad de carácter público o privado.
- e) Municipalidades:** Corporación autónoma de derecho público, con personalidad jurídica y patrimonio propio, a quien corresponde la administración de una comuna o agrupación de comunas, y cuya finalidad es satisfacer las necesidades de la comunidad local y asegurar su participación en el progreso económico, social y cultural de la comuna o agrupación de comunas. Está constituida por un alcalde y un concejo comunal electos directamente por un periodo de 4 años, renovable.

La municipalidad se rige por la Ley Orgánica Constitucional de Municipalidades (Ley N° 18.695). Actualmente existen 345 municipalidades y 346 comunas, pues la municipalidad de Cabo de Hornos administra la agrupación de comunas de Cabo de Hornos y Antártica.

En materia de AP, la ley le encomienda a la Municipalidad la administración y gestión del servicio de AP.

- f) Gobiernos Regionales (GORE):** El Gobierno Regional es el encargado de la administración superior de cada una de las regiones de Chile. Tiene por objeto el desarrollo social, cultural y económico de la región. Para el ejercicio de sus funciones, el gobierno regional goza de personalidad jurídica de derecho público y tiene patrimonio propio. Está constituido por el Intendente, que es designado por el Presidente de la República para ejercer el cargo, y por el Consejo Regional, cuyos consejeros son electos directamente.

En el GORE la iniciativa para presentar propuestas reside en el Intendente. Al Consejo le corresponde aprobar, modificar o sustituir dichos planes. Luego, es el Intendente quien debe ejecutar lo aprobado por el Consejo.

Asimismo, al Consejo le corresponde fiscalizar el desempeño del Intendente como Presidente del Consejo, el que debe dar una cuenta de su gestión al menos una vez al año, presentando el balance de la ejecución presupuestaria y el estado de la situación financiera.

En materia de AP, hasta el año 2011 el GORE, a través de la asignación de recursos correspondiente al Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR), fue el principal proveedor de financiamiento para proyectos de recambio de AP.

5.1.2. Proceso de adquisición de AP, situación vigente:

El sujeto obligado a proveer AP de acuerdo a la legislación chilena es la Municipalidad. Por tanto, la administración y gestión del alumbrado público se enmarca dentro de las atribuciones esenciales de las municipalidades, las que cuentan con un alto grado de autonomía para la gestión de sus funciones.

Para reseñar la situación vigente del proceso de adquisición de AP en Chile, haremos el análisis a partir del diseño de un proceso “completo” de recambio de AP, el que de llevarse adecuadamente debería arrojar como resultado un proyecto que mejora la EE en relación a la situación base. Las etapas que hemos considerado esenciales son las siguientes:

Etapas de un proceso de recambio de AP para un proyecto de EE



Fuente: elaboración propia

La situación vigente a la fecha puede ser descrita de la siguiente manera:

a) Etapa 1 (catastro):

No existe en Chile un catastro nacional total, georeferenciado y actualizado. En cuanto a catastros municipales, se desconoce la cantidad de Municipios que puedan tener la información y la calidad de ésta. Asimismo, no existe un estándar común validado para el desarrollo de un catastro georeferenciado⁶.

b) Etapas 2 y 3 (auditoría y proyecto):

Del análisis de las licitaciones de los últimos dos años (70 en total mediante las cuales se adquirieron 131.601 luminarias de distintas potencias y tecnologías), no aparece en los antecedentes que exista en dichos procesos auditorías y proyectos técnico / económicos que definan el proyecto más costo eficiente para la realidad comunal. No obstante, cabe señalar que todos los proyectos financiados con fondos FNDR a partir del año 2012, tuvieron que ser aprobados por las respectivas Secretarías Regionales de Planificación, en base a la “Metodología de Formulación y Evaluación Socioeconómica de Proyectos de Reemplazo de Alumbrado en la Vía Pública – Ministerio de Desarrollo Social”, la que fue aprobada en noviembre de 2011.

c) Etapa 4, Fuente de financiamiento:

Durante el año 2011 se desarrollaron 32 procesos de licitación por un monto total de \$ 8.940.474.184; por su parte, en el año 2012 se desarrollaron 38 procesos de licitación por un monto total de \$ 38.297.282.058.-

La mayor fuente de financiamiento es el FNDR, el cual financió 45 proyectos adjudicados por \$24.057.016.763.-, lo que representa el 50,9% del total del monto adjudicado.⁷

De acuerdo a cifras de la Subsecretaría de Desarrollo Regional (Subdere), se comprometieron en 2011 un total de \$22.082.309.091.- en proyectos de AP, pero el monto efectivamente solicitado fue de \$8.491.156.793.-; y en el año 2012 se comprometieron un total de \$17.635.052.719.- en proyectos de AP, siendo solicitados \$10.764.353.566.-.

La segunda fuente de financiamiento es el propio adjudicatario, por un total de \$21.528.229.758.- (5 licitaciones), lo que corresponde a un 46% del total de montos

⁶ Cabe señalar que el año 2013 el Ministerio de Energía está llevando a cabo un proyecto de catastro de AP a nivel nacional, georeferenciado, el que alcanzará una cobertura de ____ puntos. A nuestro juicio, el estándar determinado en este proyecto debe ser el estándar para realizar todo catastro a nivel comunal.

⁷ En informe de avance se presentó un completo capítulo sobre fuentes de financiamiento de AP.

adjudicados en los años 2011 y 2012⁸. Esta situación es nueva en el mercado de alumbrado público en el país, y podría representar un complemento significativo a los recursos públicos comprometidos, vía FNDR, para lograr acelerar el recambio de AP.

Cabe señalar que revisados los 5 proyectos que contemplan esta figura, a nuestro juicio dichos contratos no son propiamente contratos “Esco”, y la figura jurídica utilizada no sería, en principio, la más acorde con la naturaleza del objeto de contratación.

En cuanto a fondos municipales, en los dos años de análisis se comprometieron sólo \$1.373.132.914.- (3% del total de monto adjudicado).

d) Etapas 5 y 6 (bases de licitación y análisis de propuestas):

En general, no existen capacidades instaladas a nivel municipal para desarrollar estas etapas. De hecho, desde el año 2007 se vienen realizando capacitaciones tanto por parte del Ministerio de Energía, AChEE y SEC⁹ para capacitar a funcionarios municipales en esta materia, no obstante las limitaciones que tiene ese proceso se asocian a la rotación del personal capacitado, junto con la dificultad de actualización tecnológica que existe en materia de AP, el cual presenta un panorama extremadamente dinámico en los últimos 5 años.

Para derribar esta barrera de “know how” tecnológico, la AChEE desarrolló durante el año 2010 un “Servicio de Asistencia Técnica en Alumbrado Público a Municipios”, el cual fue proveído por la empresa Deuman. Dicho proyecto consistía en asesorar a un número específico de municipios del país en sus proyectos de alumbrado público y

⁸ Cabe señalar que si bien no se comprometió un análisis de las licitaciones del año 2013, se realizó una búsqueda similar a la realizada para los años 2011 y 2012, con el objeto de identificar si al mes de agosto existían otros procesos de recambio de AP financiados por el oferente. En efecto, aparecen dos licitaciones para 4.500 y 1.000 puntos, que totalizan un monto de \$ 3.316.262.369.- ambas asociadas a tecnología LED.

⁹ En el informe final de la consultoría **“Diseño e Implementación Servicio de Asistencia Técnica en Alumbrado Público a Municipios” (octubre de 2010)**, se señala: “Por otra parte, el PPEE, desde junio del año 2007 a la fecha, ha apoyado técnicamente a distintos municipios en la incorporación de criterios y elementos que contribuyen a la Eficiencia Energética (EE) en los sistemas de alumbrado público, en particular el alumbrado vial. A la luz de los hechos, se observa que las capacidades técnicas al interior de los municipios son limitadas, lo que impide, en una primera etapa, desarrollar proyectos sustentables de alumbrado público que contemplen criterios de eficiencia energética y plantear apropiadamente las bases técnicas con sus especificaciones, y en una segunda etapa, evaluar técnicamente las ofertas recibidas y el cumplimiento de los requerimientos estipulados en tales bases.”

Asimismo, en un informe intermedio de la consultoría, se expresa “Debido a la experiencia de Deuman en trabajos de consultoría con municipalidades (incluidas consultorías en el ámbito del alumbrado público), se pudo detectar desde el principio del estudio la dificultad en la recolección de información requerida a las municipalidades, esto causado en muchas ocasiones por problemas organizacionales de los municipios o bien, porque para el caso de este estudio se previó la evidencia de falta de personal específico en el área de alumbrado público en el municipio.”

orientarlos hacia la utilización de criterios de eficiencia energética. El Servicio de Asistencia Técnica para Proyectos de Alumbrado Público a Municipios contaba con tres niveles de atención: Asistencia Técnica Vía Página Web, Asistencia Técnica Telefónica (se habría realizado sólo una consulta) y Asistencia Técnica Presencial (se habrían realizado 6 asistencias).

Lamentablemente no existe una evaluación de dicha consultoría, y el informe final no presenta conclusiones ni recomendaciones. No obstante, dado el conocimiento de dicho proyecto por parte del equipo consultor, el análisis de las licitaciones realizadas en los dos últimos años y el conocimiento del mercado, se puede señalar que el proceso de elaboración de bases técnicas de licitaciones de AP y evaluación de las propuestas, presentan las siguientes deficiencias:

- Las Municipalidades no cuentan con personal calificado y actualizado en materia de tecnologías de alumbrado público, análisis financiero y modelos de negocios innovadores para el recambio de AP. Lo mismo sucede con el Gobierno Regional.
- Los procesos de licitación de AP se producen con enormes asimetrías de información, entre proveedor tecnológico y Municipio.
- Generalmente no se cuenta con un “proyecto técnico económico”, basado en un catastro y auditoría energética, ni con modelos de M&V para comprobar resultados posteriores.

Por otra parte, del análisis de las 70 licitaciones realizadas en los años 2011 y 2012, se observa que no existe un modelo único de contratación, en cuanto a los trabajos que solicitan al adjudicatario de la licitación¹⁰. Del análisis de la información, podemos obtener la siguiente tabla:

¹⁰ Los trabajos realizados corresponden a las labores que los adjudicatarios tuvieron que desempeñar durante el periodo de contrato, en el marco de la provisión del alumbrado público. Es así como encontramos los siguientes trabajos:

- **Retiro:** En las licitaciones que tienen por objeto la reposición de luminarias (ganchos, postes y luminarias en algunos casos), el retiro forma parte de los trabajos encomendados por el municipio. Es decir que la empresa adjudicada tiene como misión retirar los materiales caducados para el remplazo. Generalmente lo retirado se debe almacenar en alguna bodega del municipio, en el caso que los artefactos aún tuvieran utilidad, y en los casos en los que los artefactos son inutilizables, es de responsabilidad de la empresa el material retirado.
- **Instalación:** Este trabajo es válido tanto para las licitaciones de reposición como las de ampliación del alumbrado público, ya que básicamente consiste en ubicar los artefactos nuevos en los lugares correspondientes. La instalación involucra actividades como la conexión de los artefactos para dar un correcto servicio. Este tipo de trabajo se puede dar cuando los municipios realizan el retiro por parte de ellos dejando a la empresa la sola labor de instalar los artefactos nuevos.

Tabla: Trabajos encomendados en licitaciones años 2011 y 2012 de AP

Trabajo realizado por la empresa	N° de licitaciones	Porcentaje (%) de las licitaciones
Instalación	10	14,28%
Retiro + Instalación	44	62,85%
Instalación + Mantención	2	2,85%
Retiro + Instalación + Mantención	10	14,28%
Trabajo no especificado	4	5,74%

Fuente: Elaboración propia con datos de la matriz de licitaciones 2011-2012.

En base a estos antecedentes, podemos decir entonces que el contrato más utilizado por los municipios corresponde al “retiro más instalación” y el menos utilizado es el de “instalación más mantención”; sin embargo la instalación es un trabajo medular en todas las licitaciones, excepto el 5% de licitaciones que no especifica acerca de los trabajos que se deber realizar.

e) Etapas 7, 8, 9 y 10 (actualización de catastro; M&V; capacitación; negociación tarifaria):

Del análisis de las 70 licitaciones de AP efectuadas en 2011 y 2012, podemos señalar lo siguiente:

- Sólo trece licitaciones en los dos últimos años consideraba como producto adicional la actualización del catastro de luminarias comunal.
- En relación a M&V, sólo siete licitaciones lo contemplan, pero establecen que la propia adjudicataria deberá acreditar ante el municipio el ahorro producido. Asimismo, no se contempla como obligación realizar la labor de M&V bajo protocolos internacionales.

-
- **Retiro más instalación:** Corresponde principalmente a la doble labor de retirar e instalar los artefactos que se utilizarán en el trabajo. Es la tarea conjunta del adjudicatario de los trabajos antes descritos.
 - **Mantención:** Este trabajo está sujeto a la labor del adjudicatario de poder dar un correcto funcionamiento en el tiempo a pesar de las adversidades. De este modo las mantenciones pueden ser correctivas (daño vandálico a un punto) como preventivas (ej. Limpieza).
 - **Instalación más mantención:** Este trabajo se encuadra en la tarea conjunta de instalar los artefactos nuevos y promover un servicio de mantención que permita una garantía en el tiempo del funcionamiento.

- Ninguna licitación contempla un proceso de instalación de capacidades en el Municipio en materia de AP y sólo 11 licitaciones contemplan que el adjudicatario colabore con el Municipio para un proceso posterior de negociación tarifaria con la compañía distribuidora eléctrica respectiva.

5.1.3. Facultades legales de contratación de los Municipios en materia de AP

En atención a la autonomía constitucional que tienen las Municipalidades, no se observan en la legislación vigente mayores restricciones jurídicas para la celebración de distintas formas contractuales que permitan abordar la administración del alumbrado público, como puede ser la compra de luminarias, su arriendo vía leasing o la contratación del suministro de alumbrado público y, por cierto, su financiamiento vía una ESCO.

La mayor restricción para los municipios viene de la regulación presupuestaria, que les prohíbe la realización de pagos diferidos, es decir sujetar el pago a un plazo distinto al cumplimiento de la obligación, lo que impide pagar la reposición o nuevas luminarias más allá del ejercicio presupuestario en que éstas sean instaladas¹¹. En la misma línea, no se les permite a los municipios endeudarse salvo autorización legal expresa.

En la práctica, las posibilidades de endeudamiento del Estado de Chile operan a través del Gobierno Central, dada la autorización anual que da el Congreso Nacional al Presidente de la República para contratar empréstitos. Los recursos que ingresen por esa vía podrían financiar un programa dirigido al recambio o instalación de nuevos sistemas de AP en los municipios.

Las actuaciones del Alcalde como administrador principal del gobierno comunal se encuentran limitadas por la necesidad de que el Concejo le autorice a proceder en determinadas operaciones. En atención a los montos involucrados en este tipo de contratos, parece ser que siempre se requerirá dicha aprobación. En la misma línea, si el respectivo contrato excede el periodo alcaldicio, el quórum de aprobación requerido es mayor (dos tercios).

En atención a los montos involucrados en este tipo de contratos y las causales de excepción que establece la regulación de compras públicas, estimamos que para la contratación de la provisión de alumbrado público, en cualquier forma que se adopte, debe procederse vía licitación pública. En dichas licitaciones deberían seguirse criterios formulados por la Fiscalía Nacional Económica para la licitación de servicios

¹¹ Esto no implica que esté limitada la posibilidad de contratar mediante el mecanismo de ESCO, dado que el servicio se presta de manera mensual, por lo que por su naturaleza corresponde que los pagos se hagan de acuerdo al avance del contrato.

de recolección, transporte y disposición de Residuos Sólidos Domiciliarios, en pos de garantizar la libre competencia;

Finalmente, las resoluciones que aprueben bases de licitación y contratos están exentas del trámite de toma de razón, lo que genera un trade-off, por un lado mayor rapidez del trámite, por otro, el riesgo de cuestionamientos posteriores por parte de la Contraloría General de la República (CGR), toda vez que las actuaciones de los municipios están sujetas a la fiscalización ex post del órgano contralor.

5.1.4. Disposición final de lámparas retiradas

En general, las licitaciones no incorporan dentro de los trabajos especificados el almacenamiento y destrucción por parte del oferente, sino que se solicita el almacenaje de los materiales retirados en una bodega municipal destinada para tales fines, con el objeto de proceder al remate de las luminarias y dar de baja del inventario municipal el activo (o incluso reutilizarlo para mejorar la iluminación de algunos sectores). En ciertas ocasiones, no se especifica en detalle dónde se dejarán los artefactos retirados, señalando las bases que serán el municipio o el inspector de obras del municipio el que establezca el lugar. Asimismo, en general los Municipios solicitan que el adjudicatario clasifique los materiales retirados y construir una nómina de su estado.

En el caso de aquellas licitaciones que incorporan un retiro de las luminarias y un almacenamiento por parte del oferente, no se establece una obligación específica respecto al cumplimiento de normas ambientales o sanitarias para la disposición final de estos artefactos, dado que no existe norma en Chile que reglamente de manera específica esta situación.

No obstante, cabe señalar que algunas de las tecnologías contienen residuos altamente contaminantes, como el mercurio, metal pesado y tóxico que es liberado al ambiente una vez que la ampolla es descartada. La cantidad de mercurio en una de éstas varía entre los 3 y 50 mg. En Chile, este tipo de residuos se encuentra regulado en el D.S. 148 del año 2003, del Ministerio de Salud, Reglamento Sanitario sobre manejo de residuos peligrosos.

En dicha normativa, el mercurio es considerado como “peligroso”, condición que implica una disposición final particular para los aparatos contaminantes, por lo que se obliga a que dichas tecnologías sean dispuestas en rellenos de seguridad especialmente diseñados, y no en rellenos sanitarios u otros vertederos autorizados que reciben otros tipos de residuos sólidos.

Establece el reglamento (Artículo 14) que *“Un residuo tendrá la característica de toxicidad extrínseca cuando su eliminación pueda dar origen a una o más sustancias tóxicas agudas o tóxicas crónicas en concentraciones que pongan en riesgo la salud de la*

población... Cuando la eliminación se haga a través de su disposición final en el suelo se considerará que el respectivo residuo tiene esta característica cuando el Test de Toxicidad por Lixiviación arroje, para cualquiera de las sustancias mencionadas, concentraciones superiores a las señaladas en la siguiente tabla:

Mercurio: Concentración máxima permisible = 0,2 mg/l"

A su vez, el artículo 90 establece que deben ser considerados "peligrosos" para efectos de su eliminación conforme el reglamento, los residuos de *"Montajes eléctricos y electrónicos de desecho o chatarras de éstos que contengan componentes como baterías incluidas en la presente Lista A, interruptores de mercurio, vidrios de tubos de rayos catódicos y otros vidrios activados y capacitores de PCB, o contaminados con constituyentes de la Lista II del artículo 18 (por ejemplo, cadmio, mercurio, plomo, bifenilo policlorado) en concentraciones tales que hagan que el residuo presente alguna característica de peligrosidad"*(Lista A, A 1180).

5.1.5. Análisis de Barreras

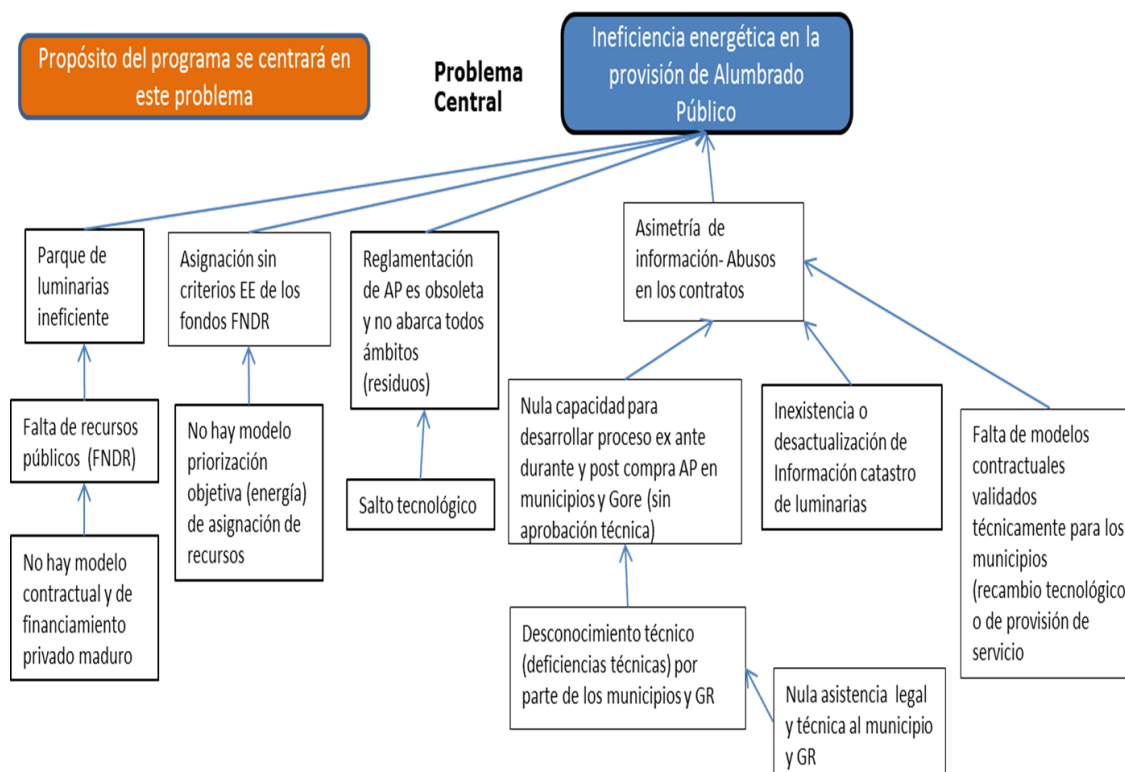
De acuerdo a los antecedentes antes expuestos, se elaboró un mapa de barreras que ha sido validado en taller realizado con la contraparte técnica.

