

Contaminación Lumínica

Álvaro Alejandro Boehmwald Rivera

2019

La Contaminación Lumínica se dio a conocer a mediados de los años 60's como una problemática casi exclusiva de la astronomía, limitando o impidiendo el estudio de los astros por la alteración de la calidad del cielo nocturno. Hoy en día se conoce mucho más de este tipo de contaminación y sobre sus efectos en los ecosistemas y la salud humana, como consecuencia de las alteraciones a los parámetros naturales de luz y oscuridad. Este informe pretende entregar elementos de discusión respecto de las consideraciones ambientales y de salud que debiesen tener todos aquellos proyectos o actividades susceptibles a causar impacto ambiental, en cualquiera de sus fases, que deriven en la alteración de los parámetros naturales de luz y oscuridad y que deberían ser parte de los antecedentes que componen las Declaraciones o Estudios de Impacto Ambiental definidas en nuestra legislación.

Los antecedentes presentados en este documento, son resultado de la recopilación de diferentes trabajos llevados a cabo por científicos y especialistas de las más diversas disciplinas que han documentado los efectos de la contaminación lumínica en el medio natural y en las personas. De la misma manera reúne experiencias y vivencias del autor en relación a las temáticas ambientales en general y al tema en estudio.

Concepción, mayo de 2019

Consejo Consultivo Ministerio de Medioambiente Región del Biobío

Contenido

I.	Contexto.....	3
II.	Función biológica de la Luz.....	5
III.	Ciclos astronómicos fundamentales y Calidad Astronómica del cielo	7
IV.	Fotorreceptores y pigmentos fotosensibles	10
V.	Contaminación Lumínica: Definición del concepto y principales factores que la producen .	14
VI.	Efectos de la contaminación Lumínica en los ecosistemas	21
1.	Efecto sobre las plantas.....	21
2.	Efecto de la Contaminación Lumínica sobre los invertebrados	26
3.	Efectos de la Contaminación Lumínica en Vertebrados.....	32
VII.	Efectos de la Contaminación Lumínica sobre la Cultura y Sociedad.	43
VIII.	Consideraciones ambientales en el recambio de luminarias y reflexiones finales.....	47
	Bibliografía.....	49

I. Contexto

La contaminación de nuestros cielos debido a la iluminación artificial de calles carreteras, edificios, monumentos y otras áreas exteriores es una de las problemáticas ambientales que más se ha incrementado en los últimos años, debido principalmente al crecimiento de los núcleos urbanos e instalación de nuevos complejos industriales. Sus repercusiones resultan cada vez más evidentes y sus efectos vienen siendo revisados y documentados por científicos de variadas disciplinas mostrando como resultado una constante degradación del firmamento no solo desde el punto de vista del paisaje o como recurso científico y cultural, sino como una afección que involucra incluso el equilibrio de la biodiversidad y nuestra propia salud. La alteración innecesaria de la cantidad natural de luz presente en el medio nocturno causada por las emisiones o flujos luminosos producidos por fuentes artificiales, en intensidades, horarios o rangos espectrales innecesarios, es lo que se conoce como Contaminación Lumínica¹.

La Contaminación Lumínica como problemática ambiental radica en los potenciales impactos que provocaría el ingreso a un medio naturalmente oscuro, como la noche, de luz invasiva y no natural, alterando los patrones de luz y oscuridad dados por los ciclos astronómicos fundamentales, como son la alternancia del día-noche y la sucesión de las estaciones generando distorsiones cuyos alcances serian difíciles de dimensionar, pero que, con toda seguridad ocasionarían la extinción de alguna especies y la aparición de nuevas exigencias adaptativas para las demás. Por otra parte, la conversión de la energía eléctrica en energía luminosa supone el uso de recursos naturales no renovables y altamente contaminantes como el petróleo, carbón, uranio, etc; cuyas emisiones están directamente relacionadas con el equilibrio climático del planeta y el incremento en los niveles de contaminación en la atmosfera, los que a su vez también se convierten en un factor a considerar desde el punto de vista de la Contaminación Lumínica ya que acentúan el resplandor del cielo dependiendo de las propiedades de las partículas en suspensión.

¹ Definición de Contaminación Lumínica establecida por la UNESCO en el año 2009

La contaminación lumínica es una problemática ambiental a escala mundial que requiere ser abordada en forma amplia, integrando a los diversos actores de la sociedad entorno a la participación y a la generación de propuestas completas que se traduzcan en medidas concretas factibles de aplicar y fiscalizar. En La comunidad europea son variados organismos los encargados de velar por el resguardo del cielo como patrimonio cultural, social y ecológico, teniendo mucha importancia los movimientos ciudadanos que han participado en los procesos de decisión en estas materias. Desde el punto de vista de las regulaciones, la comunidad europea cuenta con normativas muy estrictas orientadas precisamente a regular las emisiones en determinadas longitudes de onda e intensidades de diversas fuentes emisoras, incluyendo las luminarias LED, como son la UE 62471 referida a la seguridad fotobiológica y la UE 62778 asociada a los riesgos derivados de la luz azul en la retina.

Para el caso de Chile, la contaminación lumínica ha tenido algún grado de interés en las regiones de Atacama, Antofagasta y Coquimbo, en donde aplica el Decreto Supremo n° 43 del año 2013, el cual luego de sus modificaciones, reforzó el concepto de la calidad astronómica del cielo y establece un necesario reconocimiento del cielo como patrimonio ambiental y cultural. Sin embargo, en el resto del país, la contaminación lumínica, al no estar normada, es prácticamente desconocida, lo cual ha favorecido la incorporación de luminarias con altos grados de contaminación y que están generando impactos en nuestro entorno que aun resultan complejos de poder dimensionar, y es precisamente en este contexto, en el cual este escrito pretende aportar elementos para una discusión profunda sobre los alcances de esta problemática ambiental y de sus potenciales consecuencias sobre nuestra calidad de vida y sobre el equilibrio de los ecosistemas.

II. Función biológica de la Luz

La luz es aquel tipo de radiación o fracción visible del espectro solar que corresponde a las ondas electromagnéticas entre los 360 y 760 nanómetros, y que comprende desde el 40% al 60% del total de radiación solar recibida por la Tierra (Donoso 2008). La luz ha estado presente en nuestro planeta a lo largo de toda su historia con diferente temporalidad, intensidad y composición espectral (Kohen et al. 1995, K. Gaston 2013) y ha sido una de las variables ambientales que más ha influenciado en los procesos ecológicos y evolutivos de los seres vivos (Olof 2008; Kohen et al. 1995), evidenciando por un lado, un rol como recurso capaz de sustentar diversos procesos del medio natural, tales como el calentamiento de la superficie terrestre o el calentamiento de las capas inferiores de la atmósfera o también como insumo en los procesos de fotosíntesis, pero además representa una importante fuente de información para los seres vivos, ya que no solo permite que los distintos organismos puedan reconocer su entorno, sino que también influye significativamente en procesos fisiológicos y conductuales, determinados estos por los patrones de luz y oscuridad, que los seres vivos perciben a partir de los ciclos astronómicos fundamentales, los cuales dependen de las características astronómicas de la tierra (Saavedra et al. 2013; K. Gaston et al. 2013).

La respuesta biológica a un cambio en las proporciones de luz y oscuridad en un tiempo determinado es lo que se conoce como "fotoperiodo". Aunque este concepto surgió ya hace casi 100 años, producto de estudios en plantas realizados por dos investigadores del Departamento Norteamericano de Agricultura, W.W. Garner y H.A. Allard, en la actualidad es un término usado ampliamente en diversos campos de la biología, que ha permitido el estudio de las respuestas fotoperiódicas de los organismos vivos, proporciona información relevante para la comprensión de los ecosistemas naturales y sus diversas interacciones. Como resultado de estos estudios se ha logrado determinar que la luz para ser captada e interpretada debe cumplir con tres rasgos fundamentales (K. Gaston et al. 2013, Donoso 2008, Valladares 2005), que son:

- Intensidad de la luz
- Calidad de la luz o espectro
- Distribución temporal y espacial

Estas variables forman parte de los ciclos naturales de la luz, definidos por las características astronómicas de la tierra, y que determinan las proporciones de luz y oscuridad que afectan los ritmos biológicos de los seres vivos, desde el punto de vista de la periodicidad de estos, como son ciclos diarios o anuales. Estas respuestas de los organismos vivos a la luz están dadas generalmente por la capacidad de estos de detectar la duración del día y la noche, lo que guarda estrecha relación con la sincronización propia de la zona geográfica donde estos habitan (K. Gaston et al. 2013).

El siguiente esquema resume en forma simple las funciones biológicas de la luz.

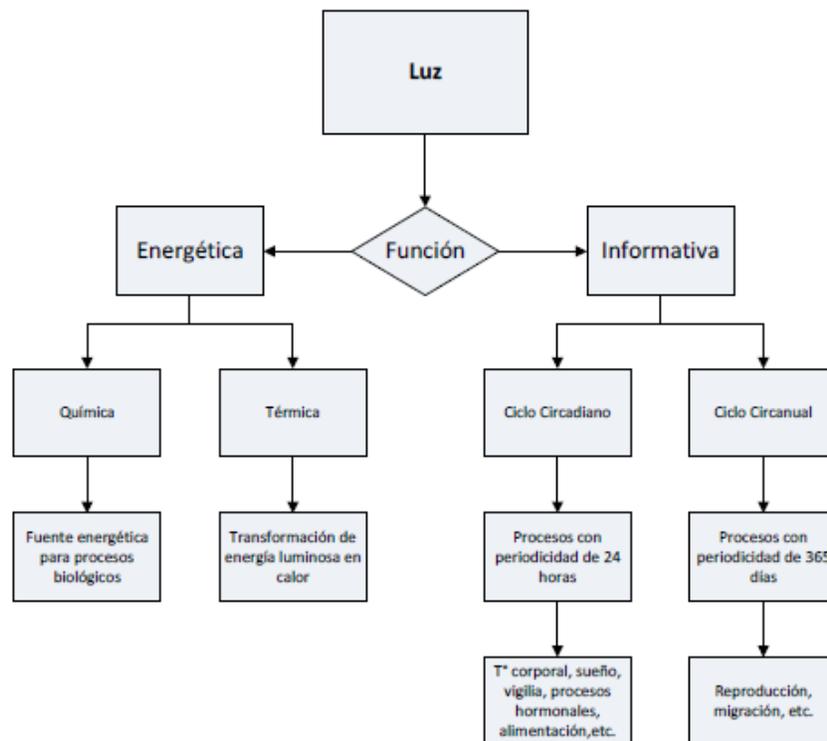


Figura 1. Función biológica de la luz, desde la mirada energética e informativa
(Elaboración propia)

III. Ciclos astronómicos fundamentales y Calidad Astronómica del cielo

Los ciclos astronómicos fundamentales son fenómenos que guardan directa relación con los movimientos periódicos de la tierra y en los cuales se definen los patrones de luz y oscuridad natural (K. Gaston et al. 2013), estos ciclos corresponden al ciclo circadiano, con un periodo de 24 horas y asociado al movimiento de rotación de la tierra (Saavedra et al. 2013), que permite la alternancia del día y la noche, y por otro lado el ciclo circannual, que contempla un periodo de 365 días y asociado al movimiento de traslación, el que genera la sucesión de las estaciones. Estos ciclos naturales de la luz y oscuridad proporcionan las señales que permiten regular los ritmos circadianos, la fenología estacional y la expresión de la variación fenotípica de los seres vivos, incluida la forma de crecimiento y la asignación de recursos dentro de los ecosistemas (Silva et al. 2017, Bennie et al. 2016, Kohen et al. 1995).