Para ello, se identificó el problema central que generan las barreras, el que se definió como "Ineficiencia Energética en la Provisión de Alumbrado Público". En relación a ese problema central, se identificaron una serie de causas (barreras) que generan dicha situación, las cuales se agrupan de la siguiente manera:

- a) Causas asociadas a asimetría de Información
 - i. Municipios no cuentan en general con expertos técnicos permanentemente actualizados.
 - ii. Gore no cuenta con expertos técnicos permanentemente actualizados.
 - iii. No existe catastro georeferenciado actualizado en la mayoría de los casos
 - iv. No existe auditoría que arroje un proyecto de recambio técnico y económico costo eficiente
 - v. Las bases de licitación no cuentan en general con estándares técnico, lo que genera en ocasiones "amarres" tecnológicos.
 - vi. El análisis de las ofertas se realiza con equipos técnicos que no siempre tienen el conocimiento para identificar diferencias en las ofertas.
- b) Causas asociadas a problemas normativos

- i. La normativa relativa a AP está desactualizada (ver capítulo correspondiente) frente al salto tecnológico de los últimos años.
- c) Causas asociadas a falta de modelos y protocolos
 - i. No existen modelos de licitaciones y contractuales generales validados por instancia técnica
 - ii. No existen protocolos para catastro y georeferenciamiento
 - iii. No se difunden ni utilizan los protocolos para M&V
- d) Causas asociadas a problemas de financiamiento
 - i. El FNDR ha destinado para todo el país en promedio los dos últimos años unos \$20.000 MM para proyectos de recambio de AP. Este presupuesto duplica el nivel de inversión requerido para el reemplazo de la totalidad del parque ineficiente, considerando mantener la luminaria actual. No obstante, si se requiere realizar un recambio de luminaria completa de VSAP, se requeriría del orden de 1,3 veces el presupuesto del FNDR del 2011, mientras que para el recambio por tecnología LED, sería necesario un presupuesto del orden de 6 veces.
 - ii. Los fondos FNDR no se priorizan conforme criterios de EE.
 - iii. Financiamiento privado es incipiente y no cuenta con modelos robustos y validados.
 - iv. Financiamiento privado, en teoría, no puede alcanzar a todos los Municipios dada la inexistencia de un sistema de garantía.

Gráficamente, las barreras señaladas pueden ser presentadas de la siguiente manera:

Figura: Barreras para el desarrollo de proyectos de EE en AP

Fuente: elaboración propia

5.2. Análisis tarifario.

5.2.1. Tarifas de distribución eléctrica

Los clientes sujetos a fijación de precios quedan regulados por una estructura de tarifas cuyas condiciones de aplicación se establecen en el Decreto Supremo N° 632 del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, del 13 de noviembre de 2000, rectificado por el Decreto Supremo N° 723 del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, del 14 de diciembre de 2000.

Los clientes cuya demanda máxima o potencia conectada sea superior a 2.000 KW, deben convenir con el proveedor de energía eléctrica de su preferencia, la tarifa para la facturación del suministro eléctrico, de acuerdo con lo dispuesto en el Artículo No.91 del D.F.L. No.1/82. En todo caso, tratándose de clientes cuya potencia conectada sea superior a 500 KW, a partir de marzo de 2006 el cliente tendrá derecho a optar por un régimen de tarifa regulada o de precio libre, por un período mínimo de cuatro años de permanencia en cada régimen. El cambio de opción deberá ser comunicado al proveedor de energía eléctrica con una antelación de, al menos 12 meses.

Los clientes afectos a regulación tienen la posibilidad de elegir libremente entre las opciones que se detallan más adelante, con las limitaciones establecidas en cada caso y dentro del nivel de tensión que les corresponda.

a. Niveles de tensión:

Los niveles de tensión de los clientes se clasifican como:

- Alta Tensión (AT): Para aquellos clientes conectados con un empalme a redes cuyo voltaje es superior a 400 Volts (normalmente 12 KV).
- Baja Tensión (BT): Para aquellos clientes que están conectados con su empalme a redes cuyo voltaje es inferior a 400 Volts (normalmente 220 o 380 Volts).

b. Tipos de facturación.

- **Facturación con medidor.**

Se aplica una tarifa monómica (energía y potencia) regulada (BT-1) donde se factura cargo fijo y energía; alternatively se aplica binómica BT-2 donde se factura cargo, energía y potencia. La energía queda determinada por el medidor correspondiente, mientras que la potencia total es función de la potencia conectada de las instalaciones.

- **Facturación sin medidor.**

Generalmente se ofrece una tarifa binómica acordada entre las partes basada en la tarifa BT-2. La potencia y la energía se estiman según el número y tipo de luminarias, una tabla de potencias establecida por el fabricante y las horas de uso según el período del año definidas por autoridad (Superintendencia de Electricidad y Combustible).

c. Tipos de tarifas.

1. BT1.

Esta es la opción tarifaria más sencilla, ya que sólo se mide la energía consumida. Se necesita para su implementación un medidor simple de energía. Pueden optar a esta tarifa aquellos clientes alimentados en baja tensión, cuya potencia conectada sea menor a 10 KW y aquellos clientes con potencia superior que instalen un limitador de potencia con la finalidad de cumplir este requisito. Esta tarifa comprende los siguientes cargos:

Cargo fijo mensual.

Este cargo cubre los gastos de lectura del medidor, proceso de facturación, despacho de la boleta/factura al lugar donde se efectuó el consumo y otros costos administrativos asociados. Este cargo se aplica incluso si el consumo es nulo.

Cargo único por uso del sistema troncal.

Este cargo cubre el costo por el uso de instalaciones del sistema de transmisión troncal. Se obtiene multiplicando los kWh registrados en el medidor durante el período de facturación por su precio unitario expresado en \$/kWh. Corresponde a un costo en el que incurren las empresas concesionarias de servicio público de distribución por el transporte de energía a través del sistema de transmisión troncal, el cual es transferido a los consumidores finales.

Cargo por energía base.

Para los meses comprendidos entre octubre y marzo, se obtiene multiplicando los kWh registrados por el medidor durante el período de facturación por el precio unitario de la energía base. Para los meses de abril a septiembre este cargo se aplica sólo a los kWh consumidos por debajo del límite de invierno.

Cargo por energía adicional de invierno.

Se aplica en cada mes del período comprendido entre el 1 de abril al 30 de septiembre, a cada kWh adicional consumido que exceda el límite de invierno. Este cargo se indica en la boleta o factura siempre que el consumo total del mes sea mayor que 430 kWh.

El límite de invierno de cada cliente será igual al mayor valor que resulte de comparar 350 kWh, con el promedio mensual de la energía consumida entre el 1 de octubre y el 31 de marzo, ambos inclusive, incrementado en un 20%.

BT2 y AT2.

Se denomina como potencia contratada y en ésta el cliente contrata una potencia de acuerdo a sus necesidades en la cual se necesitará instalar un interruptor de control de potencia (ICP) de capacidad igual a la contratada por el cliente¹². En esta tarifa se cobra la energía y la potencia a contratar, esta última se cobrará aunque el consumo del mes sea igual a cero. Esta opción tarifaria comprende los siguientes cargos:

Cargo fijo mensual.

Este cargo cubre costos tales como lectura, facturación, reparto y cobranza de las boletas, que no tienen relación con el consumo. Este cargo se aplica incluso si el consumo es nulo.

Cargo único por uso del sistema troncal.

¹² En la práctica se instala el ICP con la capacidad, disponible en el mercado, más cercana a la potencia que el cliente requiere contratar y la potencia contratada facturada corresponde a la capacidad del ICP instalado en el empalme del cliente.

Este cargo cubre el costo por el uso de instalaciones del sistema de transmisión troncal. Se obtiene multiplicando los kWh registrados en el medidor durante el período de facturación por su precio unitario expresado en \$/kWh.

Corresponde a un costo en el que incurren las empresas concesionarias de servicio público de distribución por el transporte de energía a través del sistema de transmisión troncal, el cual es transferido a los consumidores finales.

Cargo por energía.

Se obtiene multiplicando los kWh registrados por el medidor durante el período de facturación por el precio unitario de la energía.

Cargo por potencia contratada.

Se obtiene multiplicando los kW contratados por su precio unitario, siendo esto facturado todos los meses, independiente del consumo. El precio unitario del cargo por potencia contratada varía su valor según su grado de utilización en horas de punta. Dependiendo de esto, el consumo puede ser calificado como Presente en Punta o Parcialmente Presente en Punta.

Consumo presente en punta (PP).

Cuando la potencia contratada es usada manifiestamente durante las horas de punta del sistema eléctrico, independiente si dicha potencia es o no utilizada en el resto de las horas del año, el consumo es calificado como presente en punta y se le aplica el precio unitario correspondiente. Se entiende que la potencia contratada está siendo usada manifiestamente durante las horas de punta cuando la razón entre la demanda media del cliente en horas de punta y su potencia contratada, es mayor o igual a 0,5.

Consumo parcialmente presente en punta (PPE).

Cuando la potencia contratada es usada parcialmente durante las horas de punta del sistema eléctrico, independiente si dicha potencia es o no utilizada en el resto de las horas del año, el consumo es calificado como parcialmente presente en punta y se le aplica el precio unitario correspondiente. Se entiende que la potencia contratada está siendo usada parcialmente durante las horas de punta cuando la relación entre la demanda media del cliente en dichas horas de punta y su potencia contratada, es inferior a 0,5.

Nota: No obstante lo anterior, si por lo menos durante 5 días hábiles del mes, en períodos de 60 minutos consecutivos en las horas de punta, la razón entre la potencia media utilizada por el cliente y su potencia contratada supera 0,85, el consumo pasa a calificar como “presente en punta”.

Si el cliente es calificado como presente en punta y al final del período de contratación de la tarifa (12 meses) el consumo se ha comportado como parcialmente presente en

punta, el cliente podrá solicitar el cambio de modalidad o cambiarse a otra opción tarifaria.

BT3 y AT3.

El cliente paga solo por la potencia máxima del mes, entendiéndose como la potencia máxima del mes al mayor valor de la comparación entre la potencia máxima leída del mes y el promedio de las dos potencias máximas leídas en los últimos 12 meses con horas puntas. Según los horarios de utilización de potencia, será clasificado como presente en punta o parcialmente presente en punta. Esta opción tarifaria comprende los siguientes cargos:

Cargo fijo mensual.

Este cargo cubre costos tales como lectura, facturación, reparto y cobranza de las boletas, que no tienen relación con el consumo. Este cargo se aplica incluso si el consumo es nulo.

Cargo único por uso del sistema troncal.

Se obtiene multiplicando los kWh registrados en el medidor durante el período de facturación por el precio unitario de la energía.

Cargo por energía.

Se obtiene multiplicando los kWh registrados en el medidor durante el período de facturación por el precio unitario de la energía.

Cargo por demanda máxima.

Se calcula multiplicando la demanda máxima de facturación por el precio unitario correspondiente. Se considera demanda máxima de facturación del mes, la más alta que resulte de comparar la demanda máxima leída en el mes con el promedio de las dos más altas demandas registradas en aquellos meses que contengan horas de punta dentro de los últimos 12 meses, incluido el mes que se factura.

Consumo presente en punta (PP).

El precio unitario del cargo por potencia varía su valor según su grado de utilización en horas de punta. Se entiende que la demanda leída está siendo usada manifiestamente durante las horas de punta cuando el cociente entre la demanda media del cliente en horas de punta y la potencia contratada es igual o superior a 0,5.

Consumo parcialmente presente en punta (PPP).

Cuando la potencia contratada es usada parcialmente durante las horas de punta del sistema eléctrico, independiente si dicha potencia es o no utilizada en el resto de las horas del año, y se le aplica el precio unitario correspondiente. Se entiende que la potencia contratada está siendo usada parcialmente durante las horas de punta

cuando el cuociente entre la demanda media del cliente en dichas horas de punta y su potencia contratada, es inferior a 0,5.

Nota: Es importante destacar que la facturación mínima por concepto de demanda máxima no debe ser inferior al 40% del mayor valor registrado en los últimos 12 meses.

No obstante lo anterior, si por lo menos durante 5 días hábiles del mes, en períodos de 60 minutos consecutivos en las horas de punta, el cuociente entre la potencia media utilizada por el cliente y su potencia contratada supera 0,85, el consumo pasa a calificar como “presente en punta”.

Si el cliente es calificado como presente en punta y al final del período de contratación de la tarifa (12 meses) el consumo se ha comportado como parcialmente presente en punta, el cliente podrá solicitar el cambio de modalidad o cambiarse a otra opción tarifaria.

BT4.1 y AT4.1.

Estas tarifas son denominadas Horarias, como su nombre lo indica favorecen la demanda en horas no punta y la diferencia entre ellas, es la siguiente: BT-4.1 Contrata potencia en horas fuera y punta; BT-4,2 Contrata potencia en horas fuera de punta y es leída en horas punta; y BT-4.3 es leída en horas fuera y punta. Los cargos que comprende esta opción son:

Cargo fijo mensual.

Este cargo cubre costos tales como lectura, facturación, reparto y cobranza de las boletas, que no tienen relación con el consumo. Este cargo se aplica incluso si el consumo es nulo.

Cargo único por uso del sistema troncal.

Este cargo cubre el costo por el uso de instalaciones del sistema de transmisión troncal. Este cargo se obtiene multiplicando los kWh registrados en el medidor durante el período de facturación por su precio unitario expresado en \$/kWh. Corresponde a un costo en el que incurren las empresas concesionarias de servicio público de distribución por el transporte de energía a través del sistema de transmisión troncal, el cual es transferido a los consumidores finales.

Cargo por energía.

Se obtiene multiplicando los kWh registrados en el medidor durante el período de facturación por el precio unitario de la energía.

Cargo por demanda máxima contratada en horas de punta.

Este cargo se factura incluso si el consumo de energía es nulo. Se obtiene multiplicando los kW de potencia contratada en horas de punta, por el precio unitario correspondiente.

Cargo por demanda máxima contratada.

Se factura aunque no haya consumo de energía y se obtiene multiplicando los kW de potencia contratada en horas fuera de punta por el precio unitario correspondiente.

Horas de punta.

Se entenderá por horas de punta del a las informadas en los decretos de fijación de precios de nudo aplicables a los suministros de electricidad a precio regulado para clientes, usuarios o consumidores finales, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, o en aquellos decretos o publicaciones que realice la autoridad para comunicar su modificación. Actualmente el horario de punta definido es el comprendido entre las 18:00 y las 23:00 horas de cada día de los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

BT4.2 y AT4.2.

Esta opción separa los cobros por energía y potencia. Para ello se requiere de un medidor simple de energía con indicador de demanda máxima. Esta opción tarifaria comprende los siguientes cargos:

Cargo fijo mensual.

Este cargo cubre costos tales como lectura, facturación, reparto y cobranza de las boletas, que no tienen relación con el consumo. Este cargo se aplica incluso si el consumo es nulo.

Cargo único por uso del sistema troncal.

Este cargo cubre el costo por el uso de instalaciones del sistema de transmisión troncal. Este cargo se obtiene multiplicando los kWh registrados en el medidor durante el período de facturación por su precio unitario expresado en \$/kWh.

Corresponde a un costo en el que incurren las empresas concesionarias de servicio público de distribución por el transporte de energía a través del sistema de transmisión troncal, el cual es transferido a los consumidores finales.

Cargo por energía.

Se obtiene multiplicando los kWh registrados en el medidor durante el período de facturación por el precio unitario de la energía.

Cargo mensual por demanda máxima leída en horas de punta.

Se factura como la demanda efectivamente leída del mes, para los meses de abril a septiembre, y como el promedio de las dos más altas demandas máximas registradas en los meses de horas de punta del período inmediatamente anterior, para los meses de octubre a marzo.

Cargo mensual por demanda máxima contratada.

Se factura aunque no haya consumo de energía y se obtiene multiplicando los kW de potencia contratada en horas fuera de punta por el precio unitario correspondiente.

Horas de punta.

Se entenderá por horas de punta del a las informadas en los decretos de fijación de precios de nudo aplicables a los suministros de electricidad a precio regulado para clientes, usuarios o consumidores finales, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, o en aquellos decretos o publicaciones que realice la autoridad para comunicar su modificación. Actualmente el horario de punta definido es el comprendido entre las 18:00 y las 23:00 horas de cada día de los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

BT4.3 y AT4.3.

Esta opción tarifaria permite registrar en forma diferenciada la demanda en horas de punta y la demanda suministrada. Requiere de un medidor simple de energía con doble indicador de demanda máxima.

Uno de los indicadores registra la más alta demanda suministrada durante las 24 horas, mientras que el segundo indicador registra la más alta demanda durante las horas de punta. Los cargos que comprende esta opción son:

Cargo fijo mensual.

Este cargo cubre costos tales como lectura, facturación, reparto y cobranza de las boletas, que no tienen relación con el consumo. Este cargo se aplica incluso si el consumo es nulo.

Cargo único por uso del sistema troncal.

Este cargo cubre el costo por el uso de instalaciones del sistema de transmisión troncal. Este cargo se obtiene multiplicando los kWh registrados en el medidor durante el período de facturación por su precio unitario expresado en \$/kWh. Corresponde a un costo en el que incurren las empresas concesionarias de servicio público de distribución por el transporte de energía a través del sistema de transmisión troncal, el cual es transferido a los consumidores finales.

Cargo por energía.

Se obtiene multiplicando los kWh registrados en el medidor durante el período de facturación por el precio unitario de la energía.

Cargo por demanda máxima suministrada.

Se factura como el promedio de las dos más altas demandas máximas registradas en los últimos 12 meses, incluido el mes de facturación, al precio unitario correspondiente.

Cargo por demanda máxima leída en horas de punta.

Se factura como la demanda efectivamente leída del mes para los meses comprendidos entre abril y septiembre, y como el promedio de las dos más altas demandas máximas registradas en los meses de horas de punta del período inmediatamente anterior, para los meses comprendidos entre octubre y marzo.

Horas de punta.

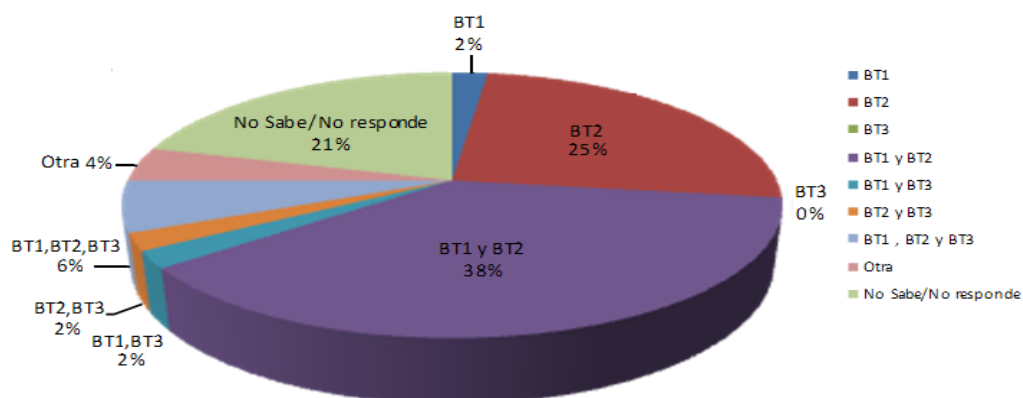
Se entenderá por horas de punta del a las informadas en los decretos de fijación de precios de nudo aplicables a los suministros de electricidad a precio regulado para clientes, usuarios o consumidores finales, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, o en aquellos decretos o publicaciones que realice la autoridad para comunicar su modificación. Actualmente el horario de punta definido es el comprendido entre las 18:00 y las 23:00 horas de cada día de los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

Es importante mencionar que el cambio a un sistema tarifario económicamente más conveniente no necesariamente está relacionado con la Eficiencia Energética, sin embargo es una oportunidad de ahorro para los municipios, lo que permite liberar recursos económicos.

5.2.2. Tarifas predominantes en el sector municipal

En el marco del proyecto “Diseño e implementación Servicio de Asistencia Técnica en Alumbrado Público a Municipios”, desarrollado durante el año 2010 por la AChEE, se realizó una encuesta a diversos Municipio del país para identificar, entre otras informaciones, una caracterización de las tarifas contratadas por éstos.

De la aplicación de dicha encuesta, se obtuvo la siguiente distribución, en donde se puede identificar que claramente las tarifas predominantes son las BT1 y BT2, predominando esta última y un alto porcentaje mantiene ambas tarifas.

Gráfico: Tarifas contratadas por los municipios

Fuente: “Diseño e implementación Servicio de Asistencia Técnica en Alumbrado Público a Municipios”, Deuman para AChEE, año 2010.

Llama la atención que más de un 20% de los municipios que respondieron acerca de la tarifa utilizada lo hicieron bajo “No Sabe/No Responde”.

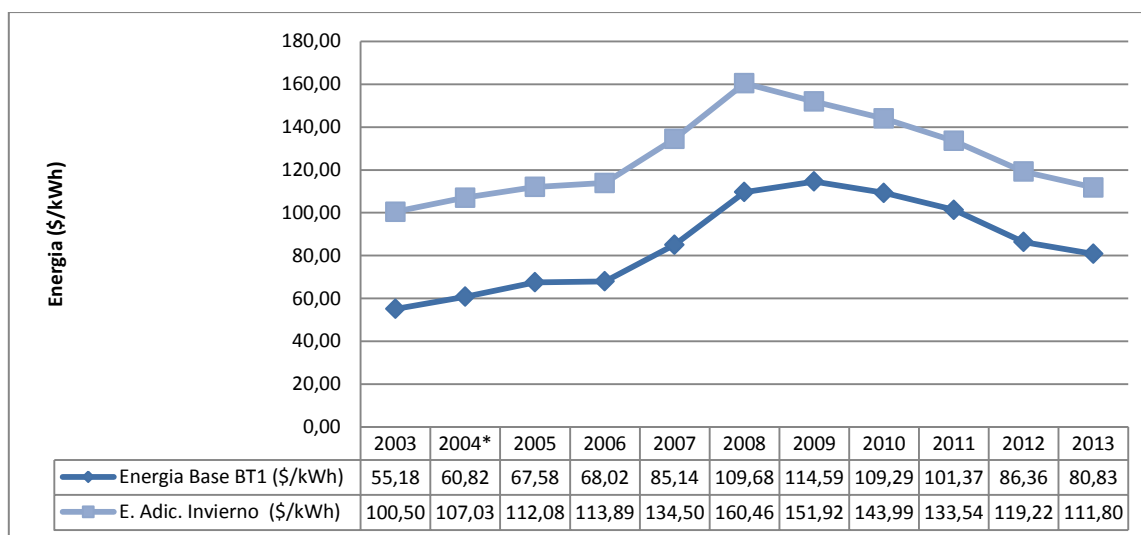
5.2.3. Costos de Energía en los últimos 11 años

La siguiente tabla registra el costo de la energía base (\$/KWh) y energía adicional de invierno (\$/kWh) para los clientes sujetos a regulación de precios de la tarifa BT-1 en los meses de agosto desde el año 2003 a la fecha (exceptuando el año 2004) para baja tensión. Estos precios incluyen un 19% de impuesto al valor agregado (IVA):

Tabla: Costo energía BT1 años 2003 a 2013

Tarifa BT1*	Año										
	2003	2004*	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Energía Base BT1 (\$/kWh)	55,18	60,82	67,58	68,02	85,14	109,68	114,59	109,29	101,37	86,36	80,83
E. Adic. Invierno (\$/kWh)	100,50	107,03	112,08	113,89	134,50	160,46	151,92	143,99	133,54	119,22	111,80

Fuente: elaboración propia

Gráfico: Costo energía BT1 años 2003 a 2013

Fuente: elaboración propia

**Tarifa histórica 1 de septiembre 2004.*

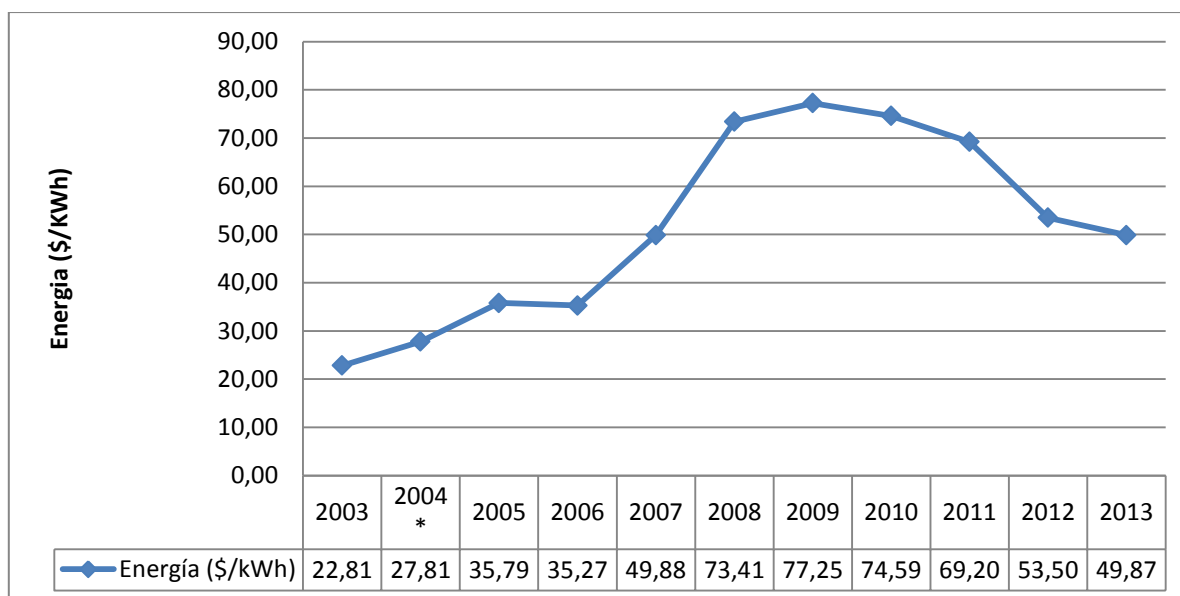
***Datos registrados en el área 1A (a): Todas las Comunas de la RM exceptuando Quilicura, Huechuraba, Lo Barnechea, Colina, Lampa y Tiltil.*

La siguiente tabla registra el costo de la energía (\$/KWh) y consumo presente en punta (\$/kWh) para los clientes sujetos a regulación de precios de la tarifa BT-2 en los meses de agosto desde el año 2003 a la fecha (exceptuando el año 2004) para baja tensión. Estos precios incluyen un 19% de impuesto al valor agregado (IVA):

Tabla: Costo energía BT2 años 2003 a 2013

Tarifa BT-2	Año										
	2003	2004*	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Energía BT2 (\$/kWh)	22,81	27,81	35,79	35,27	49,88	73,41	77,25	74,59	69,20	53,50	49,87
Dda Pte Punta (\$/kW/Mes)	9.574,46	9.745,60	9.059,00	9.335,96	10.049,46	10.337,39	9.143,61	10.087,68	9.318,64	9.521,52	9.655,03

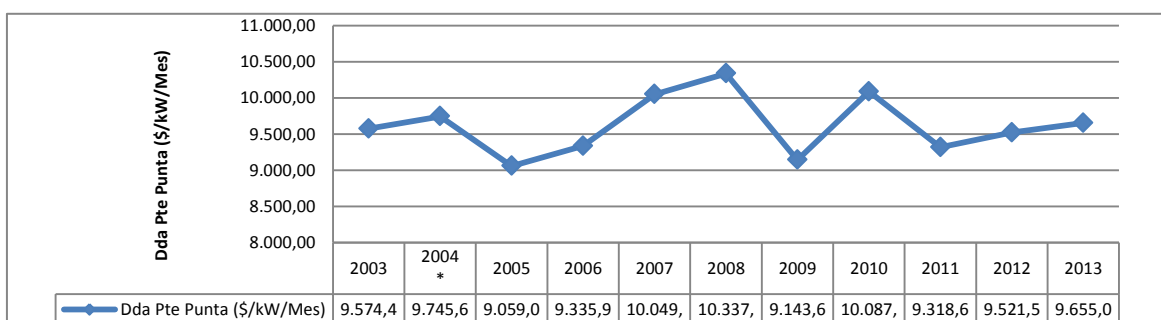
Fuente: elaboración propia

Gráfico: Costo energía BT2 años 2003 a 2013

Fuente: elaboración propia

Gráfico 3. Consumo presente en punta (\$/kW/Mes) en tarifa BT-2

Fuente: <http://historicas.chilectra.cl/historicas.html>



*Tarifa histórica 1 de septiembre 2004.

**Datos registrados en el área 1A (a): Todas las Comunas de la R.M. exceptuando Quilicura, Huechuraba, Lo Barnechea, Colina, Lampa y Tiltil.

5.3. Modelos de Gestión para un Programa de Recambio Masivo de AP

En base al diagnóstico y análisis de barreras realizado en el apartado 4.1., el equipo consultor propuso en talleres a la contraparte técnica diversas estrategias para “remover” las barreras señaladas, de manera de facilitar un programa masivo de recambio de AP en nuestro país.

Se realizó un análisis de cada una de las barreras y aspectos pertinentes, analizándose las fortalezas y debilidades de diversas estrategias para enfrentar el problema respectivo. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla: Análisis de Barreras y soluciones

Barrera	Aspecto	Soluciones	Fortalezas	Debilidades
1. Asimetría de Información	a. Municipios no cuentan en general con expertos técnicos actualizada	1. Formar expertos	1. Instala capacidad "in house"	1. Rotación personal; 2. difícil actualización permanente; 3. diversidad de formación prof. o tec. de inicio del personal; 4. Costos; 5. experiencias previas sin mayor éxito
		2. Licitación de Asistencia Técnica Individual Municipio	1. Asegura capacidad técnica y actualización	1. Puede estar sujeta a captura por proveedores; 2. dificultades presencia regiones; 3. disímiles capacidades técnicas generará resultados diversos
		3. Asistencia Técnica de entidad nacional	1. Menos costo; 2. Asegura capacidad técnica y actualización; 3. Asegura estandarización; 4. reduce riesgo de captura	1. necesidad de incentivo para someter a Municipio al sistema y perder poder de decisión
	b. Gore no cuenta con expertos técnicos actualizada	1. Formar expertos	1. Instala capacidad "in house"	1. Rotación personal; 2. difícil actualización permanente; 3. diversidad de formación prof. o tec. de inicio del personal; 4. Costos
		2. Licitación de Asistencia Técnica Individual al Gore	1. Asegura capacidad técnica y actualización	1. Puede estar sujeta a captura por proveedores; 2. dificultades presencia regiones; 3. disímiles capacidades técnicas generará resultados diversos
		3. Asistencia Técnica de entidad nacional	1. Menos costo; 2. Asegura capacidad técnica y actualización; 3. Asegura estandarización; 4. reduce riesgo de captura	1. necesidad de incentivo para someter a Gore al sistema
	c. No existe catastro georeferenciado actualizado en la mayoría de los casos	1. Desarrollar Catastro Nacional	1. Asegura control y estandarización; 2. Asegura contar con información centralizada a nivel nacional	1. Costoso proyecto, en especial por viajes a regiones; 2. Dificultad de mantener actualizado el sistema; 3. Difícil supervisar el correcto desarrollo
		2. Incorporar al modelo como etapa de inicio catastro georeferenciado y auditoría	1. Asegura determinar una línea base actualizada	1. Dificulta contar con información agregada a nivel nacional; 2. Problemas de estandarización, salvo someta a asistencia técnica única; 3. Capacidades a nivel regional
	d. No existe auditoría que arroje un proyecto de recambio técnico y económico eficiente; e. Las bases de licitación no cuentan en general con conocimiento técnico, lo que genera en ocasiones "amarres" tecnológicos; f. El análisis de las ofertas se realiza con equipos técnicos que no siempre tienen el conocimiento para identificar diferencias en las ofertas.	1. Formar expertos	1. Instala capacidad "in house"	1. Rotación personal; 2. difícil actualización permanente; 3. diversidad de formación prof. o tec. de inicio del personal; 4. Costos; 5. experiencias previas sin mayor éxito; 6. No asegura impedir problema de captura por parte de proveedores
		2. Licitación de Asistencia Técnica Individual Municipio	1. Asegura capacidad técnica y actualización	1. Puede estar sujeta a captura por proveedores; 2. dificultades presencia regiones; 3. disímiles capacidades técnicas generará resultados diversos
		3. Asistencia Técnica de entidad nacional	1. Menos costo; 2. Asegura capacidad técnica y actualización; 3. Asegura estandarización; 4. reduce riesgo de captura	1. necesidad de incentivo para someter a Municipio al sistema y perder poder de decisión

Barrera	Aspecto	Solucion	Fortalezas	Debilidades
2. Causas Normativas	a. Desactualización frente al salto tecnológico de los últimos años	1. Actualizar normativa	1. Obligatorio	1. Proceso lento
		2. Asistencia técnica nacional que estandarice exigencias	1. Autoregulación de manera indirecta	2. Puede ser sujeto de discusiones por parte de actores
3. Falta de Modelos y Protocolos	a. No hay modelo contractual, de catastro, georeferenciamiento y de M&V	1. Reglamentar entrega fondos FNDR	1. Obligatorio	1. Proceso lento
		2. Asistencia Técnica de entidad nacional	1. Autoregulación de manera indirecta	2. Puede ser sujeto de discusiones por parte de actores
4. Financiamiento	a. Recursos FNDR no alcanzan para un plan masivo de recambio nacional	1. Apalancar recursos FNDR con recursos privados mediante desarrollo modelo ESCO en AP	1. Permite acelerar el desarrollo de proyectos sin impacto fiscal; 2. Saca al Municipio de una labor compleja y se la entrega a un experto en AP; 3. Mejora calidad del servicio de AP; 4. Crea mercado de EE	1. No todos los Municipios son "endeudables"; 2. Proyecto es más caro que financiado puramente con fondos públicos al incorporar rentabilidad privada; 3. Menos certeza de los resultados del programa
		2. Sumar recursos vía ppto público o fondos internacionales	1. Permite control total del proyecto; 2. Define plan de inversiones e impacto desde el inicio del programa; 3. Más rápido de implementación	1. Genera impacto en gasto público; 2. Requiere voluntad política en escenario de múltiples necesidades fiscales
	b. No hay modelos contractuales validados para financiamiento privado	1. Asistencia Técnica de entidad nacional	1. Autoregulación de manera indirecta	1. Puede ser sujeto de discusiones por parte de actores
	c. Recursos privados no pueden llegar a todos los municipios	1. Creación de fondo de garantía	1. Existe experiencia y fondo disponible	1. Inexistencia de mercado maduro a la fecha

Dado este análisis, se propone el siguiente modelo de gestión, el que remueve las barreras enfrentadas con estrategias que presentan las mayores fortalezas y menores debilidades.

1. Barreras 1, 2 y 3 (Asimetría de Información, actualización normativa, modelos validados):

Dado el análisis de fortalezas y debilidades presentado, se propone la generación de un **mecanismo de asesoría centralizado y único a nivel nacional, a cargo de la Agencia Chilena de EE o el Ministerio de Energía** (según lo defina la autoridad).

Como lo señalamos previamente, un proceso “completo” de recambio de AP (que de llevarse adecuadamente debería arrojar como resultado un proyecto que mejora la EE en relación a la situación base) debería considerar las siguiente etapas:

Figura: Etapas de un proceso de recambio de AP para un proyecto de EE:

La asesoría técnica externa debe participar en todo el proceso, de manera vinculante para el Municipio respectivo, lo que requiere la celebración de un contrato con éste para que se obligue a los resultados de la asesoría. De esta manera, este modelo “saca” el análisis técnico del Municipio y radica el proceso de análisis técnico, económico, financiero y jurídico en una entidad especializada y actualizada en sus conocimientos.

El equipo que debe proveer de la asistencia técnica debería estar conformado a lo menos por los siguientes perfiles de expertos:

- Ingeniero Especialista en AP, tiene a su cargo la dirección administrativa y técnica de cada uno de los proyectos.
- Ingeniero de Proyecto, colabora con el ingeniero especialista en el análisis del proyecto
- Abogado, a cargo de aspectos jurídicos de la asesoría.
- Administrativo, a cargo de la gestión documental de la asesoría.

El costo de la asesoría por proyecto se presenta en el siguiente cuadro:

Costo Asesoría en AP según tamaño de proyecto (entre 0 y 1.000 puntos)

Nº	Tamaño de proyecto y monto Descripción	Proy hasta 500 pts y MM\$100				Proy hasta 1.000 pts y MM\$600			
		Profesionales - HH				Profesionales - HH			
		Ing Esp	Ing Proy	Abog	Admin	Ing Esp	Ing Proy	Abog	Admin
1	Revisión antecedentes técnicos situación base	4	16	0	2	4	24	0	2
2	Revisión anteced adm y econ del benef	8	16	4	2	12	24	4	2
3	Definición del modelo a utilizar	8	16	8	0	8	16	8	0
4	Estimación de inversión asociada al proyecto	8	16	0	0	8	20	0	0
5	Determinación de actividades mínimas a realizar	8	16	0	0	8	20	0	0
6	Definición de línea base para posterior comparación	8	24	0	0	8	32	0	0
7	Adecuación de bases técnicas	4	24	16	2	4	24	16	2
8	Colaboración en respuestas a consultas de licitación	4	8	4	2	4	16	4	2
9	Revisión de ofertas recibidas	8	32	8	2	8	32	8	2
10	Revisión y recomendación de plan M y V	4	16	0	0	4	16	0	0
11	Acompañamiento y seguimiento a la implementación	4	40	8	8	8	64	8	8
12	Evaluación y seguimiento de ahorros	4	40	0	0	8	40	0	0
13	Reporte final	4	16	4	8	4	16	4	8
14	Total	76	280	52	26	88	344	52	26
15	Costo por tipo de profesional UF	1,5	0,5	1,5	0,15	1,5	0,5	1,5	0,15
16	Costo por profesional	114	140	78	3,9	132	172	78	3,9
17	Sub total	336				386			
19	Tiempo de dedicación ente público	65,1				76,5			
20	Costo hora profesional público (1 UF)	65				77			
	Costo total	401	\$ 9.316.032	Valor UF	\$ 23.232	462	\$ 10.742.477	Valor UF	\$ 23.232

Costo Asesoría en AP según tamaño de proyecto (desde 1.000 puntos)

Nº	Tamaño de proyecto y monto Descripción	Proy hasta 10.000 pts y MM\$2.000				Proy sobre 10.000 pts y MM\$2.000			
		Profesionales - HH				Profesionales - HH			
		Ing Esp	Ing Proy	Abog	Admin	Ing Esp	Ing Proy	Abog	Admin
1	Revisión antecedentes técnicos situación base	8	32	0	4	8	40	0	4
2	Revisión anteced adm y econ del benef	16	32	4	4	16	40	4	4
3	Definición del modelo a utilizar	12	24	8	0	12	24	8	0
4	Estimación de inversión asociada al proyecto	12	28	0	0	12	32	0	0
5	Determinación de actividades mínimas a realizar	12	28	0	0	12	32	0	0
6	Definición de línea base para posterior comparación	12	40	0	0	12	44	0	0
7	Adecuación de bases técnicas	8	32	16	4	8	32	16	4
8	Colaboración en respuestas a consultas de licitación	8	32	4	4	8	32	4	4
9	Revisión de ofertas recibidas	16	40	8	4	16	40	8	4
10	Revisión y recomendación de plan M y V	8	24	0	0	8	24	0	0
11	Acompañamiento y seguimiento a la implementación	32	200	8	16	40	320	8	16
12	Evaluación y seguimiento de ahorros	16	56	0	0	24	72	0	0
13	Reporte final	8	24	4	16	8	24	4	16
14	Total	168	592	52	52	184	756	52	52
15	Costo por tipo de profesional UF	1,5	0,5	1,5	0,15	1,5	0,5	1,5	0,15
16	Costo por profesional	252	296	78	7,8	276	378	78	7,8
17	Sub total	634				740			
19	Tiempo de dedicación ente público	129,6				156,6			
20	Costo hora profesional público (1 UF)	130				157			
	Costo total	763	\$ 17.735.309	Valor UF	\$ 23.232	896	\$ 20.825.165	Valor UF	\$ 23.232

Los costos calculados son menores en relación al tamaño de los proyectos, representando entre el 0,5% al 2% costo promedio de recambios de luminarias entre los años 2011 a 2012.¹³

El costo de esta asesoría podría tener tres fuentes de financiamiento:

- Municipio interesado financia el costo de la asesoría. Estimamos que esta debe ser la fuente de financiamiento mayor de la asesoría, ya que transforma al Municipio en cliente y mandante del contrato, junto con obligarlo a lo que establezcan las cláusulas contractuales.