Los cambios en las proporciones de luz y oscuridad se hacen menos notorias entre la época de verano e invierno en las zonas templadas cuando los días son más largos en el caso del verano, y más cortos en el caso del invierno. Las épocas del año en las cuales esta longitud relativa del día y la noche es más perceptible son durante la primavera y el otoño. En primavera hay un aumento paulatino en la cantidad de luz y un descenso similar para la oscuridad, la que alcanza su mayor proporción durante el solsticio de verano, con el día más largo y la noche más corta. En el otoño ocurre lo inverso, es decir, se aprecia una disminución paulatina de la luz del día hasta llegar al solsticio de invierno, donde se alcanza el día más corto y la noche más larga (Salisbury 2000).

Los ciclos astronómicos fundamentales que permiten la alternancia del día y la noche, y de la sucesión de las estaciones, definen los patrones de luz y oscuridad a los cuales están expuestos los seres vivos, sin embargo, estos ciclos astronómicos han variado en el tiempo y como consecuencia de ello también han variado los patrones de luz y oscuridad a lo largo de la historia de la Tierra, que se suman a otros movimientos poco perceptibles en una

escala temporal humana y que también determinan patrones diferenciados de luz, como son los ciclos de Milankovitch que afectan la órbita de la tierra en tres formas distintas, la primera afecta la excentricidad de la órbita Terrestre pasando de una órbita moderadamente elíptica a una casi circular, el segundo referido a la inclinación de eje de la Tierra y el tercero referido a la oscilación del eje, ciclo conocido como precesión. Para todos los casos se alteran los patrones de luz y oscuridad, pero además implican cambios climáticos globales (Jiménez-Sánchez 2010). En la tabla n°1 se aprecia la periodicidad y efectos de cada uno de estos movimientos.

En relación a las características astronómicas también es importante considerar como factor la edad de nuestro sol y la carga espectral de dicha emisión, lo cual puede haber sido un factor relevante en las exigencias adaptativas de las especies de dicho periodo, teniendo como referencia que nuestro sol brillaba un 30% menos relación al brillo actual (Sousa 2009).

Tabla 1. Ciclos de Milankovith y sus efectos en los patrones de luz en la Tierra

Movimiento	Periodicidad	Variación	Efecto
Excentricidad órbita	100.000 años	Variación en la excentricidad de 0,058-0,005	Variación en la recepción de radiación solar
Inclinación del eje	41.000 años	Variación en la inclinación del eje terrestre entre 22,5° y 24,5°	Variación en la recepción de radiación solar y cambios en las temperaturas globales
Precesión	26.000 años	Oscilación del eje terrestre	Retardos en los solsticios y equinoccios en 20 minutos por año

(Elaboración propia)

A partir de la información entregada, respecto de los ciclos astronómicos fundamentales, resulta interesante abordar el concepto de la “*Calidad Astronómica de los cielos nocturnos*” y su alcance en términos ambientales o ecológicos, si bien en la definición contenida en el Decreto Supremo número 43 del año 2013, la establece como un conjunto de condiciones ambientales del cielo nocturno, pero se le confiere una aptitud o capacidad que favorece una actividad muy particular, que es la observación astronómica, en desmedro del valor ecológicos y cultural que el cielo nocturno representa. Pues bien, las características astronómicas de la tierra tienen directa relación con los parámetros de luz y oscuridad que definen la distribución de la vida en el planeta (Ragni & Rivera 2004), por lo cual la incorporación de luz artificial a un medio naturalmente oscuro, altera esta condición, es decir, a nivel de especie puede provocar alteraciones significativas en los procesos de comunicación, de reproducción, alimentación y migración, mientras que a nivel de comunidades se observan alteraciones en las interacciones como la competencia y la depredación (Navarro & Hughes, 2015). Esta ampliación en el concepto rompe el límite territorial que hasta el día de hoy presenta esta norma, lo cual permitiría abarcar todo el territorio nacional y conferirle a la calidad astronómica de los cielos nocturnos, el carácter biológico que en verdad representa y resguardar con ello el patrimonio ambiental y cultural de todo el país.

IV. Fotorreceptores y pigmentos fotosensibles

Como se ha evidenciado durante el desarrollo de este trabajo, la luz es un factor importante en el desarrollo y crecimiento de los seres vivos y para la estabilidad de los ecosistemas, pero surge una gran interrogante, la cual es ¿cómo es captada esta luz por parte de los seres vivos?

La respuesta a esta interrogante está dada por la aseveración de que esta luz, para ser utilizada por los seres vivos debe primeramente ser captada o absorbida. Esta función primordial para el uso de la luz es llevada a cabo a por los llamados Fotorreceptores, los cuales pueden ser sustancias u órganos sensibles capaces de detectar gradientes de luz específicas para cada una de las longitudes de onda (Olof 2008; Kohen et al. 1995).

Para los vertebrados e invertebrados los Fotorreceptores se pueden dividir en dos clases, según su membrana fotorreceptora (Gordon & Fain 2010), esto es ciliar y rabdomérica. Los fotorreceptores ciliar se asocian comúnmente con los vertebrados, mientras que los fotorreceptores rabdoméricos generalmente se consideran una característica de los invertebrados. Ambos tipos de células son neuronas especializadas para la fotorrecepción, pero difieren en su morfología (Plachetki et al. 2005). En estos organismos toma vital importancia el sistema Fotoneuroendocrino, que tiene como función integrar la información intrínseca y extrínseca para controlar funciones autónomas de estos organismos, las cuales son mediadas por parte del sistema óptico, diferentes al de la visión, y por reflejos ópticos.

A nivel molecular, un pigmento visual se compone de un cromóforo retinal sensible a la luz derivado de la vitamina A, generalmente 11-cisretinal (Shuo Yan et al. 2014), y una proteína Transmembrana denominada opsina. Las Opsinas son miembros de la familia de receptores acoplados a proteína G y contienen siete dominios transmembrana (TM). Los dominios de TM helicoidales de una opsina forman un bolsillo de unión dentro del cual se sienta el cromóforo. En este entorno, los grupos laterales de aminoácidos específicos interactúan

para cambiar la sensibilidad del cromóforo absorbente de longitud de onda corta (377 a 400 nm) a longitudes de onda de luz más largas. Tanto la secuencia de aminoácidos de la proteína opsina como el cromóforo afectan la absorción máxima (máx) del pigmento visual. En ausencia de efectos filtrantes de otras células fotorreceptoras y pigmentos de exploración, el valor máximo del pigmento visual debería coincidir aproximadamente con la sensibilidad máxima de la célula fotorreceptora que expresa ese pigmento (Briscoe & Chittka 2001), es decir se establece una sensibilidad particular para cada longitud de onda.

Como ejemplo de la sensibilidad espectral que pueden llegar a brindar los fotorreceptores se puede mencionar los ensayos realizados por EISUKE EGUCHI entre 1979 y 1980, para 35 especies de Lepidópteros, con 7 especies nocturnas representando a 4 familias, se obtuvieron picos de sensibilidad entre los 400-440 nm, rango al cual respondieron 5 de las 7 familias en estudio. Se registraron respuestas y picos para otras longitudes de onda, cerca de los 520 nm (Eguchi 1981). Ensayos más actuales permiten ajustar los picos de sensibilidad para los fotorreceptores de los lepidópteros en 368 nm (ultravioleta), 450 nm (azul) y 530 nm (verde) (Brehm 2017, Castresana & Puhl 2017). También existen experiencias de sensibilidad espectral para las larvas de Lepidópteros nocturnos con 360 nm (UV), 440 nm (azul) y 540 nm (verde) (Jin-Tun-Lin 2002).

La implicancia ambiental que puede tener esta sensibilidad espectral, está dada por la función biológica que desempeñan la gran mayoría de los Lepidópteros nocturnos, que es la polinización (MacGregor 2014), la cual se puede ver alterada o inhibida, dada las respuestas a las emisiones derivadas de luminarias con estos rangos espectrales de emisión.

En el caso de las plantas, nos encontramos que la captación o absorción de la luz es llevada a cabo por pigmentos que son relativamente específicos para diversos tramos del espectro electromagnético. Dentro de estos fotorreceptores tenemos:

- Fitocromos: absorbe principalmente en longitudes de onda entre el rojo y rojo lejano (entre los 620 y 775 nm).
- Criptocromos: Grupos de pigmentos similares que absorben en las longitudes de onda del azul (436 – 495 nm) y del ultravioleta de onda larga (UV – A 320 – 400 nm)
- Fotorreceptor UV: Uno o más compuestos que absorben radiación en longitudes de onda correspondientes a el UV–B (280 – 320 nm)
- Fotoclorofilina a: Absorbe en los rangos del rojo y azul del espectro, esta pasa a clorofila a una vez reducida.

La captación de luz por parte de las plantas, da origen a uno de los procesos biológicos fundamentales para la vida en la tierra, que implica la conversión de energía luminosa en energía química, dicho proceso es conocido con el nombre de Fotosíntesis.

Dentro de los Fotorreceptores más estudiados en las plantas está el fitocromo Este fotoreceptor lo podemos encontrar como un pigmento de color azul (Pr), el cual es capaz de absorber un fotón en una longitud de onda cercana a los 660 nm (rojo), convirtiéndose en un pigmento de color verde oliva (Pfr) biológicamente activo, el cual activa una respuesta biológica como la germinación, floración, etc. Este pigmento verde oliva en presencia de luz roja lejana (730 nm) puede volver a su forma original e iniciar nuevamente el ciclo bajo otro estímulo luminoso que puede desencadenar otra respuesta biológica. El ciclo de transformación del fitocromo se denomina “Reacción de fotoconversión” y se muestra más en detalle en la imagen siguiente.