¹³ Todos los proyectos de recambio de AP sobre 1.000 luminarias tuvieron valores de adjudicación superiores a los \$400.000.000.-; sobre los 3.000 puntos, los valores fueron superiores a \$800.000.000.-; y los proyectos sobre 10.000 puntos, los valores fueron superiores a los \$2.000.000.000.-

- Gobierno regional utiliza fondos FNDR destinados a AP para financiar la asesoría. A nuestro juicio, esta debería ser la segunda fuente de financiamiento, y su contribución debería ir entre rangos entre el 50% al 20%, para generar un primer “incentivo” a la incorporación del Municipio del programa (“cofinanciamiento” a la asesoría técnica). No obstante para Municipios de escasos recursos podría llegar al 80% del financiamiento. Este cofinanciamiento, junto con incentivar la incorporación de los Municipios al Programa, debería implicar la celebración de un convenio con el Municipio que lo “obligue” al cumplimiento de los resultados de la asesoría.
- Ministerio de Energía via AChEE o Subdere financia asesoría.

Asimismo, podría existir una combinatoria de fuentes de financiamiento, dependiendo de las condiciones de base del Municipio (por ej. Municipios 3 a 5 de clasificación Subdere son financiados en un porcentaje importante por Subdere y/o Ministerio de Energía). No obstante, salvo excepciones fundadas, estimamos esencial que el Municipio interesado pague la asesoría al menos en un porcentaje cercano al 50%, ya que esto genera dos consecuencias muy relevantes: actuará como cliente y mandante “real” del contrato, junto con comprometer al Municipio en los resultados de la asesoría durante todo el proceso.

La asesoría debería ser prestada en todos los proyectos que formen parte del Programa, para lo cual estimamos que deberían celebrarse, dependiendo de la modalidad de financiamiento (ver punto siguiente), convenios con las entidades correspondientes (Gobiernos Regionales y Municipalidades en modelo Esco; Subdere, Gore y Municipalidades en modelo de financiamiento público) que obliguen a las Municipalidades a seguir los resultados de la asesoría en todo el proceso de licitación, por lo que en caso que el Municipio quiera apartarse de las recomendaciones de la asesoría, junto con devolver los costos del trabajo realizado a la fecha, no podría aprovechar las ventajas que el Programa le ofrece.

La asesoría técnica única a nivel nacional enfrenta las barreras señaladas, ya que permite:

- i. Contar con conocimiento especializado y actualizado de AP
- ii. Regular, mediante las bases de licitación, condiciones técnicas exigidas a los proveedores tecnológicos que puedan estar por encima de la regulación vigente, sujetándose a los principios de libre concurrencia e igualdad de oferentes que establece la ley de compras..
- iii. Contar con modelos contractuales y de negocios que vayan adaptándose a los aprendizajes del Programa y la innovación del mercado.
- iv. Protocolizar procesos de catastro y utilizar protocolos de M&V

- v. Instalar capacidades “in house” básicas para el seguimiento del contrato, con las mismas características en todo el territorio.

A nuestro juicio, las soluciones de “instalación de capacidades” a nivel municipal o regional, o la contratación “individual” de asesorías por parte de Gores o Municipios, no permitirían cumplir con estos aspectos, por lo que no atacarían las barreras identificadas.

2. Barrera 4, Financiamiento

En relación a esta barrera, se presentan dos modalidades que a nuestro juicio son compatibles y complementarias:

a) Modelo con financiamiento privado mediante modelo ESCO.

De acuerdo al análisis del marco regulatorio realizado en informe de avance, la alternativa que un municipio provea alumbrado público para su comuna, en el esquema de financiamiento por parte de una ESCO es perfectamente factible, atendido el alto grado de autonomía que tienen para su gestión.

El modelo Esco, o de “Empresas de Servicios Energéticos”, corresponde a aquel en que la Esco diseña, desarrolla, instala y financia proyectos de eficiencia energética (en este caso de AP), con el objeto de reducir costos operativos y de mantenimiento y mejorar la calidad de servicio del cliente. Esta empresa asume los riesgos técnicos y económicos asociados con el proyecto.

Típicamente los servicios ofrecidos por estas empresas son:

- a) Desarrollo, diseño y financiamiento de proyectos;
- b) Instalación y mantenimiento del equipo eficiente;
- c) Medición, monitoreo y verificación de los ahorros generados por el proyecto; y
- d) Asumir los riesgos técnicos del proyecto.

El esquema ESCO permite que los consumidores de energía continúen enfocando sus recursos a su actividad principal, mientras que la ESCO se encarga de la modernización de los equipos e instalaciones, mediante la integración de proyectos con ahorros energéticos y económicos garantizados. La figura central para el desarrollo de estos proyectos es el contrato de desempeño, que especifica las condiciones en las que se desarrollará el proyecto, con el objetivo de brindar certidumbre a ambas partes.

La cuantificación correcta de estos ahorros, y su aceptación por parte de la ESCO y el cliente, es una de las actividades más importantes a desarrollar durante el proyecto. Sin embargo, la existencia de factores que inciden en esta estimación y la hacen

discutible, hace necesario contar con una metodología, aceptada por ambas partes desde antes del inicio del proyecto, para la medición y verificación de los ahorros.

Esta figura contractual es factible de desarrollar, ya que la naturaleza jurídica de un contrato de esta naturaleza sería un “suministro de alumbrado público”, el que como señalamos es posible de desarrollar. De esta manera, el Programa no consistirá en la licitación de “tecnologías” de AP, sino que en la prestación del “Servicio de AP” (similar a los procesos de externalización de recogida de basuras, sistemas informáticos o guardias de seguridad), lo que implica al menos los siguientes servicios a licitar:

- Reemplazo tecnológico
- Disposición final de tecnología reemplazada
- Actualización de catastro georeferenciado
- Gestión del AP (encendido, apagado y control de voltaje, a lo menos)
- Sustitución de luminarias con falla y problemas de uso.
- Mantenimiento del AP (si bien, este servicio podría licitarse de manera separada, es recomendable que sea la misma ESCO quien esté preocupada de que el servicio entregado sea óptimo y alcance los ahorros comprometidos)

El plazo de este contrato dependerá del período de recuperación de la inversión, el que de acuerdo a los contratos celebrados bajo esta modalidad en los dos últimos años debería oscilar entre los 8 a 10 años.

Típicamente esta figura cuenta con un financiamiento 100% proveniente de la ESCO y podría realizarlo un Municipio de manera independiente. No obstante, para hacer atractivo el Programa para un Municipio, en especial que éste celebre un convenio por el cual se obliga a los resultados de la asesoría externa, el modelo podría considerar un cofinanciamiento de recursos FNDR, que mejoren el análisis financiero del proyecto, mejorando los ahorros o reduciendo el plazo del contrato. Este cofinanciamiento puede variar entre un 80% a 20% del monto total, dependiendo de las siguientes variables:

- Capacidad de endeudamiento del Municipio (para ello podría utilizarse la clasificación de Municipios realizada por Subdere y presentada en el capítulo correspondiente).
- Condiciones del proyecto específico (un proyecto que tiene una tecnología muy ineficiente de base, probablemente será muy rentable y los ahorros y tiempo del contrato menores a situaciones en que la tecnología de base es superior).
- Montos FNDR comprometidos para el año en materia de AP.

- Proyectos presentados para su “cofinanciamiento” con fondos FNDR.

Para un funcionamiento transparente de este Programa, estimamos que de considerarse un “cofinanciamiento FNDR”, las condiciones para su operación deben estar reglamentadas ex ante y conocidas por todos los actores. Asimismo, anualmente debería abrirse un período de “llamado” para la presentación de “perfiles” de proyectos, con información básica que permita identificar los proyectos que deben entrar al Programa.

Por otra parte, dado que la capacidad de financiamiento de la ESCO es limitada (ya sea proveyendo recursos “propios” para el proyecto o buscando financiamiento de la Banca para el proyecto), dado el tamaño del mercado potencial que implica el recambio (ver capítulo 5 del presente informe), si se quiere lograr un cambio masivo de AP se requerirá que el sistema financiero provea los recursos, más allá de la capacidad crediticia de la ESCO correspondiente.

Para ello, y dadas las restricciones que tiene el Municipio en materia de endeudamiento (ver capítulo de análisis de marco legal en informe de avance), se requiere contar con un mecanismo que implique un contrato que:

- El deudor sea la ESCO
- El pago de la Municipalidad a la ESCO vaya directamente al Banco financiador de la operación (mandato de cobro).
- El Banco se paga del crédito primero y el remanente se entrega a la ESCO.

Este mecanismo implica que el análisis de riesgo que realiza el Banco lo hará tanto a la ESCO como al Municipio.

Por ello, con el objeto que dentro del modelo puedan entrar la mayoría de los Municipios del país, junto con abaratar el costo del financiamiento, esta modalidad de financiamiento requiere necesariamente la existencia de un Fondo de Garantía, que tenga por fin asegurar el pago de la mensualidad desde el Municipio a la ESCO, vía mandato de cobro que tiene el Banco.

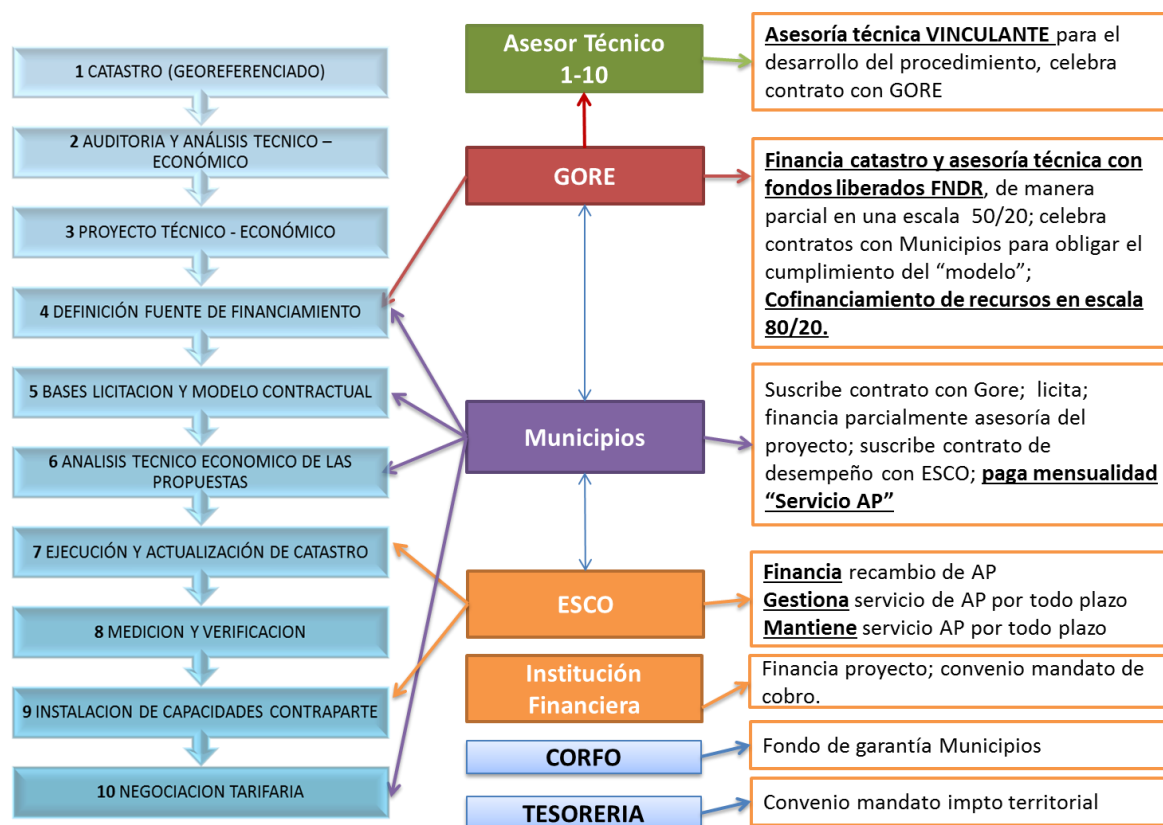
A nuestro juicio, el Fondo de Garantía ya se encuentra diseñado y en operaciones en el país, ya que la AChEE desde el año 2013 cuenta con el “Fondo de Garantía de Eficiencia Energética” (FOGAEE), cuyo objetivo es garantizar parcialmente los ahorros comprometidos asociados a operaciones crediticias concedidas a la ESCO (garantía parcial de crédito relacionada a Contratos por Desempeño Energético de ahorros compartidos) o los ahorros comprometidos (garantía técnica relacionada a Contratos por Desempeño Energético de ahorros garantizados), mediante la entrega de certificados de fianza emitidos por Congarantía CGR, el administrador del Fondo.

No obstante lo señalado, dicho Fondo de Garantía requerirá ciertos ajustes para que pueda operar plenamente en el programa de recambio de AP.

Finalmente, dada la existencia del Fondo de Garantía, algunos Municipios podrían considerar no cumplir con sus obligaciones mensuales del contrato de desempeño, por lo que proponemos que opere un mecanismo contemplado en el “Programa de Inversión Desarrollo de las Ciudades” (Subdere, años 2011 y 2012)¹⁴, según el cual la Tesorería General de la República puede descontar de la remesa correspondiente al pago del impuesto territorial que le corresponde al Municipio, el monto de la cuota que tuvo que responder el Fondo de Garantía. Este mecanismo debería ser contemplado en el contrato que suscribirá el Municipio con el respectivo Gobierno Regional.

La operación del modelo en relación a las etapas para desarrollar un proyecto de EE en AP, junto con las responsabilidades de los distintos actores, puede representarse gráficamente de la siguiente forma:

¹⁴ El objetivo principal del Programa es impulsar, a través de aportes reembolsables, el diseño y aplicación de proyectos municipales de inversión en infraestructura comunal, que contribuyan a mejorar la calidad de vida de los ciudadanos. El Decreto N° 196 del 24 de marzo 2011 y las modificaciones establecidas en el Decreto N° 512 del 24 de marzo reglamentan el Programa.

Figura: Esquema de funcionamiento modelo “ESCO”, Actores y Responsabilidades:

b) Modelo de financiamiento fiscal íntegro (vía financiamiento tributario u otras fuentes de ingresos)

Como se señaló en el capítulo 4, el parque de AP nacional está compuesto en su gran mayoría por tecnología eficiente, pese a lo anterior, existe aún un 19% de éste que se considera malo, muy malo o extremadamente malo. Por tanto, el primer paso a seguir debiera corresponder al reemplazo de este 19% del parque, tomando como hipótesis que a la fecha aún no ha sido reemplazado, para lo cual, las inversiones necesarias son las que se presentan a continuación¹⁵.

¹⁵ Los reemplazos de VSAP, ya sea con o sin luminaria, incluyen el recambio del balasto.

Tabla: Costo reemplazo parque ineficiente con distintas tecnologías

Categoría	LED	VSAP sin luminaria	VSAP con luminaria
	Inversión \$		
1	\$19.613.905.481	\$1.742.796.792	\$4.423.984.150
2	\$37.110.132.078	\$3.186.767.013	\$8.308.793.957
3	\$18.807.871.300	\$1.600.339.067	\$4.208.146.724
4	\$17.545.929.435	\$1.620.279.200	\$4.195.619.987
5	\$22.521.170.355	\$1.931.348.100	\$5.036.498.307
Total	\$115.599.008.649	\$10.081.530.171	\$26.173.043.125
Total en US\$	\$231.198.017	\$20.163.060	\$52.346.086

Como se demostró en el capítulo 4, algunos de estos cambios podrían ser realizados bajo modelo Esco. No obstante, en la mayoría de los casos en que se requiere cambiar luminaria, no habría rentabilidad privada por lo que no sería viable este modelo.

Asimismo, la evaluación social fue positiva para todos los casos de cambio por VSAP sin luminaria y para cuatro categorías (1 a 4) de VSAP con luminaria. Así pues consideraremos que este Programa debería oscilar entre los \$10.081.530.171.- y los \$26.173.043.125.-

Esta cifra no aparece exagerada, ya que en los dos últimos años, los fondos FNDR destinados a recambio de AP corresponden a unos \$20.000 millones anuales.

La fórmula que proponemos es un “cofinanciamiento” de fondos FNDR con fondos de un “Programa de Renovación con EE de AP” (programa nuevo, que se propone crear y se presenta en la ficha E, en anexo), administrado por Subdere. Los fondos FNDR “cofinanciarían” los proyectos en porcentajes que varían entre un 80% a 20% del proyecto, dependiendo de las siguientes variables:

- Capacidad de endeudamiento del Municipio (para ello podría utilizarse la clasificación de Municipios realizada por Subdere y presentada en el capítulo correspondiente).
- Condiciones del proyecto específico (un proyecto que tiene una tecnología muy ineficiente de base, probablemente será muy rentable y los ahorros y tiempo del contrato menores a situaciones en que la tecnología de base es superior).
- Montos FNDR comprometidos para el año en materia de AP.
- Proyectos presentados para su “cofinanciamiento” con fondos FNDR.

De la misma manera, dado que en los casos que sea recomendable la renovación del AP existe un “ahorro” para el Municipio, el Programa podría incluir una modalidad para “compartir” los ahorros producidos, de tal manera que los Municipios paguen al Fisco de Chile todo o parte de los recursos invertidos.

En este sentido, el Programa puede operar de la misma manera que establece el ya mencionado “Programa de Inversión Desarrollo de las Ciudades” (Subdere, vigente

desde el año 2011 a la fecha)¹⁶, el cual entrega aportes reembolsables (préstamos) a las comunas “elegibles” del programa, para ser destinados a diversos fines de “inversión” en las ciudades respectivas, dentro de los cuales se encuentra el alumbrado público. Dicho programa cuenta con una reglamentación que consideramos íntegramente aplicable al programa que se diseña.

De acuerdo a su reglamentación contenida en el D.S. 196/2011 y D.S. 512/2012, ambos del Ministerio del Interior, el Programa está *“dirigido a incentivar a las municipalidades que demuestren una gestión responsable en el manejo de sus recursos, mediante el acceso a fondos que les permitan solventar operaciones que involucren una concentración temporal de desembolsos a cambio de ingresos futuros, promoviendo de esta forma la eficiencia y la disciplina financiera”*. De la misma manera, el objetivo principal del Programa aludido, es *“procurar el diseño y aplicación de programas municipales de inversión en infraestructura comunal, aumentando la capacidad de las municipalidades para mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos, con mayor autonomía financiera y capacidad de gestión.”*

El monto máximo de recursos que se autoriza para cada municipalidad, indistintamente del número de proyectos, en ningún caso puede exceder de seis mil millones de pesos.

Para ser elegibles, las municipalidades debían cumplir con los siguientes requisitos:

- a) Pertenecer al 20% de las municipalidades con mayor población;
- b) Tener una población urbana superior al cincuenta por ciento del total de la población comunal;
- c) Contar con un Plan Comunal de Desarrollo, a lo menos actualizado en los últimos cuatro años previos a la postulación al Programa;
- d) Estar al día con sus respectivos pagos previsionales y aportes al Fondo Común Municipal; y
- e) Que el excedente operacional promedio de los últimos tres años anteriores a la fecha de postulación permita financiar la deuda al 31 de diciembre del último año considerado.

¹⁶ De acuerdo a las leyes de presupuesto respectivas, el Programa contempló un total de \$11.000 millones en 2011 y \$22.000 millones tanto en los años 2012 como en 2013 para el cumplimiento de sus fines (en ley de presupuestos en trámite actualmente se contempla mismo monto de los últimos años para el ejercicio 2014). Cabe señalar que la consultora intentó contactar por diversos medios a los encargados del Programa en Subdere, para conocer más detalles de éste y su evaluación, pero lamentablemente no fue posible acceder a esta información.

Para efectos del Programa se entiende por excedente operacional, los recursos de libre disposición con que cuenta la municipalidad, y se calculará como la diferencia entre los ingresos propios efectivos y los gastos obligatorios devengados por la municipalidad.

El listado de Municipios elegibles se debe actualizar semestralmente, determinándose el último listado mediante resolución exenta N°7559/2012 de Subdere, según el cual sólo 20 Municipalidades cumplen con los requisitos para poder participar en el Programa¹⁷, las cuales son: 1) Curicó; 2) El Bosque; 3) La Florida; 4) La Pintana; 5) Linares; 6) Los Andes; 7) Macul; 8) Maipú; 9) Melipilla; 10) Ñuñoa; 11) Providencia; 12) Pudahuel; 13) Puerto Montt; 14) Quillota; 15) San Antonio; 16) San Bernardo; 17) Talca; 18) Temuco; 19) Valdivia; 20) Villa Alemana.

Así pues, y si aplicáramos el mismo criterio establecido por la autoridad sectorial respectiva en los últimos 3 años, sólo un grupo restringido de Municipios podría acceder a esta fórmula de “aportes reembolsables”, por lo que la gran mayoría de los Municipios participarían del Programa mediante la fórmula de aportes “no reembolsables”.

A diferencia del modelo de financiamiento privado mediante una ESCO, en este caso el programa consiste en “recambio tecnológico”, quedando la gestión del alumbrado público en manos del Municipio, de la misma manera en que sucede en la actualidad en la mayoría de los casos.

De esta manera, la licitación correspondiente exigiría:

- Reemplazo tecnológico
- Disposición final de tecnología reemplazada
- Actualización de catastro georeferenciado.

Este modelo operaría de la siguiente manera:

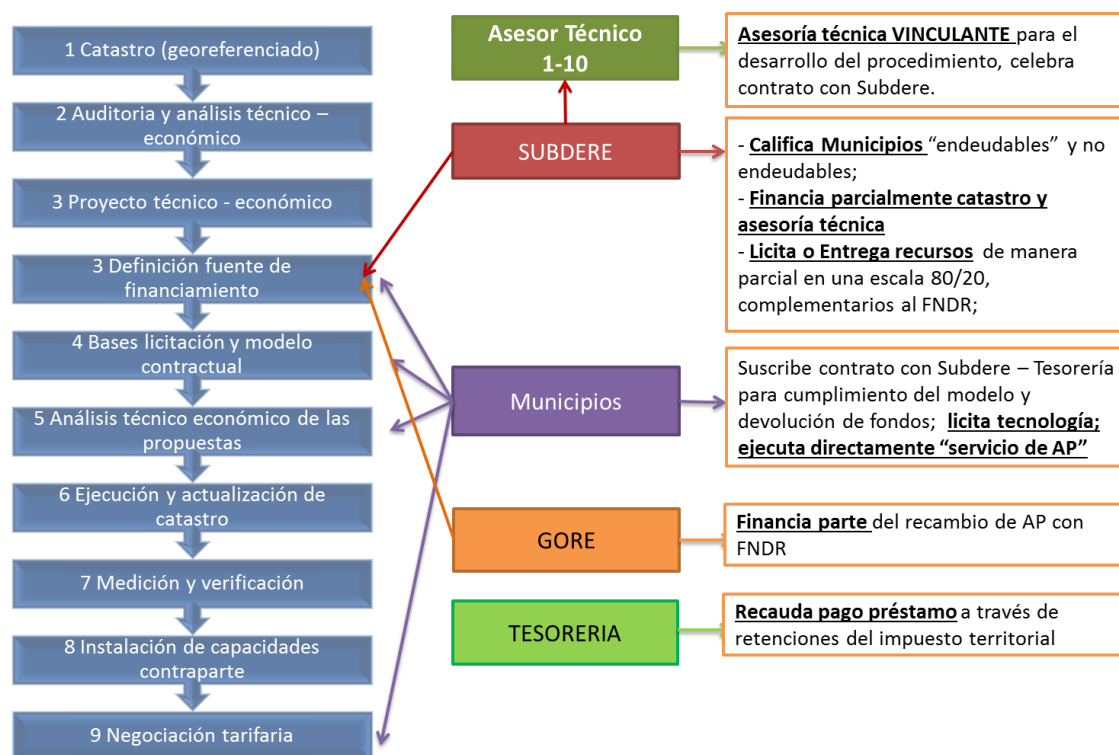
1. Se asignan los recursos del Programa vía Ley de Presupuesto de la Nación a la Subdere, como organismo ejecutor.
2. Subdere reglamenta el funcionamiento del Programa mediante un Decreto Supremo suscrito por el Ministerio del Interior y Energía.
3. El Programa cuenta con la asesoría técnica a nivel nacional de la AChEE o Ministerio de Energía. Dicha asesoría es financiada por el Municipio y el Gore respectivo, al menos en una parte, con el objeto de generar adhesión a los resultados (ver apartado pertinente en relación a este punto).

¹⁷ La resolución exenta N° 7038/2011, de la Subdere, determinaba un total de 34 Municipios elegibles.

4. Los Municipios deben firmar convenio con Gore respectivo en que se comprometen a cumplir con las obligaciones que establezca el Programa.
5. Gore respectivo firma convenio con Subdere en que se compromete a cumplir con las obligaciones que establezca el Programa.
6. Cada Gobierno Regional prioriza proyectos presentando “perfiles” a Subdere-Ministerio de Energía, estableciendo los montos FNDR totales que compromete para el cofinanciamiento de los proyectos que presenta.
7. Subdere-Ministerio de Energía priorizan los proyectos que serán cofinanciados por el Programa en el año respectivo.
8. Las licitaciones de recambio tecnológico podrán ser realizadas por la Subdere, el Gore o los Municipios (la figura que se puede utilizar es un convenio mandato en virtud del cual el Municipio encomienda a Subdere o Gore la licitación pertinente), dependiendo de la conveniencia del Programa (economías de escala, dificultad de implementación y oferentes, tamaños de los proyectos, etc).
9. El Municipio queda a cargo de la gestión del AP, acompañado de la agencia técnica asesora para verificar el cumplimiento del contrato
10. En caso que el aporte sea “reembolsable”, para garantizar el cumplimiento del Municipio, éste debe suscribir un convenio mandato de cobro con la Tesorería general de la república, para que ésta pueda descontar de la remesa correspondiente al pago del impuesto territorial que le corresponde al Municipio, el monto de la cuota que tuvo que pagar el Municipio y no lo hizo.

La operación del modelo en relación a las etapas para desarrollar un proyecto de EE en AP, junto con las responsabilidades de los distintos actores, puede representarse gráficamente de la siguiente forma:

Figura: Esquema de funcionamiento modelo con Financiamiento Público suplementario FNDR, , Actores y Responsabilidades:



5.4. Población objetivo para cada modelo.

5.4.1. Modelo ESCO

Tal como se ha mencionado anteriormente, y considerando además los resultados que se presentan en el capítulo 4 del presente informe, el parque de alumbrado público chileno, en su gran mayoría es considerado como eficiente, existiendo tan solo un 10,99% de éste considerado como no eficiente (equivalente a 266.001 luminarias).

Además, dado los resultados económicos obtenidos de las diversas evaluaciones, los cuales en su mayoría no presentan rentabilidad privada, es que se estima que la población objetivo para el modelo ESCO, corresponde a aquella que aún cuenta con tecnologías consideradas como ineficientes, además, en base a la rentabilidad privada de los diferentes escenarios evaluados, el reemplazo a llevar a cabo con este modelo, debiera ser el cambio de lámpara y balasto ineficiente por tecnología VSAP y balasto electrónico de doble nivel de potencia.

Con estas consideraciones, la siguiente tabla presenta el tipo de tecnología ineficiente y el número de puntos existentes en cada una de las 5 categorías definidas anteriormente:

Categoría	Halógena	Incandescente	Mercurio	Mixta	Sodio de Baja Presión
1	1.751	1.710	30.152	10.411	2.220
2	2.306	2.415	59.843	14.194	6.970
3	265	996	30.782	7.058	3.546
4	182	414	32.997	1.613	5.352
5	104	329	9.283	1.941	39.167
Total general	4.608	5.864	163.057	35.217	57.255

El reemplazo de la totalidad de puntos por cada una de las categorías tendría la inversión asociada (por categoría) que se presenta en la siguiente tabla.

Categoría	VSAP sin luminaria
	Inversión \$
1	\$1.742.796.792
2	\$3.186.767.013
3	\$1.600.339.067
4	\$1.620.279.200
5	\$1.931.348.100
Total	\$10.081.530.171
Total en US\$	\$20.163.060

Como queda en evidencia en las tablas anteriores, todas las comunas del país cuentan con tecnologías ineficientes, ahora bien, las cantidades varían considerablemente entre una y otra, por lo cual, es necesario definir un tamaño mínimo de proyecto (respecto de la inversión), que será abordado por un modelo en base ESCO. Con lo anterior y en base a consulta a empresas socias a ANESCO, el tamaño promedio de los proyectos que se han desarrollado bajo este modelo es de \$50.000.000, por tanto, en la siguiente tabla se presenta el desglose por comuna junto con el monto de inversión asociado a cada una de ellas.

Tabla: Comunas y montos de inversión requeridos

Categoría	Comuna	Inversión \$
1	Arica	92.923.433
1	Concepción	54.496.477
1	Conchalí	71.847.025
1	El Bosque	94.674.210
1	La Florida	59.147.430
1	La Reina	84.641.424
1	La Serena	86.346.261
1	Las Condes	55.101.970
1	Penalolén	53.225.503
1	Puente Alto	76.337.232

1	Quilpué	69.324.809
1	Recoleta	58.519.610
1	Talcahuano	62.232.440
1	Viña del Mar	55.709.676
2	La Granja	104.259.804
2	Lo Barnechea	155.951.242
2	Nunoa	151.537.559
2	Ovalle	65.760.467
2	Quillota	50.895.325
2	San Pedro De La Paz	109.505.119
2	Santiago	439.054.786
2	Vitacura	54.638.260
3	Alto del Carmen	71.393.196
3	Curicó	455.458.195
3	El Quisco	146.325.873
3	Limache	141.121.054
3	Melipilla	163.582.823
3	Monte Patria	77.212.360
3	Paillaco	54.093.501
3	Peñaflor	53.923.716
3	Romeral	83.003.756
4	La Calera	150.575.615
4	La Cisterna	87.461.864
4	La Cruz	62.473.209
4	Lanco	79.666.790
4	Longaví	87.203.450
4	Providencia	456.586.077
4	Villa Alemana	590.497.585
4	Yerbas Buenas	76.972.057
5	Diego de Almagro	87.498.320
5	Hijuelas	118.376.285
5	Lautaro	73.930.553
5	Linares	216.286.801
5	Placilla	59.035.421
5	Renca	380.963.708
5	San Felipe	690.334.035
5	San Ignacio	119.985.751

En resumen, con las consideraciones anteriormente expuestas, podrían desarrollarse proyectos en 47 comunas bajo el modelo ESCO, con una inversión aproximada de \$6.691 millones de pesos.

5.4.2 Modelo con financiamiento público

Para estimar la población objetivo que se beneficiaría de éste modelo, se excluyen aquellos proyectos considerados en el modelo ESCO, por lo que, en primera instancia, el primer grupo de comunas que debiera considerarse, son aquellos proyectos rentables en términos privados, pero que por su bajo nivel de inversión, se dejan fuera del modelo ESCO. Para esto se considera el reemplazo únicamente de lámpara y balasto, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla: comunas e inversión de reemplazo de lámpara y balasto

Cat	Comuna	Inversión
1	Buin	19.622.687
1	Calbuco	1.636.894
1	Caldera	17.827.425
1	Calera de Tango	2.811.351
1	Canete	450.146
1	Carahue	4.081.896
1	Castro	12.194.860
1	Cauquenes	543.312
1	Chiguayante	13.582.800
1	Chillán	13.582.800
1	Chimbarongo	2.987.332
1	Cochrane	1.313.176
1	Coinco	1.227.671
1	Colina	1.902.462
1	Concón	10.662.498
1	Contulmo	1.833.678
1	Copiapó	34.831.456
1	Coquimbo	33.510.269
1	Coronel	30.425.472
1	Curanilahue	4.302.337
1	Estación Central	24.496.509
1	Freirina	3.395.700
1	Galvarino	736.602
1	Gorbea	409.224
1	Guaitecas	33.957
1	Hualpén	8.225.767
1	Hualqui	15.751.863
1	Huechuraba	10.054.614
1	Independencia	3.508.118
1	Iquique	4.092.235
1	La Pintana	9.771.041

Cat	Comuna	Inversión
1	Parral	15.565.862
1	Pedro Aguirre Cerda	2.299.644
1	Pirque	305.613
1	Pudahuel	8.385.321
1	Punta Arenas	15.175.293
1	Purranque	1.014.423
1	Putendo	358.275
1	Quilicura	19.754.228
1	Quinta de Tilcoco	6.383.887
1	Quinta Normal	31.082.464
1	Quintero	3.242.269
1	Rancagua	19.637.632
1	Renaico	679.140
1	San Antonio	10.638.072
1	San Carlos	22.983.519
1	San Fernando	4.562.415
1	San Joaquín	6.078.303
1	San Miguel	18.786.968
1	San Ramón	18.407.965
1	San Vicente	20.426.385
1	Santa Cruz	6.050.816
1	Santo Domingo	5.770.051
1	Talca	6.050.549
1	Temuco	35.106.246
1	Tomé	2.740.058
1	Torres del Paine	475.104
1	Traiguén	6.104.410
1	Valdivia	6.313.344
1	Vallenar	9.061.278
1	Valparaíso	177.505
1	Yumbel	30.437.894

1	Laja	245.534
1	Lampa	1.349.705
1	Llailay	611.226
1	Lo Espejo	645.183
1	Lo Prado	3.840.228
1	Loncoche	2.556.350
1	Los Ángeles	37.731.627
1	Los Lagos	8.037.328
1	Lota	3.167.693
1	Lumaco	2.168.885
1	Machalí	818.447
1	Macul	28.851.739
1	Maipú	34.275.642
1	Malloa	2.619.030
1	Natales	5.502.774
1	Ninhue	81.845
1	Nueva Imperial	5.810.861
1	Osorno	1.536.910
2	Chol-Chol	36.706.336
2	Cobquecura	11.376.154
2	Cochamó	8.727.652
2	Codegua	8.088.040
2	Coelemu	12.048.153
2	Colbún	13.199.627
2	Colchane	3.298.624
2	Collipulli	16.746.947
2	Coltauco	12.157.531
2	Combarbalá	10.101.060
2	Constitución	34.522.505
2	Corral	10.928.069
2	Curacautín	15.509.571
2	Curacaví	18.203.334
2	Curarrehue	13.570.569
2	Curepto	8.100.027
2	Dalcahue	8.010.875
2	Doñihue	12.672.960
2	El Carmen	9.623.089
2	El Monte	19.822.290
2	El Tabo	23.385.921
2	Frutillar	11.630.865
2	Futaleufú	3.652.691

2	Algarrobo	17.326.396
2	Alhué	8.871.679
2	Alto BioBio	17.447.303
2	Angol	36.706.336
2	Arauco	26.125.807
2	Aysén	16.746.198
2	Bulnes	15.429.157
2	Cabrero	18.940.517
2	Calle Larga	7.786.124
2	Camarones	2.440.462
2	Canela	18.761.552
2	Casablanca	5.942.475
2	Catemu	9.073.948
2	Cerrillos	48.206.956
2	Chanco	2.886.345
2	Chañaral	24.568.313
2	Chile Chico	8.889.683
2	Chillán Viejo	16.544.671
2	Mostazal	1.616.216
2	Nancagua	11.712.524
2	Navidad	10.846.053
2	Negrete	5.093.550
2	Niquén	8.556.271
2	Nogales	16.206.796
2	Ohiggins	926.175
2	Padre Hurtado	29.043.824
2	Padre Las Casas	39.417.128
2	Paiguano	8.337.578
2	Palmilla	8.390.705
2	Papudo	9.217.745
2	Paredones	13.392.535
2	Pelluhue	3.743.968
2	Pemuco	17.645.340
2	Pencahue	16.633.149
2	Peralillo	19.461.684
2	Perquenco	12.902.443
2	Petorca	18.883.575
2	Peumo	10.449.424
2	Pica	12.358.340
2	Pichidegua	13.302.263
2	Pitrufquén	16.472.751

2	Futrono	11.223.316
2	General Lagos	2.358.446
2	Graneros	19.449.204
2	Hualaihué	16.549.133
2	Hualané	19.485.689
2	Huara	5.198.984
2	Huasco	15.893.009
2	Illapel	22.741.057
2	Isla de Maipo	14.248.002
2	La Estrella	8.443.598
2	La Higuera	7.443.409
2	La Ligua	23.963.702
2	La Unión	29.552.511
2	Lago Verde	2.124.402
2	Las Cabras	15.164.700
2	Lebu	18.755.472
2	Licantén	13.806.614
2	Litueche	11.054.093
2	Lolol	12.384.344
2	Los Alamos	13.958.536
2	Los Andes	40.357.722
2	Maria Elena	15.062.852
2	María Pinto	18.203.334
2	Maule	12.613.776
2	Mejillones	16.839.188
2	Melipeuco	11.258.131
2	Molina	28.858.779
2	San Juan de la Costa	17.665.344
2	San Pedro	15.100.859
2	San Pedro de Atacama	9.939.882
2	San Rafael	15.350.906
2	Santa Juana	9.524.199
2	Santa María	9.599.116
2	Sierra Gorda	4.712.892
2	Taltal	8.315.787
2	Teno	19.175.756
2	Tierra Amarilla	18.378.075
2	Timaukel	846.160
2	Tocopilla	17.969.593
2	Treguaco	10.594.006
2	Tucapel	9.572.146

2	Porvenir	10.932.070
2	Primavera	2.032.385
2	Puchuncaví	9.704.749
2	Puerto Octay	7.668.505
2	Puerto Varas	28.688.447
2	Pumanque	6.885.303
2	Punitagui	19.081.612
2	Putre	3.954.749
2	Puyehue	8.516.565
2	Quellón	16.349.138
2	Quemchi	17.381.290
2	Quilleco	7.812.345
2	Quillón	5.278.983
2	Quinchao	1.697.850
2	Quirihue	8.562.264
2	Ránquil	11.368.152
2	Rengo	34.077.262
2	Retiro	10.073.886
2	Río Claro	9.512.961
2	Río Negro	11.036.773
2	Río Verde	716.136
2	Saavedra	10.513.852
2	Sagrada Familia	13.124.710
2	Salamanca	18.350.171
2	San Clemente	9.273.718
2	San Javier	28.313.383
2	San José de Maipo	10.020.899
3	Paine	37.575.368
3	Panguipullí	38.341.202
3	Pelarco	7.709.101
3	Pichilemu	24.650.437
3	Rauco	19.695.886
3	Río Bueno	22.785.147
3	San Bernardo	4.663.489
3	San Esteban	368.218
3	San Pablo	14.775.146
3	Tiltil	25.305.957
3	Tirúa	3.497.571
3	Tortel	3.959.200
4	Coihueco	13.833.607
4	Juan Fernández	5.659.500

2	Vichuquén	9.833.862	4	Los Vilos	41.735.696
2	Victoria	25.097.946	4	Olivar	32.306.440
2	Vicuna	17.987.573	4	Panquehue	29.372.805
2	Vilcún	16.849.583	4	Portezuelo	9.059.831
2	Villa Alegre	11.031.529	4	Queilén	9.343.749
2	Villarrica	34.110.461	4	Quilaco	16.612.764
2	Yungay	12.596.545	5	Cabo de Hornos	16.299.360
2	Zapallar	11.320.143	5	Chaitén	44.786.711
3	Ancud	36.670.473	5	Chépica	21.601.861
3	Chonchi	21.856.886	5	Cunco	39.644.420
3	Curaco de Vélez	5.908.518	5	Isla de Pascua	982.136
3	Ercilla	12.235.783	5	Lago Ranco	9.292.470
3	Freire	11.444.580	5	Máfil	6.791.400
3	Mariquina	16.427.169	5	Marchihue	10.466.645
3	Mauñín	9.278.966	5	Pucón	4.174.080
3	Mulchén	19.331.480	5	Río Hurtado	45.502.380
3	Ollagüe	3.563.280	5	San Gregorio	3.535.473

En resumen, en primera instancia, los beneficiarios de éste mecanismo con las consideraciones anteriormente expuestas, serían proyectos de reemplazo de tecnologías ineficientes por lámparas VSAP con balasto electrónico en 260 comunas, con una inversión aproximada de \$3.448 millones de pesos.

Ahora bien, y considerando los resultados de la evaluación social presentados en el apartado 4.4 del presente informe, los escenarios socialmente rentables correspondían al reemplazo de la totalidad del parque por tecnología VSAP, considerando sólo la lámpara y el balasto, siendo este escenario redundante respecto a lo planteado como público objetivo tanto para éste modelo como para el Modelo ESCO. Como una segunda etapa, y nuevamente en base a los resultados de rentabilidad social de planteados anteriormente, correspondería realizar el reemplazo de todo el parque¹⁸ con tecnología VSAP considerando esta vez el reemplazo también de la luminaria.