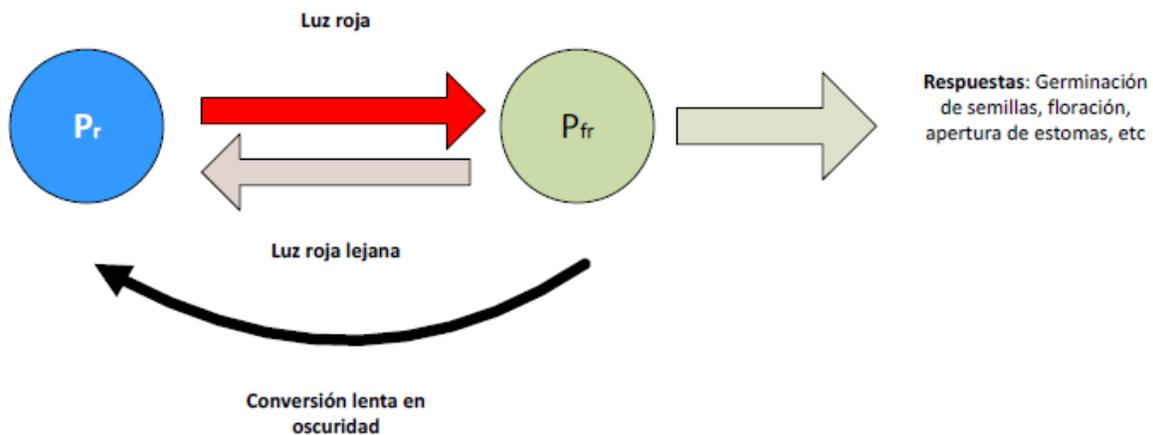


Figura 2. Proceso de conversión del fitocromo de la forma P_r a P_{fr} y sus respuestas biológicas dadas. La respuesta a los estímulos lumínicos es un proceso que puede durar entre 20 a 30 milisegundos (Elaboración propia en base a datos obtenidos desde la U. Politécnica de Valencia).

Esta respuesta de la planta a la luz, principalmente la captada por los fitocromos, depende de la hora del día en la cual la luz se recibe, así como de los periodos normales de oscuridad, por lo que cualquier interrupción en ambos procesos gatillara la activación o desactivación de algún proceso biológico. Esta interrupción de los periodos normales de oscuridad o prolongación del periodo normal de luz se denomina "Efecto fotoperiódico" (L. Olof 2008).

V. Contaminación Lumínica: Definición del concepto y principales factores que la producen

El concepto de la contaminación lumínica ha variado con el paso de los años, pasando por la definición de “foto polución” propuesta por Verheijen en 1985, el cual hace referencia a la alteración de los parámetros de luz y oscuridad naturales de los ecosistemas, definición que luego derivó en el concepto de “Foto polución ecológica”. Más tarde apareció el concepto de Contaminación Lumínica acuñado por P. Cinzano y colaboradores en el año 2000 que hace referencia a *“La alteración de los niveles naturales de luz en el ambiente exterior debido a fuentes de luz artificiales”*, ya con esta definición se incorpora o se hace referencia a la luz artificial como fuente de la contaminación lumínica. La iniciativa StarLight, conjuntamente con la Unión Internacional de Astronomía (IUA), proponen en el año 2009 una definición que engloba los conceptos ya abordados en las definiciones anteriores, integrando los rasgos biológicos de la luz que son alterados por la iluminación artificial, quedando finalmente como sigue:

“La Contaminación Lumínica es la alteración innecesaria de la cantidad natural de luz presente en el medio nocturno causada por las emisiones o flujos luminoso producido por fuentes artificiales, en intensidades, horarios o rangos espectrales innecesarios”

Esta definición fue ratificada el año 2009 por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), dando paso, desde junio del mismo año, a la puesta en marcha de las estrategias de conservación y protección del medio naturalmente oscuro por parte de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN).

La incorporación excesiva de luz artificial en el medio natural ha alterado en forma significativa los patrones de luz y oscuridad (Cinzano et al. 2001, 2000), afectando negativamente a los ecosistemas (Lancore & Rich 2004), siendo su efecto más evidente el brillo en el cielo nocturno (Cinzano & Falchi 2000). La principal causa de este fenómeno es

el incremento de la población y la expansión de las zonas urbanas, el desarrollo industrial y la incorporación de nuevas tecnologías de iluminación (K. Gaston et al. 2013, Eisenbeis & Hänel 2009; Roch 2001). Desde mediados del siglo XX la tecnología predominante para el alumbrado público fue a base de lámparas de Sodio a baja Presión (LPS) (Davies et al. 2013), características por su luz de tono naranja y con espectros de emisión muy reducido (Warrant & Jhonsen 2013), cercano a los 600 nm, luego se incorporaron otras tecnologías como sodio de alta presión (HPS), diodo emisor de luz (LED) y lámparas de halogenuros metálicos (MH) (Elvidge et al. 2010), con espectros de emisión muchos más amplios y con presencias importantes en longitudes de onda del azul y ultravioleta (Davies et al. 2013). En la actualidad, se suman a las fuentes emisoras derivadas de la iluminación pública, letreros y carteles publicitarios en base a tecnología LED, luminarias ornamentales y sistemas de iluminación de industrias, estadios y plazas de estacionamiento privados, los cuales han optado por luminarias de fuentes frías, 4000 a 5000 k, que presentan una mayor componente en el azul, generando una serie de impactos que describiremos en los apartados siguientes.

Un sistema de iluminación mal diseñado o basado en el uso de luz artificial en exceso, provoca una serie de fenómenos bajo los cuales la contaminación lumínica se manifiesta, siendo estos los siguientes:

- **Reflexión de la luz hacia el cielo:** Fenómeno que se origina por la emisión de luz artificial sobre una superficie cuyas propiedades favorecen que la luz incidente sobre dicho cuerpo se refleje y llegue a la atmosfera como luz residual. Este fenómeno es típicamente visible en la iluminación de letreros publicitarios en calles y edificios. También es típico en la iluminación de edificios y monumentos que cuentan con gran cantidad de ventanas u otras superficies reflectantes. En menor medida se da este fenómeno en el pavimento de calles y carreteras, lo cual se incrementa con la presencia de agua u otro elemento que favorezca la reflexión de la luz proveniente de las luminarias viales.



Figura 3. Iluminación letreros publicitarios. En 3 a). Forma incorrecta y forma correcta de iluminar un panel publicitario. En 3 b) Reflexión desde letrero publicitario mal iluminado. (Imágenes obtenidas desde material gráfico de la Oficina para la Protección de la calidad del cielo, OPCC).

- **Dispersión de la luz al cielo:** La Dispersión se origina por la interacción de la Luz con las partículas presentes en la atmosfera, desviando la Luz en todas direcciones.

La atmósfera terrestre contiene partículas de dos categorías: moléculas de gases y partículas en suspensión o aerosoles, ambas dan origen dos formas de esparcimiento de la luz según el tamaño de estas partículas y su interacción con las diferentes longitudes de ondas presentes en el flujo luminoso.

Para el caso de las moléculas de gas, la interacción con las diferentes longitudes de onda está dada por el efecto RAYLEIGH, el cual consiste en la dispersión de la luz o cualquier radiación electromagnética por parte de partículas de menor tamaño que las longitudes de onda de los fotones dispersados. La luz incide sobre las moléculas y agita sus nubes electrónicas. Así se sustrae parte de la energía del rayo luminoso. La agitación de las cargas eléctricas de las cortezas y núcleos atómicos hace que se remita esa energía en forma de

radiación electromagnética de nuevo, pero en una dirección aleatoria. El resultado neto es que la luz incidente puede ir rebotando de molécula en molécula y termina esparciéndose en el seno del gas. Este efecto alcanza una intensidad cuatro veces mayor para la luz azul que para la roja, y llega a ser tres veces mayor que la luz UV que para la roja (D.Galadí 2011), por esta razón el cielo es de color azul, tanto en el día como en la noche.

La dispersión de Mie es causada por partículas más grandes que la longitud de onda de la luz y que tienen un índice de refracción diferente al de la fase continua en la que están suspendidas. Los ejemplos típicos son gotas de agua (nubes, niebla) o polvo en la atmósfera, por lo que la luz incidente sobre estas interactúa y remite la luz en direcciones semejantes a las de partida, generando un característico halo luminoso sobre los núcleos urbanos, complejos industriales, sectores costeros, faenas mineras, etc. (Olof 2008).

Para ciudades con altos niveles de contaminación atmosférica, la dispersión de MIE es mucho más notoria y por consiguiente los halos luminosos son mucho más pronunciados y extensos, esto dado que la interacción entre las partículas en suspensión y la luz, tiende a favorecer la longitud de onda del haz incidente, es decir si la luz incidente corresponde a luz blanca, lo que se dispersa es luz blanca (D. Young et al. 2013). Si ponemos atención a este fenómeno y a las variables que la determinan, podemos inferir que para las 10 millones de personas expuestas a contaminación atmosférica² en el país, son potenciales afectados de la contaminación lumínica, teniendo mayor probabilidad de esto, quienes habiten en comunas que hubiesen sido parte del recambio masivo de luminarias convencionales por luminarias de tecnología LED³, proceso impulsado desde 2014 por el Ministerio de Energía y la Agencia Chilena de Eficiencia Energética, hoy Agencia de Sostenibilidad Energética. Ejemplo de este efecto sinérgico entre las emisiones de luminarias LED y la contaminación

² Datos obtenidos desde el Ministerio de Medioambiente de Chile

³ El proceso de recambio consideraba inicialmente 200.000 luminarias en 84 comunas del país, más el apoyo técnico a otras comunas que decidieran sumarse en forma particular a dicho recambio.

En la actualidad cerca del 80% de la población mundial se encuentra expuesta a la contaminación lumínica y un 40% en el caso de Chile (Falchi et al. 2016). Este incremento en la contaminación lumínica no solo viene dado por la irrupción tecnológica de las luminarias LED, sino que también por la interacción de la luz con partículas contaminantes presentes en la atmósfera sobre muchas ciudades, que puede llegar a duplicar la dispersión de los flujos luminosos contaminantes (Olof 2008; Herranz et al.2010; Galadí 2010).