Con lo anterior, las inversiones y cantidad de puntos a reemplazar a nivel nacional se presentan en la siguiente tabla:

Tabla: Cantidad de puntos e inversión requerida

¹⁸ Se hace presente que el parque considerado corresponde al generado en base a la información del catastro del año 2005 y el modelo planteado en el segundo apartado del presente informe

Categorías	Cantidad de puntos	Inversión \$
1	1.578.121	150.460.592.920
2	No rentable socialmente	
3	No rentable socialmente	
4	71.444	6.938.340.673
5	55.657	5.197.052.566

En resumen, el público objetivo en esta segunda etapa de éste modelo corresponde al parque total de las categorías 1, 4 y 5 (dado sus resultados de rentabilidad social), lo que se traduce en el remplazo de 1.705.221 puntos, con una inversión asociada del orden alrededor de \$163 mil millones de pesos, el detalle por comuna se presenta en la siguiente tabla:

Tabla: Comunas, puntos e inversión requerida

Ca t	Comuna	Puntos	Inversión
1	Alto Hospicio	4.350	325.727.920
1	Andacollo	1.243	92.065.926
1	Antofagasta	15.957	1.318.598.453
1	Antuco	847	67.380.385
1	Arica	41.004	3.429.838.408
1	Buin	5.484	436.357.495
1	Cabildo	3.556	282.695.388
1	Calama	26.662	1.934.994.612
1	Calbuco	1.260	86.068.240
1	Caldera	6.277	513.645.182
1	Calera de Tango	4.001	287.839.656
1	Camina	380	30.290.190
1	Canete	1.821	151.238.925
1	Carahue	6.135	483.657.600
1	Cartagena	2.088	168.380.114
1	Castro	8.406	655.197.258
1	Cauquenes	6.484	523.839.006
1	Cerro Navia	5.947	467.735.518
1	Chiguayante	7.910	648.640.410
1	Chillán	30.645	2.481.164.300
1	Chimbarongo	3.876	309.442.240

Ca t	Comuna	Puntos	Inversión
1	La Pintana	20.162	1.583.286.836
1	La Reina	31.637	2.264.585.739
1	La Serena	24.768	1.962.145.346
1	Laguna Blanca	194	15.050.053
1	Laja	1.835	149.859.065
1	Lampa	4.176	316.833.685
1	Las Condes	76.267	5.954.641.958
1	Llaillay	4.517	369.192.307
1	Llanquihue	950	75.880.135
1	Lo Espejo	4.558	347.908.615
1	Lo Prado	5.317	394.985.110
1	Loncoche	3.445	273.300.438
1	Lonquimay	545	44.959.805
1	Los Ángeles	34.692	2.748.423.096
1	Los Lagos	3.240	262.067.814
1	Los Muermos	130	14.063.380
1	Los Sauces	496	39.311.164
1	Lota	4.614	369.879.208
1	Lumaco	656	53.057.803
1	Machalí	12.491	1.013.109.951
1	Macul	33.381	2.632.609.891

1	Cisnes	540	43.124.400
1	Cochrane	558	37.444.526
1	Coihaique	4.425	349.795.759
1	Coinco	3.323	264.537.064
1	Colina	18.460	1.278.192.914
1	Concepción	68.616	5.766.839.108
1	Conchalí	20.609	1.632.662.538
1	Concón	3.974	322.962.409
1	Contulmo	633	51.003.485
1	Copiapó	12.234	951.043.645
1	Coquimbo	19.728	1.589.227.326
1	Coronel	10.592	874.316.205
1	Curanilahue	5.743	451.984.611
1	El Bosque	27.157	2.151.390.900
1	Empedrado	315	24.973.490
1	Estación Central	8.145	629.359.736
1	Florida	1.777	141.499.225
1	Freirina	16.678	1.312.700.398
1	Fresia	1.001	79.427.019
1	Galvarino	388	30.853.216
1	Gorbea	1.130	89.674.420
1	Guaitecas	454	36.358.968
1	Hualpén	25.579	2.161.239.434
1	Hualqui	3.349	272.130.234
1	Huechuraba	19.841	1.583.383.306
1	Independencia	20.027	1.507.114.156
1	Iquique	9.039	944.958.968
1	La Florida	83.050	6.297.803.816
1	Quilpué	19.886	1.575.347.330
1	Quinta de Tilcoco	2.050	160.602.475
1	Quinta Normal	15.860	1.168.165.806

1	Maipú	29.008	2.153.117.648
1	Malloa	4.059	322.621.739
1	Natales	1.947	158.139.922
1	Ninhue	314	24.688.218
1	Nueva Imperial	5.929	475.583.733
1	Olmué	1.500	119.790.000
1	Osorno	13.471	1.091.252.628
1	Palena	350	27.951.000
1	Parral	8.809	700.017.516
1	Pedro Aguirre Cerda	6.116	474.318.701
1	Penalolén	14.770	1.137.821.725
1	Penco	2.939	239.213.251
1	Pinto	975	78.576.640
1	Pirque	372	34.360.128
1	Pozo Almonte	1.643	135.132.162
1	Pudahuel	14.506	1.162.254.027
1	Puente Alto	89.747	6.946.383.683
1	Puerto Montt	20.622	1.505.186.240
1	Punta Arenas	35.496	2.943.174.880
1	Puqueldón	144	11.180.400
1	Purén	1.259	104.297.699
1	Purranque	1.427	113.792.650
1	Putendo	2.698	214.926.837
1	Quilicura	40.325	3.226.321.103
4	Lanco	3.105	243.793.572
4	Longaví	3.389	262.306.695
4	Los Vilos	2.033	161.734.030
4	Olivar	1.653	133.729.857
4	Panquehue	1.527	128.021.004
4	Portezuelo	376	27.719.275
4	Providencia	26.271	2.091.856.195

1	Quintero	2.296	163.706.602
1	Rancagua	30.248	2.482.863.648
1	Recoleta	27.754	2.148.324.566
1	Renaico	1.378	110.725.201
1	Requínoa	2.000	161.025.200
1	Rinconada	2.726	221.359.185
1	Río Ibáñez	428	34.180.080
1	San Antonio	22.882	1.858.087.866
1	San Carlos	7.323	569.029.182
1	San Fabián	252	19.965.000
1	San Fernando	8.763	699.597.528
1	San Joaquín	18.211	1.392.790.515
1	San Miguel	14.046	1.140.985.658
1	San Nicolás	512	39.293.216
1	San Ramón	5.389	395.301.119
1	San Vicente	12.857	1.012.620.206
1	Santa Barbara	2.376	186.607.734
1	Santa Cruz	3.555	283.532.954
1	Santo Domingo	5.361	437.716.824
1	Talagante	2.416	187.663.208
1	Talca	25.112	1.950.070.235
1	Talcahuano	35.673	2.927.622.771
1	Temuco	69.681	5.829.139.956
1	Teodoro Schmidt	916	73.539.308
1	Toltén	375	29.840.712
1	Tomé	15.120	1.200.698.607
1	Torres del Paine	129	10.378.836
1	Traiguén	5.507	438.897.213
1	Valdivia	11.325	958.792.475
1	Vallenar	4.647	323.357.742

4	Queilén	256	20.772.271
4	Quilaco	600	43.604.970
4	Villa Alemana	12.000	1.056.404.566
4	Yerbas Buenas	3.804	302.834.982
5	Cabo de Hornos	480	38.332.800
5	Chaitén	1.316	105.076.890
5	Chépica	581	42.722.741
5	Cunco	1.119	85.865.012
5	Diego de Almagro	1.225	110.902.572
5	Hijuelas	3.426	273.443.139
5	Isla de Pascua	28	2.929.200
5	Lago Ranco	241	19.035.545
5	Lautaro	1.950	148.227.176
5	Linares	7.884	620.753.572
5	Máfil	250	19.807.750
5	Marchihue	315	24.621.250
5	Placilla	1.950	141.705.570
5	Pucón	142	9.473.316
5	Renca	10.932	818.707.112
5	Río Hurtado	1.447	115.257.557
5	San Felipe	18.725	1.443.606.269
5	San Gregorio	70	5.370.050
5	San Ignacio	3.533	281.814.756

1	Valparaíso	24.165	1.986.476.717				
1	Viña del Mar	30.259	2.562.414.389				
1	Yumbel	8.447	667.810.003				
4	Coihueco	651	48.758.998				
4	Juan Fernández	300	23.958.000				
4	La Calera	7.613	612.004.504				
4	La Cisterna	4.569	379.157.764				
4	La Cruz	3.297	261.943.651				

5.5. Mecanismos requeridos para su funcionamiento (a nivel de requerimiento, no de diseño específico: regulaciones, normativa, leyes, método de evaluación y priorización de inversiones, costo de la consultoría propuesta).

a) Asesoría técnica centralizada y única a nivel nacional, a cargo de la Agencia Chilena de EE o el Ministerio de Energía

Para el funcionamiento de esta asesoría y el pleno cumplimiento de los objetivos descritos precedentemente, se requiere a lo menos los siguientes elementos de diseño de Programa:

- Manual de Procedimientos del Programa de Asesoría Técnica.
- Protocolo para el desarrollo de catastro georeferenciado.
- Modelo de auditoría de AP existente.
- Modelo de proyecto técnico y financiero para proyecto de recambio de AP.
- Normativa exigible a las tecnologías que se aceptarán en el Programa.
- Normativa ambiental exigible para disposición final de tecnologías.
- Modelo de licitación (depende del modelo de financiamiento).
- Modelo de contrato (depende del modelo de financiamiento).
- Contrato entre ente técnico y Gobierno Regional
- Contrato entre ente técnico y Municipalidad
- Protocolo de M&V
- Manual de capacitaciones a funcionarios municipales

b) Modelo ESCO

En caso que el modelo de financiamiento sea ESCO, se requiere a lo menos los siguientes elementos de diseño de Programa:

- Modelo de licitación con componente ESCO.
- Modelo de Contrato entre Municipio y ESCO.
- Reglamentación de Funcionamiento de cofinanciamiento FNDR.
- Reglamentación de Fondo de Garantía.
- Contrato entre Gore y Municipalidad.
- Contrato entre Tesorería y Municipalidad.

c) Modelo Financiamiento público con cofinanciamiento FNDR

En caso que el modelo de financiamiento sea una combinatoria de recursos fiscales (FNDR + Fondo especial Subdere), se requiere a lo menos los siguientes elementos de diseño de Programa:

- Modelo de licitación de recambio tecnológico
- Modelo de Contrato de recambio tecnológico
- Reglamentación de Funcionamiento de cofinanciamiento FNDR y del programa de financiamiento vía Subdere
- Contrato entre Gore y Subdere
- Contrato entre Subdere y Municipalidad
- Contrato entre Tesorería y Municipalidad

6. PLAN DE INVERSIONES DE UN PROGRAMA DE RECAMBIO DE AP

En base a los resultados de las evaluaciones económicas y los análisis de sensibilidad presentados en los numerales anteriores, sumado a las tecnologías existentes en el parque de luminarias públicas en Chile, el cual vale recalcar es de características eficiente debido a la alta presencia de VSAP, se recomienda el siguiente plan de acción y de inversiones.

6.1. Primer paso

La alternativa más rentable en términos privados hoy en día, es el recambio de las tecnologías “no eficientes”, definidas en capítulos previos, por VSAP sin recambio de luminaria. Para lo anterior es fundamental tener un catastro detallado, el cual identifique las luminarias susceptibles a utilizar lámparas y balastos de VSAP. Este recambio, dado que posee rentabilidad privada, debería realizarse en base a un modelo ESCO como el propuesto.

A continuación se presenta el número de puntos por segmento y el nivel de inversiones necesario para llegar a un parque “100%” VSAP.

Tabla: Puntos ineficientes e Inversión en Recambio

Categoría	Nº de puntos Ineficientes	Inversión Recambio VSAP (lámpara más balasto)
1	46.244	\$1.418.971.092
2	85.728	\$2.542.434.230
3	42.647	\$1.294.823.126
4	40.558	\$1.428.049.826
5	50.824	\$1.591.418.620
Total	266.001	\$8.275.696.894

Las inversiones requeridas no superan el 34% del presupuesto del FNDR del año 2011 para AP, por lo cual el sector privado debería responder de manera rápida a este opción de recambio. Cabe mencionar que la información base, utilizada para determinar el número de puntos, proviene del catastro realizado el año 2005 y adecuado en base a la metodología presentada en este mismo informe, por lo cual se desconoce a ciencia cierta si aún persiste este número de lámparas ineficientes.

6.2. Segundo paso

Contando ya con un parque 100% VSAP, sólo cabría la opción de mejora en base a recambio por tecnología LED. Con los precios actuales, ésta opción no es rentable en términos privados ni sociales. Ahora bien, en base al análisis de sensibilización

presentado en la sección 5.1., una disminución de los costos de la tecnología LED en un 10%, permitiría rentabilizar, en términos sociales, el reemplazo del parque por ésta tecnología en las categorías 1, 4 y 5. Es en base a lo anterior que, a continuación se presenta el número de puntos e inversión necesaria para realizar dicho recambio.

Tabla: número de puntos e inversión para recambio con LED

Categoría	Nº de puntos Ineficientes	Inversión Recambio LED (reducción de costos en 10%)
1	1.531.876	\$637.797.146.729
4	30.885	\$12.752.988.903
5	4.833	\$1.925.351.711
Total	1.567.594	\$652.475.487.343

El número de puntos a reemplazar con una disminución de un 10% del costo de la tecnología, es equivalente al 65% del parque nacional. Con el nivel de inversión pública, asumiendo la utilización del 100% de los recursos FNDR del año 2011, más la inversión proveniente de otros fondos, sería factible realizar recambios anuales por un monto alrededor de \$ 52.500 millones anuales. Cabe destacar que, la asignación anual de estos recursos, en un plazo de 5 años, permitiría reemplazar una fracción menor del parque total (aproximadamente un 8% del total anual).

Por otro lado, con una disminución de un 25% del costo de la tecnología LED, las restantes categorías se rentabilizan en términos sociales. A continuación se presenta tabla con número de puntos e inversión asociada.

Tabla: Número de puntos e inversión requerida para recambio LED 25% menos costo

Categoría	Nº de puntos Ineficientes	Inversión Recambio LED (reducción de costos en 25%)
2	512.537	\$178.436.761.246
3	73.106	\$25.772.573.147
Total	585.643	\$204.209.334.393

Como conclusión, el parque actual es altamente eficiente en términos de los actuales costos de las tecnologías disponibles, por lo que no todos los proyectos que se presentan al análisis son rentables de manera social o privada. De existir aún luminarias “no eficientes”, es oportuno preparar las bases de modelo ESCO propuesta, dada la rentabilidad privada que se observa al reemplazar la tecnología “no eficiente” por tecnología VSAP (reemplazo de lámpara y balasto únicamente).

Si se desea realizar cambios por tecnología LED, es recomendable comenzar con proyectos pilotos y monitorear los precios de la tecnología en el tiempo. Dados los resultados de las evaluaciones económicas y las sensibilizaciones presentadas, el escenario más probable es que los recambios se realicen mayoritariamente a través de recursos públicos, al menos en el corto – mediano plazo, ya que de las evaluaciones y sensibilizaciones no se obtienen rentabilidades positivas o atractivas en términos privados. Hoy en día, con los recursos públicos disponibles para proyectos de AP, es difícil realizar un recambio masivo por tecnología LED, aunque exista disminución de un 25% de los costos de ésta.

De todas maneras, cuando los costos lleguen a niveles de rentabilidad privada, es totalmente recomendable seguir un camino de financiamiento tipo ESCO, ya que al existir una rentabilidad privada, los recursos públicos debieran ser utilizados con otros fines, considerando además que el Ministerio de Desarrollo Social así lo recomienda en su metodología de evaluación de proyectos.

Finalmente, con las consideraciones anteriormente expuestas, se presenta el plan de inversiones propuesto, con sus respectiva fuente de financiamiento.

Tabla: Plan de inversiones propuesto y fuente de financiamiento

Modelo	Año				
	1	2	3	4	5
VSAP (sin luminaria) - ESCO		\$8.275.696.894			
LED - Público	\$52.925.436.879	\$60.864.252.410	\$69.993.890.272	\$80.492.973.813	\$92.566.919.885

7. INFORME TÉCNICO – ECONÓMICO PARA LA DETERMINACIÓN DE MEPS EN CHILE

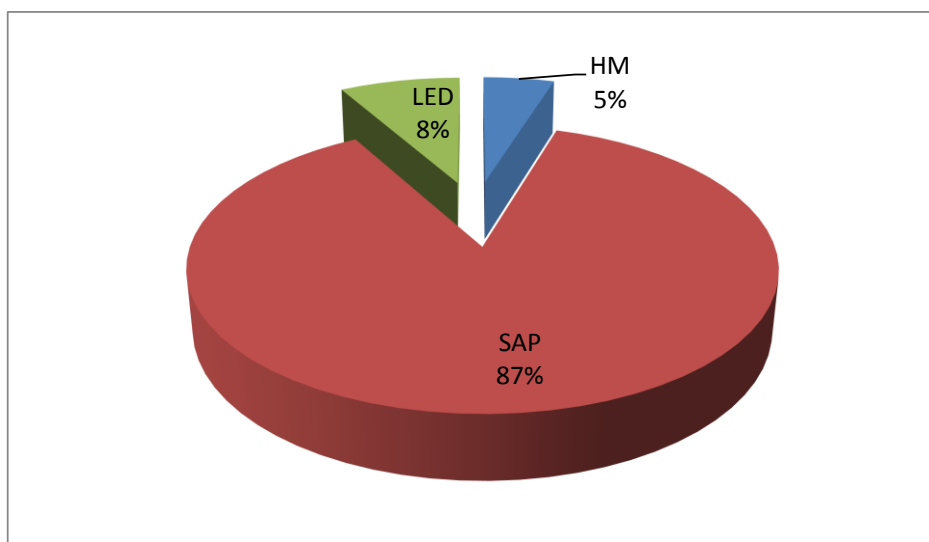
7.1. Mercado actual y futuro de AP

Para conocimiento del mercado de AP a nivel nacional y conocer la “tasa de recambio” y nuevos proyectos de alumbrado público por parte de los municipios, se analizará la información obtenida en el marco de esta misma consultoría respecto de las licitaciones relacionadas con alumbrado público de vías de tránsito vehicular.

Esta información será considerada como el estado del arte del mercado AP al momento de la presente consultoría y será proyectada de acuerdo a consideraciones a definir.

De acuerdo a la información de licitaciones de parte de los municipios para el año 2012 desde el portal www.mercadopublico.cl se identifican los tipos y cantidad de luminarias requeridas desde el mercado nacional para distintas tecnologías, a continuación se muestra la proporción por de tecnología demanda al año 2012.

Gráfica. Tecnología demandada desde los municipios



Para efectos de proyección se asumirá que existe el mismo mercado de alumbrado público para los años siguientes tanto en cantidad como en tipo de tecnología requerida.

Se considera la tecnología Haluro Metálico para aplicaciones especiales más allá de las consideraciones en eficiencia energética.

Considerando lo anterior y teniendo en cuenta lo señalado en el punto 3.4 acerca de las tecnologías que cumplen con el propósito de la EE, se señala lo siguiente:

- NO se requieren por parte de los municipios tecnologías que sean consideradas ineficientes energéticamente
- Desde los municipios se requieren solo tecnologías que cumplen con el propósito de la EE
- En cuanto a cada tecnología en particular, LED es considerada un tecnología altamente eficiente en todos sus tipos, para VSAP en general es requerida lámpara súper flujo, considerada una lámpara altamente eficiente
- En general la tecnología VSAP es requerida con balasto doble nivel de potencia, que aporta al ahorro económico

El desglose de compras por parte de los municipios se presenta en el presente cuadro.

Cuadro: Demanda por tipo de luminaria desde los municipios año 2012 (por licitación)

Tipo lumin	Puntos	28W	50W	60W	70W	88W	92W	100W	112W	150W	175W	250W	400W	1.000W
HM	4												4	
HM	3.495				3.495									
HM	24													24
HM	147											147		
HM	1.056							662		394				
HM	153											153		
HM	27							17					10	
HM	6												6	
LED	6.000							6000						
LED	793				418					375				
LED	909					909								
LED	100						100							
LED	200			50		150								
LED	114							114						
LED	93		93											
LED	73		73											
LED	85									85				
SAP	23.129							19347		3384		398		
SAP	11.030							7.675		1.031		980	1.344	
SAP	10.333							9675				558	100	
SAP	5.132							700		2.536	302	1.116	478	
SAP	10.183				3.521			3.639		1.450		1.573		
SAP	6.526				2.428			1.682		1.111		1.192	113	
SAP	8.547				5.797					1.745		783	222	
SAP	3.706							1.764		1.626		282	34	
SAP	3.210							1470		905		835		
SAP	2.303							1907		368		28		
SAP	1.409							1.301		108				
SAP	1.847							1600		83		164		
SAP	322											322		
SAP	287							13		151		123		
SAP	215				215									
SAP	50											50		
SAP	116				49					67				
SAP	63											63		
SAP	68							68						
SAP	79							78				1		
SAP	111				111									
SAP	77							77						
SAP	73							73						
SAP	144				144									
SAP	100				47			37		16				
SAP	93				92			1						
SAP	85											85		
TOTAL	102.517	0	166	50	16.317	1.059	100	57.900	0	15.435	302	8.853	2.311	24

7.2. Información relevante para establecimiento de MEPs

Adicionalmente al tipo de tecnología y la cantidad requerida de parte del mercado, resultan relevantes otras características técnicas para establecer los valores de los estándares mínimos de eficiencia energética, en particular se requiere conocer la Eficacia Lumínica de las luminarias requeridas, lo anterior resulta muy difícil de obtener teniendo en cuenta que las licitaciones no especifican ese valor de manera explícita, solo algunas licitaciones explicitan ese valor.

Para efectos de la medición de impacto por establecimiento de MEPs, se debe establecer un valor específico para poder sensibilizar respecto de lo que provocaría un valor de Eficacia Lumínica mínimo establecido.

De esta forma se propone establecer una Eficacia Lumínica típica por cada potencia y tecnología. Será utilizada información desde ensayos del laboratorio de fotometría de Universidad Católica de Valparaíso. Así se contará con la Eficacia Lumínica de la luminaria típica por tipo y potencia.

7.3. Tecnologías a aplicar MEPs

Tal como se señaló anteriormente el mercado de alumbrado público a nivel nacional consideró solo las tecnologías Haluro Metálico (HM), Sodio Alta Presión (VSAP) y LED.

Respecto de la tecnología HM se considera que es utilizada para aplicaciones específicas en donde se requiera de una mejor reproducción de color¹⁹ en comparación con las otras tecnologías (rotondas, pasos peatonales, etc.), su bajo porcentaje demandado en comparación con el total, del orden del 5%, indica que la utilización de esta tecnología obedece a dichas aplicaciones específicas más allá de consideraciones de EE.

Por lo anterior esta tecnología **no** será considerada para la aplicación de estándares mínimos de eficiencia energética.

Asimismo, se debe tener en cuenta que a medida que avanza el desarrollo de la tecnología LED esta podría generar un remplazo sobre la tecnología HM, en respuesta a requerimientos de mejor rendimiento del color, lo anterior se recomienda sea evaluado caso a caso.

¹⁹ **Índice de rendimiento del color (IRC):** El índice de reproducción cromática (IRC), caracteriza la capacidad de reproducción cromática de los objetos iluminados con una fuente de luz. El IRC ofrece una indicación de la capacidad de la fuente de la luz para reproducir colores normalizados, en comparación con la reproducción proporcionada por una luz patrón de referencia.

Finalmente se propone que la aplicación de MEPs se realice a las tecnologías restantes requeridas desde la demanda de los municipios las cuales son **VSAP y LED**.

7.4. Definición del MEPs

Las luminarias de alumbrado público se definen básicamente por el producto que estas entregan, principalmente **lúmenes**, existen otras consideraciones técnicas que no serán consideradas para efectos de estos estándares mínimos. Este indicador de prestación está altamente relacionado con el potencia consumida por la luminaria, de esta forma se define uno de los indicadores más utilizados que es la **eficacia lumínica**.

El concepto de eficacia lumínica se aplica normalmente a la lámpara y no al conjunto luminaria o por lo menos existe distinta definición, para LED se considera la eficacia lumínica de la luminaria y para VSAP de la lámpara, para efectos del establecimiento de los MEPs será utilizada la eficacia lumínica del conjunto luminaria (lámpara, equipos eléctricos y elementos ópticos asociados) para el caso de las lámparas de descarga VSAP.

Tal como se señaló anteriormente, el año 2010 se generó una comisión experta que estableció una “metodología para seleccionar luminarias de alumbrado público con criterios de eficiencia energética” a continuación se presenta parte de esa metodología la cual se propone aplicar para determinar el grado de eficiencia energética en luminarias de alumbrado público, se considerará la siguiente formula:

$$\text{EFLum} = \text{PL/PT} \times \text{EFL} \times \text{RLum} \quad (\text{lúmenes/watt}) \quad (1)$$

Para el caso de las lámparas, en la tecnología (LED) la fuentes no pueden ser separadas de sus equipos eléctricos y, por ende no se puede determinar su consumo específico, se establecerá un criterio para manejar esta situación a fin de permitir la correcta comparación entre fuentes de una misma familia y de ésta con otras familias. Lo anterior implica la siguiente formula equivalente a (1).

$$\text{EFLum} = \text{EFLB} \times \text{RLum} \quad (\text{lúmenes/watt}) \quad (2)$$

Donde:

- **Potencia Lámpara (PL):** Potencia Total consumida en la lámpara medida en watts (W)
- **Potencia Total (PT):** Potencia consumida en el conjunto luminaria, medida en watts (W). (Incluye pérdidas balasto)

- **Rendimiento Lumínico de la Luminaria (RLum%)**: Porcentaje de la razón entre el flujo luminoso emitido por la luminaria y el flujo luminoso emitido por la lámpara.
- **Eficacia Conjunto Lámpara-Balasto (EFLB)**: es la razón de PL y PT multiplicado por la eficacia de la lámpara medida en lúmenes por watts (Lum/W).
- **Eficacia de la Lámpara (EFL)**: es la razón de lúmenes por watts que genera una lámpara (Lum/W)
- **Eficacia de la Luminaria (EFLum)**: es el producto entre la eficacia del conjunto lámpara-balasto y el rendimiento de la luminaria.

Adicionalmente se define:

- **Pérdidas de Balasto**: Corresponde a las pérdidas eléctricas máximas de un balasto medida en watts (W)

De los balastos

Fueron convenidos valores máximos de pérdidas en balastos para lámparas VSAP y HM. Se presenta el siguiente cuadro:

Cuadro: Pérdidas en balastos a voltaje nominal

Potencia (Watts)	Pérdida Máxima (Watts)*	
	Sodio Alta Presión	Haluros metálicos
70	16	15
100	16	16
150	20	22
250	27	25
400	37	33

(*) Las pérdidas serán medidas al voltaje nominal del balasto (ver IEC - 60923).

De las luminarias

En la siguiente tabla se indican los requerimientos mínimos para las luminarias sobre la forma en que ellas deben entregar sus prestaciones en los sistemas de alumbrado público:

Cuadro: Rendimiento lumínico

Aspectos	Requisitos
Fotometría	Clasificación: CIE 34-1976
	Rendimiento Lumínico (Rlum): igual o mayor de 70%

De las lámparas

La eficacia de las lámparas, EFL, deberá ser tal que asegure el valor asociado al MEPs de EFLum (eficacia lumínica de la luminaria) en lúmenes/watt.

Finalmente se propone aplicar como MEPs EFLum (eficacia lumínica de la luminaria)

7.5. Establecimiento del MEPs y su valor límite

Desde la oferta (proveedores) se tienen los siguientes valores típicos²⁰ de EFL para las lámparas de Sodio Alta Presión y EFLum de luminarias LED.

Tabla. Lum/W VSAP y LED

	PL [W]				
	70	100	150	250	400
VSAP EFL [Lum/W]	90	95	110	130	140
LED EFLum [Lum/W]	81				

A continuación se muestra el cálculo resultante para la EFLum de las tecnologías sujetas aplicación de MEPs.

²⁰ Dato UCV

Tabla. Eficacia Lumínica de Luminarias VSAP y LED

VSAP	PL [W]				
	70	100	150	250	400
VSAP EFL [Lum/W]	90	95	110	130	140
Perdida [W]	16	16	20	27	37
Rlum [%]	70%	70%	70%	70%	70%
PT [W]	86	116	170	277	437
EFLB[Lum/W]	73,26	81,90	97,06	117,33	128,15
EFLum [Lum/W]	51,28	57,33	67,94	82,13	89,70
LED EFLum [Lum/W]	81				

Nota: El valor de 81²¹ Lum/Watt de EFLum para LED se considera válido para las distintas potencias disponibles.

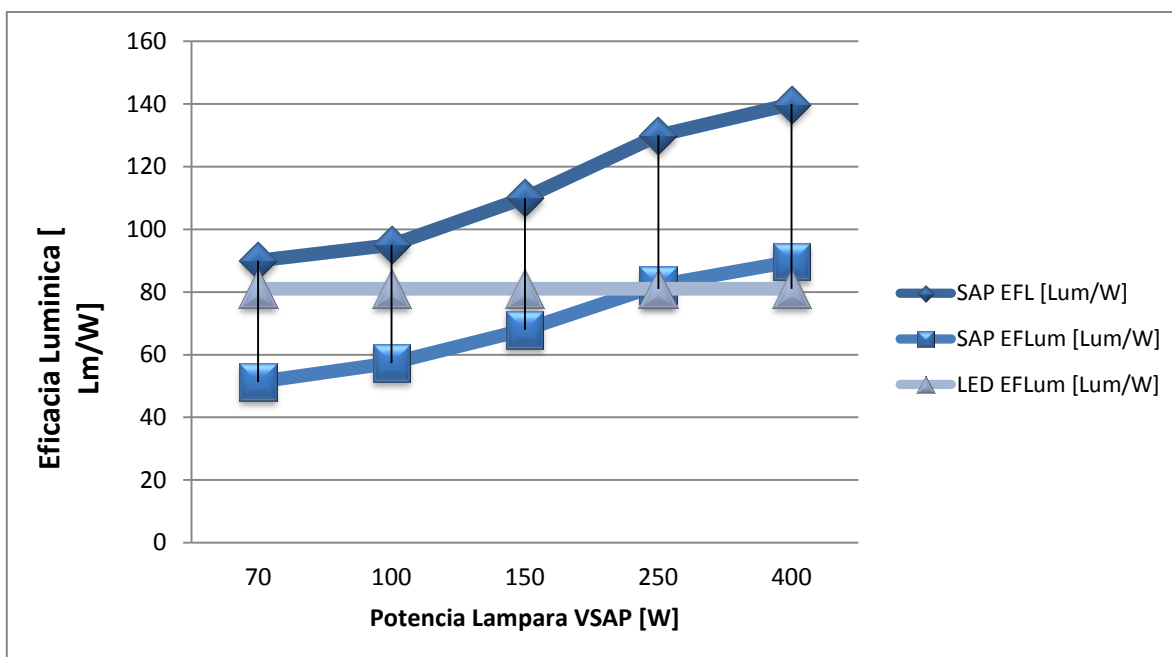
Para la luminaria de sodio de alta presión (VSAP) la potencia de la lámpara varía entre los 70 y 400 [W]; éstos son los valores que distribuyen los principales fabricantes; y sus pérdidas (balastos) entre los 16 y 37 [W] los cuales son los valores máximos para cada lámpara respecto a una determinada potencia propuesto para ser considerados desde el panel de expertos.

Recordemos que el rendimiento lumínico de la luminaria está fijado como igual o mayor al 70%, antecedente validado desde diferentes certificados desde la UCV.

En la siguiente gráfica se pueden apreciar los valores típicos de eficacias para tecnologías LED y VSAP disponibles en nuestro mercado.

Gráfica. EFL, EFLum

²¹ Dato UCV



De acuerdo a lo anterior se puede establecer que nuestro sujeto de MEPS, la EFLum para el caso de la tecnología VSAP aumenta gradualmente hasta incluso superar el valor de 81 Lum/W asociado a tecnología LED a partir de una potencia de 250 W VSAP.

Se establece claramente que para tecnología VSAP la EFLum aumenta a medida que aumenta la potencia de la lámpara, casi en la misma proporción que la EFL (eficacia lumínica de la lámpara).

Para el caso de la tecnología LED el valor para EFLum de 81 Lum/W se mantiene casi constante para todas las potencias disponibles en el mercado nacional en un escenario conservador.

7.6. Impacto por el establecimiento de MEPs

Serán identificados los impactos provocados por la fijación del mismo.

La estimación de los impactos será aplicada al mercado actual anualizado anteriormente descrito, año base 2012.

Escenario por incorporación de MEPs

Se analizará la eliminación de las luminarias VSAP hasta 100W (70 y 100W), no se considerará avanzar a la eliminación por sobre los 150W debido a la baja diferencia en EFlum con la tecnología VSAP.

MEPs 55 Lum/W

Un valor de EFlum de 55 Lum/W equivale a no permitir la comercialización de luminarias de VSAP de 70 Lum/W, la menor y más ineficiente en el rango de potencias en VSAP. Ver tabla anterior.

La cantidad de luminarias afectadas ascienden a 12.404 y se considera que serán reemplazadas por luminarias LED 55W.

MEPs 65 Lum/W

Un valor de EFlum de 65 Lum/W equivale a no permitir la comercialización de luminarias de VSAP de 100 W y 70W.

La cantidad de luminarias afectadas asciende a 51.107 (VSAP 100W) y 12.404 (VSAP 70W) y se considera que serán reemplazadas por luminarias LED 55W.

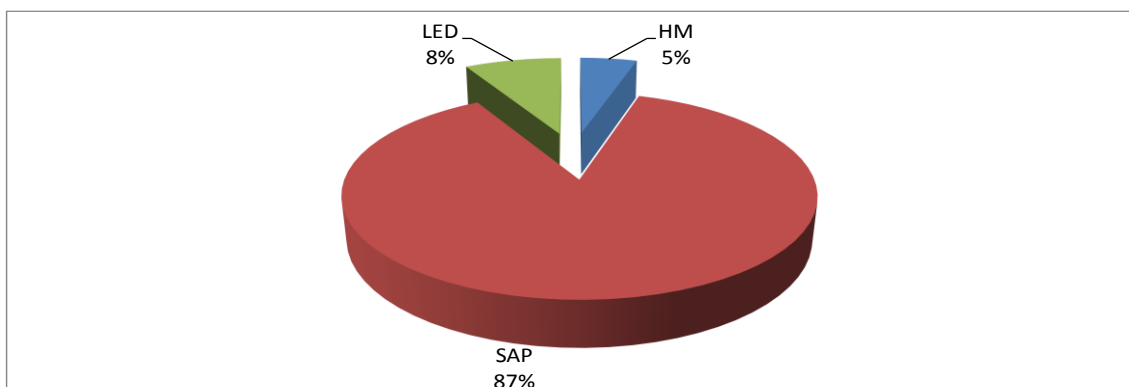
Se establecen las siguientes consideraciones técnicas y financieras:

- Escenario base año 2012
- Se asume igual costo de instalación por equipo
- Tasa de descuento social de 6%
- Horizonte de evaluación 10 años
- Costo de energía tarifa BT1 año 2013 (valor constante)
- Se incluye O&M: Reposición de lámpara VSAP y balastos a los 5 años de evaluación del proyecto
- Se considera precio social de emisiones CO₂e (0,46 TCO₂e/MWh, \$1.933/TCO₂e)
- VSAP considera BDNP, 10 horas al día de funcionamiento, 6 horas en potencia reducida

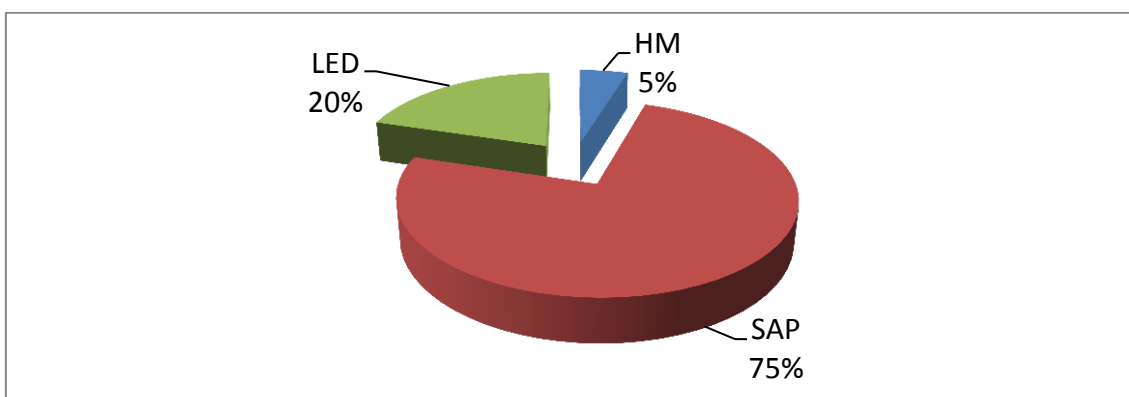
Nota: Precios de las luminarias en anexo

Conformación del mercado antes y después de MEPs

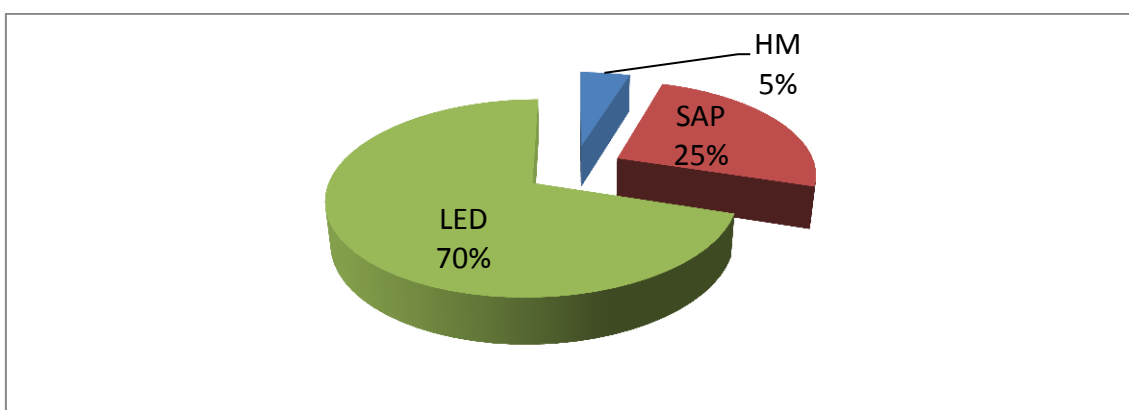
Gráfica: Composición del mercado de AP sujeto de MEPs antes de la incorporación del estándar



Gráfica: Composición del mercado de AP después de la aplicación de estándar MEPs 55 Lum/W



Gráfica: Composición del mercado de AP después de la aplicación de estándar MEPs 65 Lum/W



Evaluación económica

Se realiza la evaluación económica sobre los diferenciales provocados por la incorporación de MEPs.

Antecedentes relevantes:

- Valor Luminaria LED 55W \$429.833
- Precio kWh \$80.83

Se analizan 4 escenarios:

1. **Escenario actual:** Considera los precios de mercado de las luminarias LED 55W y VSAP con sus equipos auxiliares y valor energía año 2013.
2. **Escenario Proyectado 1:** Considera los precios de luminarias LED 55W en \$150.000.
3. **Escenario Proyectado 2:** Valor de la energía \$200/kWh
4. **Escenario Proyectado 3:** Considera los precios de luminarias LED 55W en \$210.000 y \$150/kWh.