Figura 4. Temuco, Capital de la Región de la Araucanía y su halo luminoso potenciado por la contaminación atmosférica, marzo 2019 (Copyright: AgenciaUno)

- **Intrusión Lumínica:** Es la emisión de flujos luminosos que exceden el área donde son útiles para la actividad prevista e invaden zonas en las que no son necesarias y en que pueden causar molestias o perjuicios. Una manifestación cotidiana de la intrusión lumínica es la invasión de luz proveniente de las luminarias públicas hacia la vivienda por ventanas y puertas. Estos flujos de luz son difíciles de erradicar ya que siempre existe una pequeña fracción que logra ingresar a las viviendas por efecto de la reflexión de la luz en paredes, ventanas u otras superficies que prolongan las molestias.



Figura 5. Focos de bola situados frente a las ventanas de varias viviendas, ocasionando molestias a sus residentes. (Celfosc.org)

- **Deslumbramiento:** Forma de Contaminación Lumínica consistente en la emisión de flujos luminosos que dificultan o impiden la visión. También es posible de entender el deslumbramiento como la saturación de los fotorreceptores durante el proceso de captación de la luz por un exceso de flujos luminosos. Un ejemplo clásico de esta forma de polución es la luz de los automóviles en una carretera que dan de frente al conductor generando la pérdida de visión por unos segundos, mientras dura la emisión. Otro ejemplo tiene relación con la posibilidad de ver la fuente de emisión del flujo luminoso, si esto es así, se está en la presencia de la pérdida parcial o total de la visión mientras dure la emisión.



Figura 6. Deslumbramiento producido por las luminarias de otros vehículos, que se ve potenciado por la presencia de partículas en suspensión. (qvision.es)

En la actualidad, los estudios del deslumbramiento están más bien asociados, por un lado a temas de seguridad vial, y se han enfocado en definir los tiempos de respuesta de los conductores ante la presencia de fuentes deslumbrantes (B.M Matesanz et al. 2006), y por otro lado a temas de confort visual en interiores (Yamin G. & Pattini, 2016), para ambos casos la incorporación de nuevas tecnologías como los focos LED o de xenón, se han convertido en un desafío necesario de abordar y que puede definir, en el mediano plazo, nuevos estándares para la seguridad y la salud de las personas.

VI. Efectos de la contaminación Lumínica en los ecosistemas

Los impactos ecológicos derivados de la contaminación lumínica resultan ser cada vez más evidentes y han concitado la atención de la comunidad científica, quienes han revisado y documentado sus efectos sobre el medio natural y la salud humana con el fin de comprender y mitigar sus impactos (Souza et al. 2016). En este ámbito se han desarrollado diversas experiencias para comprender los efectos de la luz artificial en el medio natural, caracterizando los cambios en los regímenes de luz natural como cambios en la distribución espacial, tiempo y composición espectral de las fuentes de iluminación artificial. Inicialmente los estudios sobre los efectos de contaminación lumínica se enfocaron en su gran mayoría en las interrupciones de los parámetros de luz y oscuridad de vertebrados superiores (Bará & Ecofert 2018; Gaston et al. 2013), sin embargo, los nuevos sistemas de iluminación artificial están alterando las características espectrales de los hábitats (MacGregor 2014; Devies et al. 2013), y afectando con ello a muchos organismos, en especial aquellos que presentan conductas nocturnas. Si bien estos cambios no representan una extinción inmediata de alguna especie, si representan una condición que puede alterar su abundancia y riqueza, llegando a poner en riesgo el delicado equilibrio de los ecosistemas.

1. Efecto sobre las plantas

En las plantas, la luz es un modulador ambiental muy importante, el cual se relaciona directamente con las tasas y patrones de crecimiento y desarrollo, por lo cual cambios en el fotoperiodo pueden llegar a tener profundas consecuencias para esta. La particular sensibilidad a la luz que presentan las plantas, las convierte en buenos bioindicadores de la falta o exceso de luz en el ambiente, pero también le permiten sentar las bases de la actividad fotosintética (Salisbury & Ross 2000).

La principal alteración producto de estas modificaciones a los periodos normales de luz y oscuridad se ve reflejado en la floración de la planta, ya que dicho proceso, dependiendo del tipo de planta (Plantas de día corto y plantas de día largo), requieren de un mínimo de energía radiante para darse en forma satisfactoria, esto lleva a poder afirmar que el principal factor de control de la floración es la duración relativa del día y la noche. Estas pequeñas gradientes de luz son perceptibles en forma diaria y estacional por parte de los Fotorreceptores, estableciendo las respuestas fisiológicas en función de la duración del día y la noche y la variación de estas con el paso de las estaciones del año. La imagen siguiente muestra una experiencia al respecto.

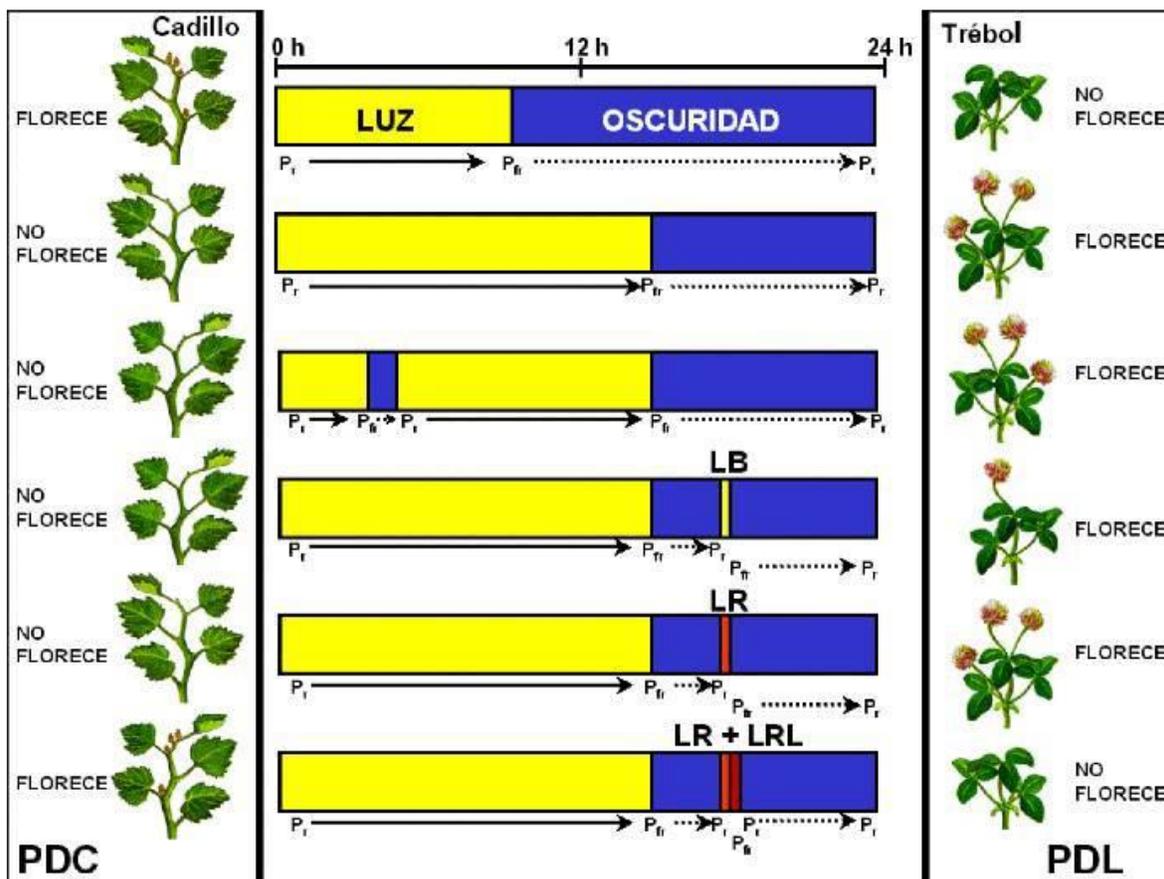


Figura 7. Efecto de la interrupción del periodo normal de oscuridad para plantas de día corto (PDC) y plantas de día largo (PDL) y su respuesta fisiológica ante dichas alteraciones.

La imagen muestra un ensayo realizado para determinar la incidencia de la alteración de los periodos normales de oscuridad en plantas de día corto (PDC) y largo (PDL), con la incorporación de luz blanca (LB), luz roja (LR) y luz roja lejana (LRL). Los principales resultados fueron que; Decece la respuesta de floración del trébol en presencia de LB en la interrupción del periodo de oscuridad (barra 4); No se evidencian alteraciones ni respuestas en ambas plantas con la modificación del periodo de oscuridad en presencia de LR (barra 5); Se observa una alteración en la floración por la interrupción del periodo de oscuridad del trébol con LR y LRL.

Es importante consignar que las plantas en su periodo de oscuridad normal llevan a cabo 2 procesos vitales en sus metabolismos, como son la fotosíntesis en su fase oscura (Fijación de carbono y ciclo de Calvin) y el cierre estomático (Salisbury & Roos 2000). Respecto a esta última función vital, existen interesantes estudios que revelan la relación directa de la luz en la apertura y cierre de estomas (Sharkey & Rashke 1981), así como la longitud de onda a las cuales este proceso es más eficiente (430 nm y 460 nm), en las zonas cercanas al rojo y rojo lejano (660 nm y 730 nm) la eficiencia demostró ser 10 veces menor. En condiciones normales los estomas se abren durante el día y se cierran durante la noche, por lo que condiciones de luminosidad artificial con emisiones en rangos cercanos al azul pueden provocar la apertura de los estomas durante la noche, alterando la fase oscura de la fotosíntesis y el intercambio gaseoso. Este fenómeno ocurre con frecuencia en los centros urbanos, en los cuales la vegetación expuesta a diferentes niveles de iluminación artificial sufre variaciones en las tasas de fotosíntesis y apertura de estomas (Takagi & Koichiro 2004). La luz es el factor ambiental predominante en la apertura de estomas, siendo los niveles de luz requeridos para este proceso los equivalentes a 1/1000 a 1/30 de luz solar plena (Taiz & Zeiger 2006), niveles mayores generan mayores aperturas de los estomas (A. Reyes, 2013)



Figura 8. Iluminación de árboles en plaza Victoria, Valparaíso, Chile (© Gustavo Alvarado, SoyChile)

La interrupción del periodo de oscuridad normal de las plantas, producto de la presencia de uno o varios estímulos luminosos con rangos espectrales dentro de los captados por estas, pueden generar respuestas esperadas o inesperadas desde el punto de vista fisiológico, sin embargo, esta respuesta está condicionada también a las condiciones de iluminación según la ubicación geográfica de la especie respectiva.

En definitiva, se puede establecer que los impactos que sufren las plantas por efecto de la Contaminación Lumínica son los siguientes⁴:

⁴ Conclusiones del simposio de Contaminación Lumínica, Barcelona 2004

- Acelera el crecimiento vegetativo
- Influye en el estado general de la planta
- Inhibe, retrasa o adelanta la floración
- Influye en la cantidad y calidad de las flores (Polinización)

La interrupción de los parámetros de luz y oscuridad en las plantas, no solo dependen de incorporar luz y alterar dichos parámetros, depende también de las emisiones espectrales que cada tipo de luminaria aporta y de cómo estas emisiones generan respuestas en las plantas, dado los Fotorreceptores respectivos. La tabla siguiente evidencia grados de impacto según el tipo de luminaria.

Tabla 2. Efectos generales sobre las plantas producidos por diferentes tipos de luminarias

Tipo de Iluminación	Grado de efecto	Efecto
Sodio alta presión y baja presión	BAJO	Crecimiento normal
Incandescentes y halógenas	MEDIO	Efectos sobre la fotosíntesis
Vapor de mercurio y halogenuros metálicos	ALTO	Crecimientos anormales en la planta , inhibición de la fotosíntesis, apertura de estomas en fase oscura

2. Efecto de la Contaminación Lumínica sobre los invertebrados

La diversidad que presentan los Fotorreceptores de los invertebrados (Raible & Steinmetz 2005). se traduce en variadas sensibilidades para cada tipo de organismo determinadas no solo por las propiedades de los Fotorreceptores sino también por las condiciones geográficas y climáticas propias de cada hábitat. La imagen siguiente muestra las longitudes de onda máximas (λ_{max}) para los Fotorreceptores de 29 especies de artrópodos sobrepuestos al árbol filogenético de esas especies, lo que significa en términos simples que cada especie tiene una sensibilidad diferente, la cual además puede variar según donde se encuentre el hábitat de dicho organismo (L. Chittka, 1999)

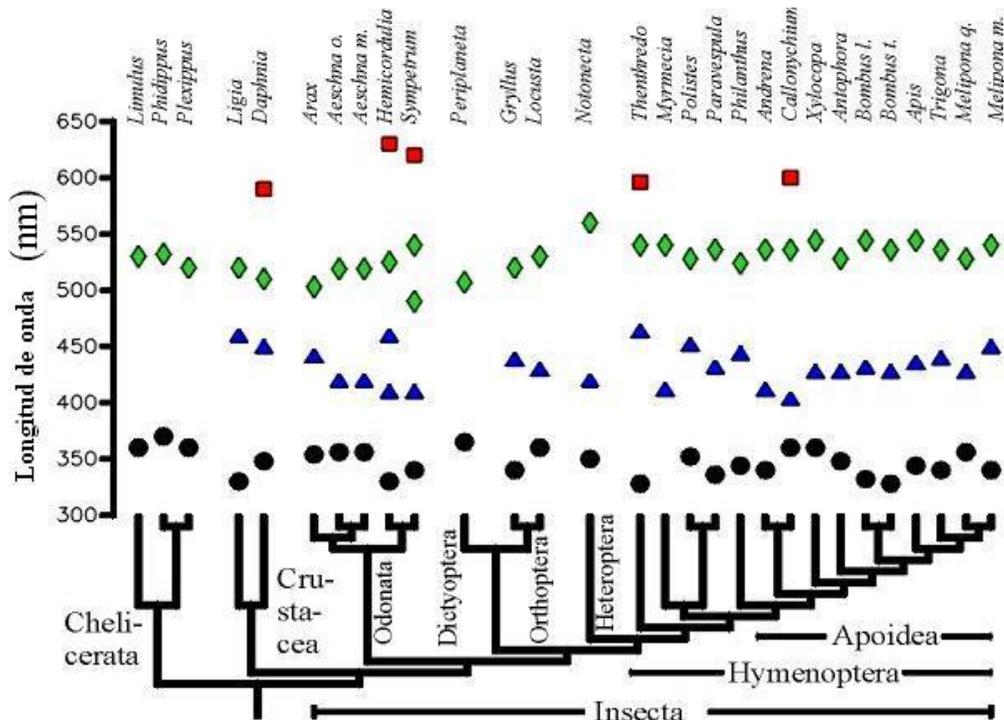


Figura 9. Muestra los valores de λ_{max} en fotorreceptores de 29 especies de artrópodos sobrepuestos al árbol filogenético de esas especies. *O* – receptores al UV (325-370nm); Δ – receptores al azul (400-460nm); \diamond – receptores al verde (490-560nm); \square – receptores al rojo (590-630).

En los últimos años han surgido nuevas investigativas respecto de los efectos de la contaminación lumínica en insectos, motivado esto por la importancia que tienen los estos en los ecosistemas (Conrad et al. 2006), así como su gran número y diversidad, pero también por su capacidad de identificar y responder en forma selectiva a las señales o estímulos del entorno (Devies et al. 2013; Garza 2016). Las investigaciones se han centrado en la atracción de insectos a las fuente luminoso, dada su particular sensibilidad a la luz (Poot et al. 2008; Lancore & Rich 2004), que tiene relación con las características que presentan los sistemas visuales de los insectos, que les permiten discriminar los colores y hasta la capacidad de captar señales luminosas débiles en condiciones de oscuridad, penumbra o crepúsculo (Smolka et al. 2015; Warrant & Dacke 2011), como es el caso de los insectos nocturnos. Hasta el momento, las experiencias realizadas dan cuenta de la importancia de la componente espectral de los sistemas de iluminación y sus efectos en la atracción de insectos, en especial luz artificial rica en longitudes de onda corta (Langevelde et al. 2011; MacGregor 2014; Brehm 2017), sin embargo, no profundizan en los porcentajes de las composiciones espectrales a las cuales algunos grupos de insectos son más o menos sensibles.

Los Lepidópteros nocturnos, dadas sus características morfológicas y sensibilidades espectrales (Briscoe & Chittka 2001), son fuertemente atraídas por las fuentes de iluminación artificial ricas en emisiones en longitudes de onda corta, preferentemente en el rango del azul y el UV (Langevelde et al. 2011; Verovnick et al. 2015), provocando alteraciones en sus patrones de vuelo y en sus conductas alimenticias y reproductivas, así como en sus interacciones para procesos ecológicos fundamentales, como es la polinización (MacGregor 2014; Grenis 2016). Los lepidópteros nocturnos se encuentran dentro del grupo de animales mayormente afectados por la contaminación lumínica, cuyas disminuciones de diversidad (es decir, riqueza de especies y abundancia) ya se han reportado en algunas localidades y zonas de Europa (Conrad et al. 2006; Verovnick et al. 2015). Los lepidópteros nocturnos presentan diversas sensibilidades espectrales dadas por sus ojos compuestos y por los pigmentos sensibles a la luz que forman parte de los

Fotorreceptores. La mayoría de las especies poseen receptores UV, azul y verde con variabilidad limitada en el posicionamiento de la longitud de onda (Briscoe & Chittka 2001), lo cual coincide con tecnologías de iluminación como LED y Halogenuros metálicos (MH) (Souza et al. 2016, Davies et al. 2013, Elvidge et al. 2010).

Estudios realizados como los de Frank van Langevelde y sus colaboradores en el año 2011, dejan en evidencia como la riqueza y abundancia de polillas son alteradas por los distintos tipos de luminarias que son características del alumbrado público, en especial aquellas con predominancia en emisiones en longitudes de onda más pequeñas, tal como se observa en las figuras 10 y 11.

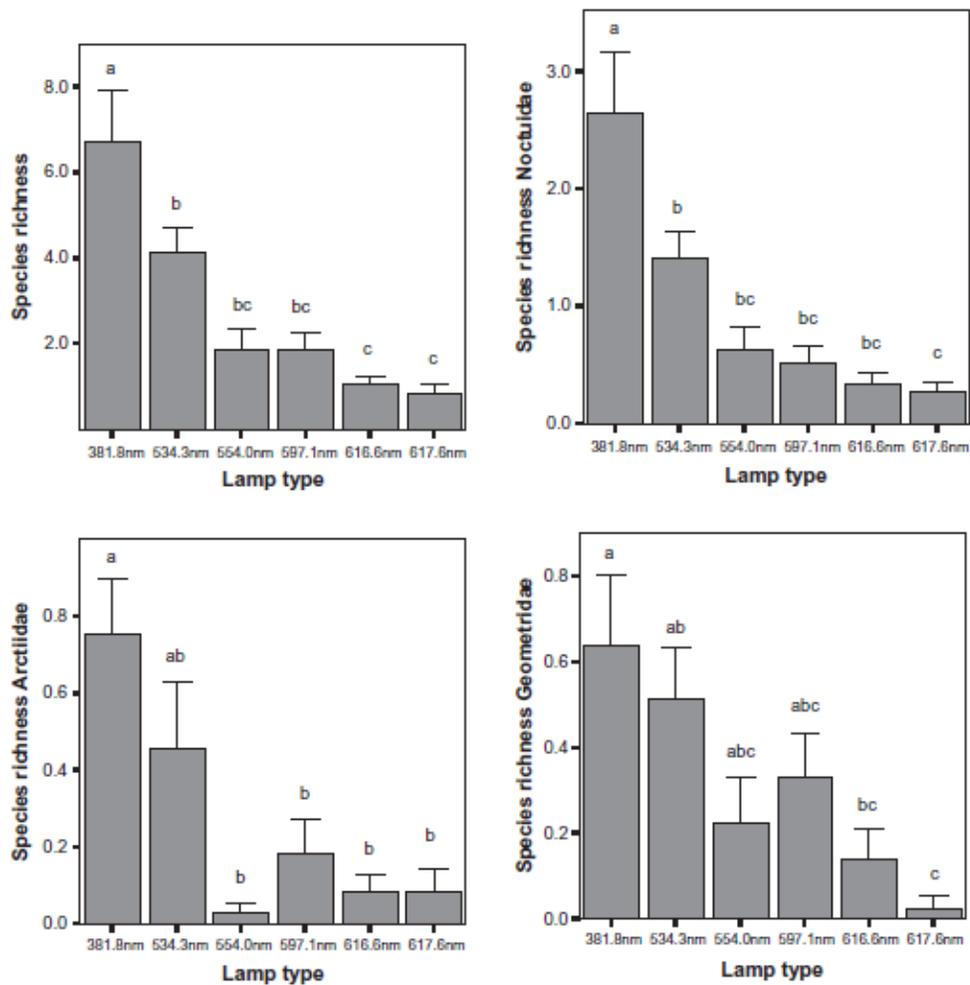


Figura 10. Riqueza media de polillas según tipo de lámpara, caracterizada según longitudes de onda