Tablas. Diferenciales con caso base mercado año 2012

	Sin MEPS	MEPs 55 Lum/W	MEPs 65 Lum/W
Inversión total LED	\$ 3.852.843.837	\$ 9.184.492.369	\$ 31.151.967.500
Inversión total SAP	\$ 6.513.857.630	\$ 5.523.274.190	\$ 2.169.735.064
Inversión Total	\$ 10.366.701.467	\$ 14.707.766.559	\$ 33.321.702.564
Gasto anual energía LED	\$ 242.913.129	\$ 444.188.154	\$ 1.273.482.150
Gasto anual energía SAP	\$ 2.879.974.199	\$ 2.640.786.278	\$ 1.311.503.393
Gasto anual energía total	\$ 3.122.887.328	\$ 3.084.974.433	\$ 2.584.985.543
Reposición lámpara SAP (5 años)	\$ 428.775.260	\$ 375.314.020	\$ 134.957.799
Reposición balasto SAP (5 años)	\$ 1.276.899.676	\$ 1.158.441.476	\$ 545.157.476
Emisiones CO2e TON valorizadas	\$ 35.420.025	\$ 34.990.014	\$ 29.319.102

	MEPs 55 Lum/W	MEPs 65 Lum/W
Diferencial inversión inicial	-\$ 4.341.065.092	-\$ 22.955.001.097
Diferencial gasto anual en energía	\$ 37.912.896	\$ 537.901.785
Diferencial reposición lámpara SAP	\$ 53.461.240	\$ 293.817.461
Diferencial reposición balasto SAP	\$ 118.458.200	\$ 731.742.200
Diferencial CO2e valorizadas anual	\$ 430.011	\$ 6.100.923

Escenario Actual

Tabla. Evaluación económica MEPs 55 Lum/W y 65 Lum/W. Escenario Actual

MEPs 55 Lum/W	Periodo (años)	10
	Tasa de descuento	6,0%
	VAN	-\$ 3.671.742.309,39
	TIR	-27,76%
MEPs 65 Lum/W	Periodo (años)	10
	Tasa de descuento	6,0%
	VAN	-\$ 16.642.201.192,70
	TIR	-18,37%

AÑO	Inversión adicional sobre caso base	Ahorro económico energía sobre caso base	Total
0	-\$ 4.341.065.092	\$ 38.342.907	-\$ 4.302.722.185
1		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
2		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
3		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
4		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
5	\$ 171.919.440	\$ 38.342.907	\$ 210.262.347
6		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
7		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
8		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
9		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
10		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907

AÑO	Inversión adicional sobre caso base	Ahorro económico energía sobre caso base	Total
0	-\$ 22.955.001.097	\$ 544.002.708	-\$ 22.410.998.389
1		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
2		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
3		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
4		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
5	\$ 1.025.559.661	\$ 544.002.708	\$ 1.569.562.369
6		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
7		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
8		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
9		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
10		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708

Escenario Proyectado 1

Tabla. Evaluación económica MEPs 55 Lum/W y 65 Lum/W. Escenario Proyectado1

MEPs 55 Lum/W	Periodo (años)	10
	Tasa de descuento	6,0%
	VAN	-\$ 397.168.222,60
	TIR	-7,01%
MEPs 65 Lum/W	Periodo (años)	10
	Tasa de descuento	6,0%
	VAN	\$ 124.283.395,04
	TIR	6,60%

AÑO	Inversión adicional sobre caso base	Ahorro económico energía sobre caso base	Total
0	-\$ 870.016.560	\$ 38.342.907	-\$ 831.673.653
1		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
2		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
3		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
4		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
5	\$ 171.919.440	\$ 38.342.907	\$ 210.262.347
6		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
7		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
8		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
9		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907
10		\$ 38.342.907	\$ 38.342.907

AÑO	Inversión adicional sobre caso base	Ahorro económico energía sobre caso base	Total
0	-\$ 5.182.527.434	\$ 544.002.708	-\$ 4.638.524.726
1		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
2		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
3		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
4		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
5	\$ 1.025.559.661	\$ 544.002.708	\$ 1.569.562.369
6		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
7		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
8		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
9		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708
10		\$ 544.002.708	\$ 544.002.708

Escenario Proyectado 2

Tabla. Evaluación económica MEPs 55 Lum/W y 65 Lum/W. Escenario Proyectado2

	MEPs 55 Lum/W	Periodo (años)	10
		Tasa de descuento	6,0%
		VAN	-\$ 3.230.896.972,67
		TIR	-19,48%
	MEPs 65 Lum/W	Periodo (años)	10
		Tasa de descuento	6,0%
		VAN	-\$ 10.387.561.733,28
		TIR	-6,84%
AÑO	Inversión adicional sobre caso base	Ahorro económico energía sobre caso base	Total
0	-\$ 4.341.065.092	\$ 94.238.982	-\$ 4.246.826.110
1		\$ 94.238.982	\$ 94.238.982
2		\$ 94.238.982	\$ 94.238.982
3		\$ 94.238.982	\$ 94.238.982
4		\$ 94.238.982	\$ 94.238.982
5	\$ 171.919.440	\$ 94.238.982	\$ 266.158.422
6		\$ 94.238.982	\$ 94.238.982
7		\$ 94.238.982	\$ 94.238.982
8		\$ 94.238.982	\$ 94.238.982
9		\$ 94.238.982	\$ 94.238.982
10		\$ 94.238.982	\$ 94.238.982

	MEPs 65 Lum/W	Periodo (años)	10
		Tasa de descuento	6,0%
		VAN	-\$ 10.387.561.733,28
		TIR	-6,84%
AÑO	Inversión adicional sobre caso base	Ahorro económico energía sobre caso base	Total
0	-\$ 22.955.001.097	\$ 1.337.046.822	-\$ 21.617.954.275
1		\$ 1.337.046.822	\$ 1.337.046.822
2		\$ 1.337.046.822	\$ 1.337.046.822
3		\$ 1.337.046.822	\$ 1.337.046.822
4		\$ 1.337.046.822	\$ 1.337.046.822
5	\$ 1.025.559.661	\$ 1.337.046.822	\$ 2.362.606.483
6		\$ 1.337.046.822	\$ 1.337.046.822
7		\$ 1.337.046.822	\$ 1.337.046.822
8		\$ 1.337.046.822	\$ 1.337.046.822
9		\$ 1.337.046.822	\$ 1.337.046.822
10		\$ 1.337.046.822	\$ 1.337.046.822

Escenario Proyectado 3

Tabla. Evaluación económica MEPs 55 Lum/W y 65 Lum/W. Escenario Proyectado3

	MEPs 55 Lum/W	Periodo (años)	10
		Tasa de descuento	6,0%
		VAN	-\$ 843.400.990,94
		TIR	-9,34%
AÑO	Inversión adicional sobre caso base	Ahorro económico energía sobre caso base	Total
0	-\$ 1.614.256.560	\$ 70.786.739	-\$ 1.543.469.821
1		\$ 70.786.739	\$ 70.786.739
2		\$ 70.786.739	\$ 70.786.739
3		\$ 70.786.739	\$ 70.786.739
4		\$ 70.786.739	\$ 70.786.739
5	\$ 171.919.440	\$ 70.786.739	\$ 242.706.179
6		\$ 70.786.739	\$ 70.786.739
7		\$ 70.786.739	\$ 70.786.739
8		\$ 70.786.739	\$ 70.786.739
9		\$ 70.786.739	\$ 70.786.739
10		\$ 70.786.739	\$ 70.786.739

	MEPs 65 Lum/W	Periodo (años)	10
		Tasa de descuento	6,0%
		VAN	\$ 159.709.747,21
		TIR	6,45%
AÑO	Inversión adicional sobre caso base	Ahorro económico energía sobre caso base	Total
0	-\$ 8.993.187.434	\$ 1.004.310.347	-\$ 7.988.877.087
1		\$ 1.004.310.347	\$ 1.004.310.347
2		\$ 1.004.310.347	\$ 1.004.310.347
3		\$ 1.004.310.347	\$ 1.004.310.347
4		\$ 1.004.310.347	\$ 1.004.310.347
5	\$ 1.025.559.661	\$ 1.004.310.347	\$ 2.029.870.008
6		\$ 1.004.310.347	\$ 1.004.310.347
7		\$ 1.004.310.347	\$ 1.004.310.347
8		\$ 1.004.310.347	\$ 1.004.310.347
9		\$ 1.004.310.347	\$ 1.004.310.347
10		\$ 1.004.310.347	\$ 1.004.310.347

7.7. Análisis y recomendaciones análisis financiero

- Bajo las condiciones actuales, escenario base de compras año 2012 y precio de mercado año 2013 tecnologías de AP y energía, no es recomendable avanzar a la opción de MEPs analizada, sin embargo se recomienda realizar una nueva sensibilización cada año para evaluar la conveniencia de su aplicación.
- Se evidencia una alta sensibilidad al precio de la tecnología, en la medida que el precio de una luminaria LED 55W se acerca a los \$150.000 el establecimiento de MEPs bajo estas condiciones es rentable en el escenario 65 EFLum (desplazamiento de luminarias de 70W y 100W VSAP hacia LED 55W).
- Respecto de la energía, fijas las condiciones de precio de luminarias, aún no comenzaría a ser rentable la incorporación de MEPs sobre un precio superior a 200 \$/kWh (considerado muy poco probable).
- Un escenario combinado de precio de energía de \$150/kWh y un precio promedio de luminaria LED de \$210.000/Luminaria sería propicio para una incorporación de MEPs para recambio de luminarias de 100 y 70 W por tecnología LED 55W (65 EFLum).

7.8. Análisis y recomendaciones marco para el establecimiento de MEPs

- Se requiere de una real certificación de los elementos que componen las luminarias, Lámparas, Equipos Auxiliares, Elementos Ópticos, etc. Lo anterior para validar los valores reales de los componentes.
- En general la adopción de MEPs son precedidas por un programa de etiquetado que simplifica la toma de decisión, resultaría recomendable iniciar un etiquetado de los componentes o de los conjuntos luminarias.
- Se estima que en la actualidad el 50% de las tarifas son BT2, muchas de ellas no son medidas y estimadas por las distribuidoras. Se establece como una barrera a la implementación de MEPs el actual escenario de tarifas adoptadas por los municipios para los circuitos AP, no se mide realmente lo consumido. es recomendable avanzar a una tarifa realmente medida en todas las instalaciones para evidenciar los cambios reales en el consumo energético. Un recambio hacia tecnología más eficiente recomienda medición directa, lo anterior se transforma en costo adicional por construcción de redes que económicamente impactaría el recambio.

- Para el caso LED se recomienda la adopción de un protocolo que pueda proyectar la eficacia lumínica en el ciclo de vida de las luminarias, esto podría generar un escenario de confianza que podría propiciar la adopción de los MEPs referidos.
- Se recomienda avanzar en la implementación de las recomendaciones marco a fin de levantar barreras a la implementación de MEPs para estar preparados en cuando sea económicamente factible la aplicación de estos según se ha propuesto.

7. PROTOCOLO DE M&V&E

La medición y verificación es un punto crucial a la hora de determinar los reales beneficios asociados a los proyectos de eficiencia energética, además, los planes de M y V, suelen ser la base fundamental de los Contratos de Desempeño. Es en este sentido que son diversos los esfuerzos que se han llevado a cabo a nivel mundial de manera de poder consensuar la forma y mecanismos necesarios para la M y V.

En general, el protocolo más utilizado y conocido a nivel mundial, y principalmente el que ha sido impulsado en Chile por la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AhEE), es el “International Performance Measurement and Verification Profesional” (IPMVP), el cual es operado por la Evaluation Validation Organization (EVO World).

En el marco del IPMVP es que la AChEE ha impulsado el desarrollo de competencias a nivel nacional, existiendo hoy en día más de 40 profesionales certificados (Certified Measurement and Verification Profesional – CMVP), junto con diversos otros profesionales que han sido capacitados en temas de M y V a nivel nacional.

Por ello, para el presente proyecto se utilizará el IPMVP como la base para todas las actividades relacionadas con la Medición y Verificación.

El IPMVP entrega 4 alternativas de análisis para la medición y verificación de los diferentes proyecto, esto en base a la dificultad y grado de intervención de cada proyecto, en resumen, las alternativas existentes son las siguientes, su descripción y algunos casos típicos donde se debe utilizar, se presentan en la siguiente tabla. Se hace presente que la información mostrada corresponde a la entregada por el IPMVP, Volumen I, 2009:

Opciones del IPMVP	¿Cómo se determina el ahorro?	Aplicaciones comunes
A. Verificación Aislada de la MMEE: medición del parámetro clave El ahorro se determina midiendo en la instalación el parámetro clave que determina el consumo de energía del sistema donde se ha implementado la MMEE. La medición se puede realizar de forma continua o puntual, en función de la variación que se espere del parámetro a medir y de la duración del periodo demostrativo de ahorro. Se realiza una estimación del parámetro que no ha sido seleccionado para ser medido en la instalación. La estimación se puede realizar con datos históricos, especificaciones del fabricante o supuestos técnicos. Sería necesario disponer de la documentación que se ha utilizado como fuentes o la justificación del parámetro que se está estimando. El error admisible obtenido al determinar el ahorro de energía por usar estimaciones en lugar de mediciones es estimado.	Calculo, por parte de la ingeniería, de la energía de referencia y de la energía del periodo demostrativo de ahorro a partir de: - Lecturas continuas o puntuales del parámetro clave operativo. - Valores estimados. Será necesario aplicar Ajustes rutinarios y ajustes no-rutinarios como correspondan.	Una MMEE en iluminación donde la potencia es el parámetro clave que se mide de forma periódica. Se estimarán las horas de funcionamiento de los puntos de luz según los horarios del edificio y el comportamiento de sus ocupantes
B. Verificación aislada de la MMEE: medición de todos los parámetros El ahorro se determina midiendo en la instalación el consumo de energía del sistema en el que se ha implementado la MMEE. La medición se realiza de forma continua o puntual, en función de la variación esperada del ahorro y la duración del periodo demostrativo de ahorro.	Mediciones continuas o puntuales de la energía del periodo de referencia y de la energía del periodo demostrativo de ahorro; y/o cálculos que utilicen patrones de consumo. Será necesario aplicar ajustes rutinarios y ajustes no-rutinarios como correspondan.	Instalación de un variador de frecuencia en un motor para regular el caudal de la bomba. En el periodo de referencia se instala el equipo de medida durante una plazo determinado, para corroborar el consumo. El equipo de medida sigue instalado durante el periodo demostrativo de ahorro para hacer un seguimiento de la variación de la variable medida.

C. Verificación de toda la Instalación El ahorro se determina midiendo el consumo de energía de toda la instalación, o de una parte de ella. La medición de todo el consumo de energía de la instalación se realiza de forma continua durante el periodo demostrativo de ahorro.	Análisis de toda la información de los equipos de medida de la empresa de suministro durante todo el periodo de referencia y todo el periodo demostrativo de ahorro. Ajustes rutinarios según sean necesarios utilizando comparaciones simples y análisis de regresión. Serán necesarios aplicar Ajustes no-rutinarios según sean convenientes.	Proyectos de eficiencia en los que las MMEE implementadas afecten a varios equipos de la instalación. Medición del consumo con equipos de medida de energía eléctrica, de combustibles y agua durante un periodo de referencia de doce meses y durante el periodo demostrativo de ahorro.
D. Simulación Calibrada El ahorro se determina simulando el consumo de energía de toda la instalación, o de una parte de ella. La simulación tiene que ser capaz de modelar el rendimiento energético actual de la instalación. Esta opción suele requerir habilidades especiales para realizar simulaciones calibradas.	La simulación del consumo de energía calibrado con la información de las facturas de suministro, horarias o mensuales. (La lectura del consumo en un equipo puede servir para mejorar los datos de entrada.)	Proyectos de eficiencia donde las MMEE implementadas afecten a varios equipos de la instalación y no existen equipos de medida en el periodo de referencia. Después de la instalación de los equipos de medida de energía eléctrica y de combustibles se utilizan sus lecturas para calibrar la simulación. El consumo de energía de referencia, que se ha determinado con la simulación calibrada, es comparado con la simulación del consumo de la energía durante el periodo demostrativo de ahorro.

Como puede verse de la tabla anterior, las opciones para el desarrollo de un plan de medición y verificación, no solo dependen del tipo de proyecto, sino también de la dificultad y grado de intervención que éste implique, junto con el presupuesto disponible.

Para los proyectos de recambio masivo de Alumbrado Público, se recomienda el uso ya sea de la opción A o B, en función de los siguientes aspectos:

- Opción A: Esta opción es la recomendada cuando:
 - Es posible estimar y acordar las horas de operación del alumbrado público, en horas anuales de operación.
 - Sólo se modifica la potencia de las lámparas, es decir, se realiza un remplazo punto a punto, sin incorporar balastos de doble nivel de potencia.
 - Se conocen los niveles de iluminación y el proyecto demuestra que logrará mantenerlos o mejorarlos, pero ésta variación no se considerará dentro del plan de medición.
 - No se incluyen nuevos puntos de iluminación.
 - Se conoce o se puede estimar y acordar, la cantidad de luminarias que no operan debido a fallas de cada equipo.
 - Existen diversos circuitos eléctricos, y todos ellos sujetos a una tarifa eléctrica (idealmente la misma para todos los circuitos)
- Opción B: Esta opción es la recomendada cuando:
 - Se requiere conocer las horas de operación del sistema.
 - Se considera dentro del proyecto la incorporación de balastos de doble nivel de potencia, o cuando se modifican ya sea los periodos de operación o los niveles de potencia respecto al caso base.
 - Se agregan o retiran puntos de iluminación.

Para la determinación de los ahorros, debe definirse con claridad el período de referencia y el de comprobación de ahorros.

En el caso de la opción A, el periodo de referencia y comprobación de ahorros es de 1 segunda antes y después del recambio, esto implica la medición de la potencia del equipo a reemplazar y la medición de potencia del nuevo equipo. Con dicha información, más la estimación de horas de operación se construye la línea base y se pueden calcular los ahorros obtenidos.

En el caso de la opción B, el periodo de referencia deberá considerar lapsos representativos, en el cual puedan observarse las variaciones de los parámetros incluidos en el proyecto (tales como potencia reducida, horas de operación, etc.).

Adicionalmente, los planes de MyV deben considerar factores estáticos y variables independientes, cuyas definiciones son las siguientes (de acuerdo a IPMVP):

- Variable independiente: Es un parámetro que afecta la forma regular de operación en el tiempo y que tiene un impacto significativo sobre el consumo de energía del sistema considerado. Algunas variables independientes a considerar en los proyectos de AP son:
 - Demanda o potencia eléctrica instantánea.
 - Número de horas de funcionamiento.
- Factores estáticos: Corresponden a parámetros que influyen en el consumo de energía del sistema y que no se prevé que vayan a cambiar en el tiempo. Aún así, todos los factores estáticos deben ser monitoreados, de manera de realizar los ajustes necesarios en el cálculo de ahorro en el caso de que alguno de ellos cambie. Algunos factores estáticos a considerar en los proyectos de AP son:
 - Programación del sistema de encendido y reducción de potencia.
 - Número de puntos de luz apagados.
 - Conexiones ajenas a la red de alumbrado.
 - Inventario de la instalación de alumbrado

Finalmente, es importante destacar que, de acuerdo al protocolo IPMVP, el medio de verificación con el cual se construye la línea base (facturas, mediciones, etc.), debe ser el mismo que se utilice para la constatación de ahorros.

DIARIO OFICIAL

DE LA REPUBLICA DE CHILE
Ministerio del Interior y Seguridad PúblicaI
SECCIÓN

LEYES, REGLAMENTOS, DECRETOS Y RESOLUCIONES DE ORDEN GENERAL

Núm. 42.404

Lunes 15 de Julio de 2019

Página 1 de 1

Normas Generales

CVE 1621841

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE

LEY NÚM. 21.162

MODIFICA LA LEY N° 19.300, QUE APRUEBA LEY SOBRE BASES GENERALES DEL MEDIO AMBIENTE, PARA EXIGIR LA ELABORACIÓN DE UN ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL EN LOS PROYECTOS QUE PUEDAN GENERAR CONTAMINACIÓN LUMÍNICA EN LAS ZONAS QUE INDICA

Teniendo presente que el H. Congreso Nacional ha dado su aprobación al proyecto de ley, originado en moción del diputado José Miguel Castro Bascuñán y de las diputadas y diputados Sofía Cid Versalović, Sebastián Álvarez Ramírez, Francisco Eguiguren Correa, Camila Flores Oporto, Félix González Gatica, Harry Jürgensen Rundshagen, Ximena Ossandón Irrarázabal, Hugo Rey Martínez y Diego Schalper Sepúlveda,

Proyecto de ley:

“Artículo 1.- Introdúcense las siguientes modificaciones en la ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente:

a) Incorpórase en la letra d) del artículo 2, a continuación de la expresión “ruido,”, la frase “luminosidad artificial,”.

b) Sustitúyese en la letra d) del artículo 11 la expresión “y glaciares,” por la siguiente: “, glaciares y áreas con valor para la observación astronómica con fines de investigación científica,”.

Artículo 2.- Intercálase en el artículo 4 de la ley N° 21.105, que crea el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, la siguiente letra r), nueva, pasando la actual letra r) a ser s):

“r) Proponer al Presidente de la República las áreas con valor científico y de investigación para la observación astronómica, las que serán declaradas por decreto supremo expedido por el Ministerio, que deberá ser suscrito, además, por el Ministro del Medio Ambiente.”.

Y por cuanto he tenido a bien aprobarlo y sancionarlo; por tanto, promúlguese y llévese a efecto como Ley de la República.

Santiago, 1 de julio de 2019.- SEBASTIÁN PIÑERA ECHENIQUE, Presidente de la República.- Carolina Schmidt Zaldívar, Ministra del Medio Ambiente.- Andrés Couve Correa, Ministro de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

Lo que transcribo para Ud. para los fines que estime pertinentes.- Marcelo Fernández Gómez, Subsecretario (S) del Medio Ambiente.

CVE 1621841

Director: Juan Jorge Lazo Rodríguez
Sitio Web: www.diarioficial.clMesa Central: +562 2486 3600 Email: consultas@diarioficial.cl
Dirección: Dr. Torres Boonen N°511, Providencia, Santiago, Chile.

Este documento ha sido firmado electrónicamente de acuerdo con la ley N°19.799 e incluye sellado de tiempo y firma electrónica avanzada. Para verificar la autenticidad de una representación impresa del mismo, ingrese este código en el sitio web www.diarioficial.cl