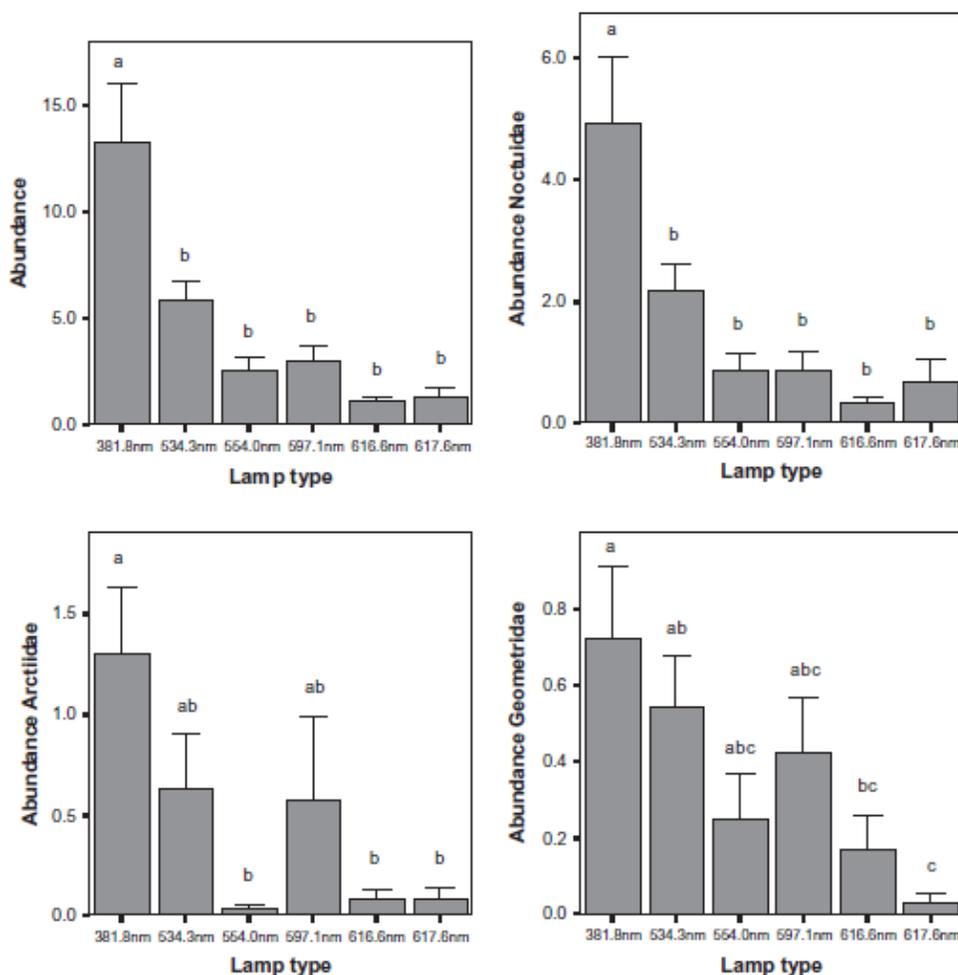


Figura 11. Abundancia media de polillas según tipo de luminaria, caracterizada según longitudes de onda

Atención especial se debe tener con los geométridos, esto dado que en Chile la Familia de los geométridos representa al segundo grupo de lepidópteros con mayor diversidad de especies después de la familia de los noctúdeos. De las seis familias que la conforman, cinco están presentes en nuestro país, destacando por su endemismo y porque todos sus hospederos conocidos son especies nativas, desempeñando un importante papel biológico en la polinización nocturna de estas, dado su condición de nectívoros (Bocaz & Parra 2005). Los geométridos han demostrado una particular sensibilidad a la componente azul del espectro, la cual, a partir de la incorporación de nuevas tecnologías

de iluminación, como son las luminarias LED, se ha hecho más presente en el medio natural, incrementando el brillo del cielo y pudiendo ser un factor disruptor relevante de los procesos de polinización.

Desde el punto de vista de la ecología conductual, la Contaminación Lumínica presenta efectos demostrables en el comportamiento de los seres vivos, principalmente la alteración de la conducta fundamental para algunas especies como lo es la **Orientación**, la cual se entiende como un comportamiento exhibido en forma individual por los animales en respuesta a la iluminación del ambiente.

El fenómeno de la Orientación en invertebrados ha sido muy estudiado principalmente en insectos, logrando determinar que las señales usadas por éstos como guía es el patrón de polarización del cielo azul (Pfeiffer K, Kinoshita M, Homberg U. 2005), explicado por la dispersión de Rayleigh, sirviendo este como referencia importante para la orientación espacial de los insectos. Al igual que la orientación, la **Desorientación** también responde a estímulos lumínicos del ambiente, la diferencia radica en que estos estímulos generalmente son en periodos de oscuridad natural, provocando desajustes y confusión que pueden ser temporales o permanentes dependiendo de la prolongación del fenómeno contaminante y de la respuesta del organismo.

Nutrición, es una conducta en la que gran parte de los invertebrados la realiza en el crepúsculo, es decir, bajo condiciones de baja luminosidad, como es el caso de algunas especies de abejas como la *Genalis Megalopta* (Augochlorini, Halictidae) y la *Lasioglossum* (Halictini, Helictidae), cuya alimentación se realiza en horas de la mañana y en la tarde con una intensidad de luz aproximadamente de $0,0001 \text{ Cd m}^{-2}$ (Kelbrer A. 2006). Esta conducta de muchos invertebrados se realiza bajo estas condiciones de luminosidad para disminuir las posibilidades de ser objeto de depredadores (Moore 2000).

La Reproducción sufre alteraciones importantes por efecto de la iluminación artificial manifestándose dramáticamente en los insectos, ya que la actividad sexual de gran parte

de estos se realiza bajo la oscuridad de la noche, independientemente si son de costumbres diurnas o nocturnas (Moore 2000). En muchas especies es el macho el que se desplaza grandes distancias para completar el ciclo reproductivo, actividad que generalmente se realiza bajo la oscuridad de la noche. La intervención de luz artificial en un proceso tan vital como este, puede dañar la biomasa total de la población de insectos, cambiando la composición relativa de dicha población y las diferentes relaciones tróficas que esto implica (Holker & Wolter 2010).

La reproducción lleva asociado complejos mecanismos de comunicación que de ser vulnerados pueden llevar al no cumplimiento del ciclo reproductivo, claro ejemplo es el denominado gusano de luz o luciérnaga (*Lampyris nocticula*), quienes desarrollaron un sistema de comunicación basado en la luz, en la cual el macho busca a la hembra bajo la oscuridad de la noche, por medio de señales luminosas que esta emite a longitudes de onda entre los 518-686 nm y una intensidad muy baja. Interrupciones en los rangos antes mencionados pondrían fin a la reproducción de estos insectos (Bruce & Chardlow 2011).

La Migración en los invertebrados es común en organismos acuáticos como el Zooplankton, el cual se mueve de arriba abajo dentro de una columna de agua con una periodicidad de 24 horas, este comportamiento se denomina "Migración vertical" siendo la luz el factor más importante que la desencadena. Basta con un valor de luminosidad parecido al de una media luna (<10-1 lux) para influenciar la distribución vertical de algunos invertebrados acuáticos como la *Daphnia* o pulga de mar (Moore 2000). La disminución de la migración vertical supone una menor presencia de organismos capaces de alimentarse de las pequeñas algas cercanas a la superficie, lo que implica un aumento desmedido de estas, alterando severamente la calidad del agua (Moore 2000).

Estudios sobre la Contaminación Lumínica en mares, ríos y lagos se han permitido revisar la respuesta de este tipo de organismos ante estímulos provenientes de lámparas usadas para la iluminación urbana cercana a estos cuerpos de agua, es el caso de los estudios realizados

por Marianne Moore y Susan Kohler (Department of Biological Sciences and Nuclear Magnetic Resonance Center, Wellesley College) en 2004, tomando para ello como referencia lagos cercanos a centros urbanos y lagos completamente alejados de estos. Los resultados obtenidos arrojaron que los espectros de la luz artificial que llegaban a los lagos con centros urbanos cercanos era dominadas por la luz en la región amarilla, con una cresta centrada aproximadamente en 590 nm, que correspondía en forma aproximada a el espectro de emisión de las lámparas de sodio a alta presión, que son las lámparas más comunes en las calles de los U.S.A. Los niveles de incidencia de luz artificial en los lagos (en el orden de $10^{-3} \mu\text{E m}^{-2} \text{S}^{-1}$) eran similares a las emitidas por la luna llena y casi 50 veces mayor que la de un lago rural iluminado solamente por la luz de las estrellas. En algunos lagos cercanos a ciudades se determinaron intensidades de luz artificial 530 veces mayores que las de lagos alejados de las urbes. Las nubes pueden agravar este problema aumentando los niveles la incidencia de la luz artificial en dos o tres veces. Se estimó en 3 metros la profundidad hasta la cual era perceptible la luz artificial por parte del plancton y de algunos animales acuáticos (Moore & Kohler 2004).

3. Efectos de la Contaminación Lumínica en Vertebrados

La alteración de los ciclos astronómicos fundamentales y sus efectos en los vertebrados ha sido objeto de diversos estudios científicos incluyendo diversas disciplinas, registrándose perturbaciones en los comportamientos naturales en forma individual o grupal de estos seres vivos, los cuales revisaremos a continuación.

Peces: Hasta hace poco las formas más comunes de degradación del mar tenían relación con la incorporación de nutrientes, sobrepesca, vertido de compuestos químicos, entre otras, y cuyos impactos han sido catastróficos para la vida marina en sus diversas formas (Bowen & Depledge 2006) hoy en día surge como una nueva forma de contaminación que afecta no solo las zonas costeras y cercanas a ellas (Depledge & Godard 2010), sino que también en forma importante el fondo del mar (Widder 2006), la incorporación de luz

artificial al agua desde fuentes de iluminación vial, portuarias, o generadas en faenas desarrolladas en el mar como la pesca, extracción de hidrocarburos, entre otras.

El principal impacto por efecto de la Contaminación Lumínica en los peces y diferentes organismos acuáticos está dado por la alteración en la migración, ya sea esta horizontal o vertical (Moore & Kohler 2000).

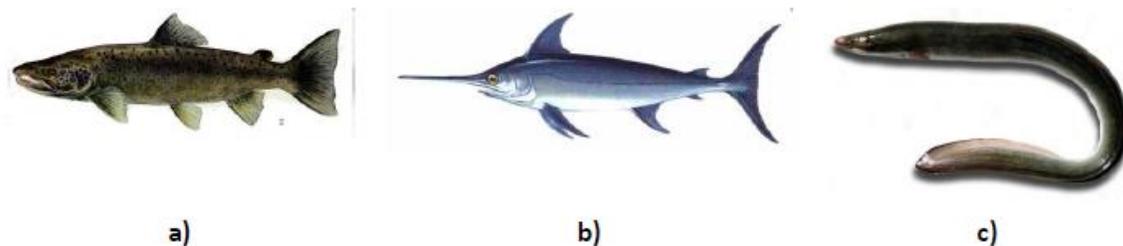


Figura 12. Algunas especies de peces afectadas por la Contaminación Lumínica: a) El Salmon requiere de condiciones muy especiales de luz para migrar, de ser interrumpida no llega a su destino, generalmente en ríos; b) La Luz de la Luna es un factor importante en la migración vertical u horizontal en gran parte de los peces nocturno, el que de ser interrumpido inhibe este desplazamiento; c) La anguila (*Anguilla anguilla*) inician su migración cuando sus Fotorreceptores terminan su desarrollo pero sufre serios inconveniente por las luces artificiales entorno a ríos y esteros por donde circulan.

Anfibios: Este tipo de vertebrados, que habitan parcialmente en la tierra y parcialmente en el agua, son en su gran mayoría organismos de costumbres crepusculares, por lo que presentan adaptaciones visuales para estas condiciones de oscuridad o luz tenue propia de su hábitat. Su sensibilidad a los cambios ambientales los convierte en uno de los grupos con mayores problemas de conservación (Dias-Paez & Ortiz 2003).

En el caso de las cerca de 3500 especies de ranas, los estudios muestran casos en los cuales un aumento rápido en la iluminación provoca una pérdida temporal de la capacidad visual de éstas, y cuyo tiempo de recuperación puede ser de minutos hasta horas (Buchanan

1994). Después de este ajuste a las nuevas condiciones de luminosidad, las ranas pueden ser atraídas hacia las fuentes de luz (Jaeger y Hailman 1973). Cambios temporales y permanentes a la iluminación de un área pueden afectar la reproducción de la rana, nutrición, la evitación depredadora, e interacciones sociales de éstas con individuos de la misma especie u otras. (Buchanan 2002). La tabla siguiente muestra algunas conductas de anfibios bajo condiciones de luminosidad natural de sus hábitats.

Tabla3. Actividad en los hábitats naturales bajo condiciones diurnas, crepusculares y nocturnas (Adaptación Langcore & Rich 2006)

Taxón	Diurno	Crepuscular	Nocturno	Referencia
Ascaphus truei	NO	NO	<0,0001 lux	Hailman 1982
Bufo boreas	NO	NO	0,1-0,00001 lux	Hailman 1984
Bufo marinus	NO		<0,01 lux	Jaeger and Hailman 1981
Bufo typhonius	8,5-110 lux	NO	NO	Jaeger and Hailman 1981
Colestetbus nuhicola	< 50 lux	0,01-50 lux	NO	Jaeger et al. 1976
Dendrobates auratus	<21 lux	1-21 lux	NO	Jaeger and Hailman 1981
Eleutherodactylus coqui	NO	NO	SI**	Woolbright 1985 and Hailman 1981
Hyla squirella	NO	NO	<0,003 lux	Buchanan 1992
Leptodactylus pentadactylus	NO	<1 lux	<0,01 lux	Jaeger and Hailman 1981
Phyllorhynchus pustulosus	NO	<150 lux	<0,01 lux	Jaeger and Hailman 1981

*NO actividad reportada bajo esas condiciones; **Si Actividad reportada por no iluminación provista.

Los principales impactos sobre estos animales producto de la Contaminación Lumínica se muestran en la siguiente tabla con sus respectivos ejemplos.

Tabla 4. Principales efectos de la contaminación Lumínica en Anfibios.

Parámetro afectado	Impacto
Alimentación	Las ranas se pueden ver favorecida ya que las fuentes de luz atraen a gran cantidad de insectos, que se convierten en la presa favorita de estos anfibios (Buchanan 2002). Otros anfibios como las salamandras igualmente ven alterados sus comportamientos alimenticios producto de las alteraciones a los periodos de baja o nula luminosidad, ya que sus horas de alimentación habitualmente son con posterioridad a la puesta de sol. (Wise y Buchanan 2002)
Reproducción	Las ranas hembras de la especie <i>Physalaemus pustulosus</i> , las que son menos selectivas a la hora de buscar un compañero en condiciones ambientales con niveles de luminosidad en aumento, prefiriendo probablemente acoplarse rápidamente, con el fin de minimizar las posibilidades de depredación (Rand 1997). Especies como <i>Ascaphus tuei</i> inhibe la reproducción a niveles de <0,0001 lux (Langcore & Rich 2006)(Ver tabla 3)
Migración	Las Migraciones por parte de los anfibios se realiza en forma estacional, ya que alternan las fases acuáticas y terrestres a lo largo de un ciclo anual basándose, como muchos de los seres vivos, en la capacidad de detectar la duración del día y la noche (Reavel 1998). La migración de los anfibios se estudió a lo largo del río Waal en los Países Bajos (Creemers. 1992), lo que puso de manifiesto que los animales migratorios frecuentaban las secciones iluminadas de una presa con mayor frecuencia que las no iluminadas. Las luces artificiales que emiten espectros inusuales pueden interrumpir los patrones de la migración de las salamandras, debido a que muchas de éstas son nocturnas y utilizan señales visuales para diversas funciones biológicas (Wise y Buchanan 2002)
Orientación	Este fenómeno esta posiblemente asociado a un modelo de magnetorecepción dependiente de la luz. Investigaciones en esta área han demostrado que para los animales que utilizan un compás magnético basado en fotoreceptores, las respuestas a la orientación magnética son afectadas por las longitudes de onda de la luz, es el caso de la salamandra, que demuestran que perciben

	un cambio a la izquierda en 90° en la dirección del campo magnético bajo luz de longitudes de onda cercanas a los 500 nm (Phillips y Borland 1999).
--	---

Reptiles: Los reptiles como animales de sangre fría y utilizan la luz solar para calentar su cuerpo porque no son capaces de mantener una temperatura corporal constante. Solamente la tortuga laúd es capaz de regular su temperatura corporal controlando su flujo sanguíneo, permitiéndole desplazarse hacia aguas más frías en busca de alimento (Eckert 1989).

Los principales impactos observados en reptiles tienen relación con la desorientación, alimentación y reproducción que se detallan en la tabla siguiente.

Tabla 5. Principales Efectos de la Contaminación Lumínica sobre los Reptiles

Parámetro afectado	Impacto
Alimentación	La cadena alimenticia se puede ver favorecida en un sentido u en otro, ya que la Contaminación Lumínica puede favorecer la presencia de mayor cantidad de insectos disponibles para la alimentación de algunas especies de reptiles en paridos crepusculares, por otro lado puede exponer a estos a otros depredadores, principalmente mamíferos, y convertir a los reptiles en presas fáciles (IDA 2010)
Reproducción	Para el caso de las tortugas y serpientes el exceso de luz artificial inhibe la anidación de las hembras y en ocasiones se exponen los nidos de sobremanera a depredadores que interrumpen el término del ciclo (M Salmon. 2002).
Orientación / Desorientación	Las diferentes señales naturales del entorno, como sombras, reflejos e intensidades variables de la luz, al ser interrumpidas por la luz artificial pueden generar graves perjuicios, como los sufridos por las tortugas recién nacidas que buscan desenfrenadamente la seguridad del mar, pero pierden la ubicación de este por efecto de la luz de diferentes luminarias (Tuxbury SM. 2005). El uso de LEDs

	integrado en la iluminación vial a permitido subsanar este problema ya que el tipo de emisiones de estas lámparas aleja a las tortugas y las encausa hacia el mar (Teikari 2007).
--	---

Aves: Son varias las especies de aves que emigran de un lugar a otro en busca de mejores condiciones de alimentación y reproducción, por lo que la interrupción de este proceso conlleva la interrupción de los demás, así que centraremos los comentarios en las alteraciones referidas a la orientación y desorientación de las aves por la acción de la Contaminación Lumínica.

Para emigrar con éxito a través de miles de kilómetros en la noche, las aves migratorias nocturnas necesitan saber hacia dónde vuelan. Estudios recientes han evidenciado que las aves desarrollaron moléculas especializadas en su sistema visual que le permiten el traducir la información del campo magnético a patrones visuales.

Las aves marinas han mostrado una baja constante en la distribución a nivel mundial y sin duda la fuerza impulsora de este fenómeno es el accionar del hombre. La Contaminación lumínica es uno de los factores que contribuye a esta disminución de las especies. Muchas de las aves marinas que emigran quedan vulnerables a la iluminación artificial, provocando una desorientación, por alteraciones en el reloj biológico, que puede finalizar dramáticamente con el choque de estas aves con estructuras artificiales como edificios (Podolsky. 2002) o torres de alta tensión (Gauthreaux. Jr 2002). Otros reportes evidencian el constante choque de las aves con barcos de pesca industrial en las costas de Groenlandia, con importantes cifras de mortandad (Ravn & Lambert 2011).

Los desajustes del reloj interno de los pájaros por efecto de la contaminación lumínica pueden causar errores en la valoración en la navegación (Pascal Reavel GREET Ingénierie).

Ejemplos de errores teóricos de navegación vinculados a un desajuste del reloj interno de las aves migratorias (según Mead 1983) se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 6. Desviaciones de la trayectoria en relación al objetivo

Desfase del reloj Minutos	Error de longitud (*) Km.	Desviación después de 500 Km. Km.
1	20	2
5	100	11
10	200	22
30	600	65

(*) Latitudes ajustadas a Europa

El estudio de los mecanismos que utilizan las aves migratorias nocturnas para guiarse han mostrado que éstas utilizan a las estrellas como referencia, lo cual ha quedado demostrado tras variadas experiencias llevadas a cabo en planetarios, donde se colocaron algunos pájaros para estudiar sus localizaciones en relación a los distintos cielos proyectados. Una hipótesis que explicaría esta respuesta de las aves es que serían más sensibles a movimientos insignificantes, que el ojo humano es incapaz de definir. Por ello el ser humano ve las estrellas como puntos fijos, mientras que los pájaros podrían discriminar los movimientos relativos de estos cuerpos celestes con relación al horizonte y a la estrella polar en el caso de aves que migran hacia el norte.

Mamíferos: Las consecuencias de la iluminación artificial sobre los mamíferos incluyen interrupciones generales de los ciclos diarios, dispersión, alimentación y oportunidades de

preproducción, los cuales son regulados por el reloj biológico interno que poseen los mamíferos en el núcleo supraquiasmático. (Grigione. 2002)

La distribución de mamíferos nocturnos implica las 986 especies de murciélagos, todas las especies de tejones y la mayoría de los carnívoros pequeños, la mayoría de los roedores, 20% de los primates y el 80% de los marsupiales. La Tabla siguiente muestra los principales impactos sobre los manificeros.

Tabla 7. Los principales efectos de la Contaminación Lumínica sobre los mamíferos

Parámetro afectado	Impacto
Alimentación	Es quizás el efecto que mejor se manifiesta en los mamíferos y que implica cambios en las conductas de competición y predación, ya que los diferentes niveles de iluminación generan competición de los recursos que comparten las diferentes especies en un medio determinado. La predación es vital para alguno mamíferos, ya que expone a aquellas especies que desarrollan sus actividades habituales durante niveles bajos de iluminación (K. Gaston et al. 2013,IDA 2010)
Reproducción	Se altearan los patrones de luz y oscuridad requeridos por algunos mamíferos para poder reproducirse, lo que genera aumentos o disminución en la población (K. Gaston et al. 2013, Bird 2004)
Orientación / Desorientación	El exceso de luz artificial provoca una dispersión de las individuos de una población en un hábitats ya sea por la atracción hacia la fuente o la repulsión a esta (F. Jaksic & L. Marone, 2013, IDA 2010)

Impactos en el ser humano: El estudio y la comprensión de los ritmos biológicos en el ser humano centran sus orígenes con el comienzo de la era espacial y la necesidad de saber cómo se comporta nuestro cuerpo bajo regímenes de luz diferentes a los normales (K. Gaston et al. 2014, Fucci RL. 2005), desde entonces se ha podido establecer la importancia del sistema circadiano y sus redes de estructuras encargadas de la generación y

sincronización de los ritmos circadianos con el medio ambiente (Rol & Madrid 2011). Esta red de estructuras está integrada por un marcapasos central, situado en el Núcleo Supraquiasmático (NSQ) del hipotálamo, y varios osciladores periféricos. El NSQ transmite señales temporales rítmicas a todos los órganos y tejidos a través de mediadores humorales (entre los cuales la hormona melatonina juega un papel principal) y del sistema autónomo nervioso. Entre todas las señales ambientales, la alternancia luz-oscuridad cada 24 horas es el sincronizador más importante del NSQ. En condiciones naturales el NSQ se reajusta todos los días por medio de la señal luminosa que llega a través de vías no visual que se inicia en un subgrupo de células ganglionares de la retina que poseen un fotopigmento, la melanopsina, que es particularmente sensible a la luz azul (Rol & Madrid 2011).

La interrupción del ciclo luz/oscuridad por la incorporación de luz artificial puede dar como resultado que los ritmos endógenos resulten desalineados con el fotoperiodo diario (Wyse & Selman 2011) originando la Disincronía Circadiana (CD por sus siglas en inglés), fenómeno que también es conocido como Disfunción Circadiana o Cronodisrupción (G. Brainard et al. 2001, K. Gaston et al. 2014, Rol & Madrid 2011, G. Brainard et al. 2008).

Una de las consecuencias fisiológicas directas de la exposición a la luz artificial en periodos de oscuridad natural es la supresión de la síntesis de melatonina, cuyo grado de supresión vendrá dado por el momento en el cual ocurra la exposición a la luz, la duración de la misma y las características de la luz (Longitud de onda). Las longitudes de onda que producen mayor inhibición son las que se encuentran en el rango de los 460-480 nm (Luz azul) (Rol & Madrid 2011), siendo la longitud de onda a la cual ocurre la mayor supresión de la melatonina a los 464 nm (G. Brainard et al. 2001)

Otros efectos que producen los trastornos de la Disincronía Circadiana están asociados al envejecimiento prematuro, afecciones cardiacas, además de ser un factor precursor del cáncer (Al-Niami 2004). Estudios más recientes evidencian que las irrupciones del fotoperiodo natural conllevan a favorecer la obesidad en humanos y severas disfunciones

metabólicas (Wyse & Selman 2011). En esta línea también se ha logrado determinar la incidencia de la contaminación Lumínica como factor de riesgo para el cáncer de mama y próstata (A. Haim & B. Portonov 2013).

Respecto de la salud visual, existe una preocupación específica relacionada con longitudes de onda en el azul. Lo cierto es que los rangos de peligro están entre los 400-500 nm con un peak aproximado en los 440 nm, siendo el principal efecto el daño fotoquímico producido en la retina, el cual se produce como parte de la reacción química de los tejidos a un estímulo luminoso, en este caso el tejido ocular, es por ello que los peligros de la luz azul derivada de las emisiones de luminarias LED esta abordada y normada en forma específica por ANSI/IESNA RP 27 y a norma IEC 62471, que ya se encuentra homologada como UNE 62471, a la que se suma la UNE 62778, la cual hace referencia específica a los riesgos de la luz azul sobre la retina (W. Henderson 2011, Kobayashi & Dhomen 2005)

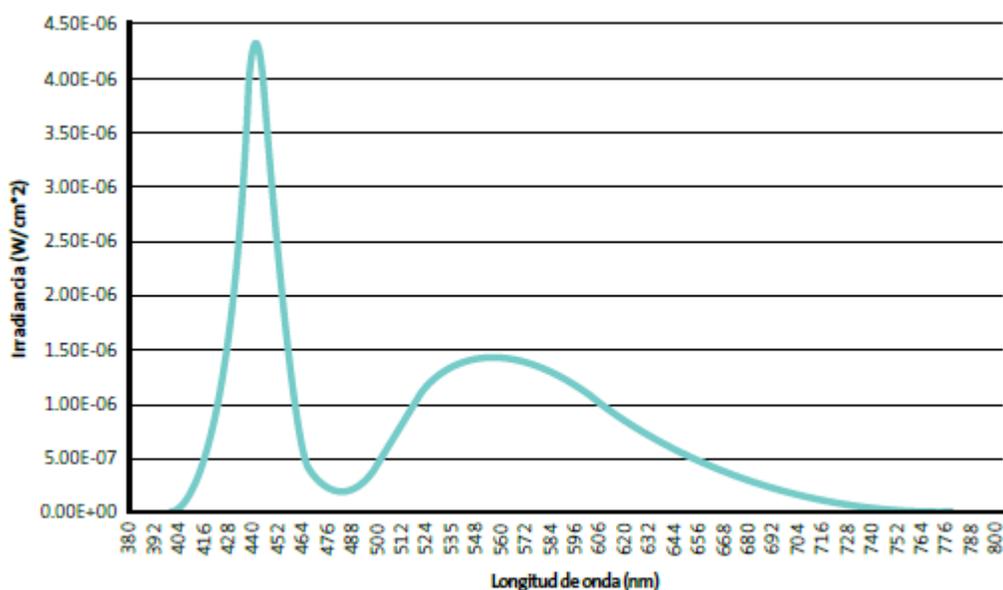


Figura 13. Espectro de emisión de luminaria LED en el azul (W. Henderson 2011)

A partir de esta preocupación por el peligro que representa la luz azul, y ante la evidencia científica de los efectos sobre la salud humana, la Asociación Médica Americana (A.M.A por

sus siglas en inglés) emite en un informe en junio del año 2016, alertando de los riesgos de este tipo de emisiones y realizando recomendaciones concretas para utilizar luminarias cuya temperatura de color sea dese los 3000 grados kelvin (K) o menor

VII. Efectos de la Contaminación Lumínica sobre la Cultura y Sociedad.

Hablar de los efectos de la Contaminación lumínica en la **Cultura** no hace reflexionar como hace solo 100 años cuando se acercaba un cometa y se hablaba de él, todo el mundo sabía de qué fenómeno se estaba hablando, pues solo tenía que levantar la mirada al cielo cada noche para verlo por sus propios ojos. Hoy tenemos que empezar por explicar que un cometa no es una estrella fugaz o un fenómeno místico o ajeno a nuestra realidad (Jáuregui 2011). Lo anterior es solo un ejemplo del impacto cultural que ha tenido la pérdida del cielo estrellado para la humanidad por la Contaminación Lumínica, dejando en evidencia que el problema no es solo un tema científico asociado a la astronomía, sino que tiene que ver con lo más elemental de la humanidad, su forma de expresarse y tomar conciencia de sí mismo (UNESCO 1982).

La relación de la humanidad con el cielo tiene raíces profundas, situándose en las bases mismas de la civilización humana, Mitos, religión, ciencia, arte, cultura oficial y popular. Los pueblos originarios de todo el mundo plasmaron su sabiduría, historias y experiencias en las estrellas, estudiaron el cielo para entender su entorno y su propio origen, comprendieron el movimiento de los astros y los asociaron a su quehacer.



Figura 14. El Kultrún es un instrumento ceremonial mapuche que representa la bóveda celeste, en el cual se identifican 3 cuerpos celestes importantes. El Sol, La Luna y Venus, esta última como una estrella pentagonal azul

Nunca ha habido tanta ciencia de las estrellas. Nunca hasta ahora hemos sabido mejor cómo funcionan, cómo evolucionan, cómo nacen y mueren. Sabemos describir con precisión matemática los procesos físicos que ocurren en su interior, la fuente de su energía, la forma que tiene el equilibrio que las mantiene estables durante eones. Si, sabemos de las estrellas mucho más que nunca, pero cada vez son menos los que las disfrutan (Jáuregui 2011).

La pérdida del cielo estrellado por efecto de la Contaminación Lumínica tiene en nuestras vidas un impacto muy importante relacionado con la comprensión de nuestro entorno. ¿Cuántos niños han visto la Vía Láctea? ¿Cuántos estudiantes universitarios que ya se gradúan y generaran conocimiento se han situado bajo el cielo estrellado a contemplar y comprender sus estructuras y movimientos? Este es el triste legado para las generaciones que vienen. Hemos perdido este panorama natural magnifico de forma absurda iluminando donde no se necesita.

La dimensión cultural del problema de la Polución Lumínica presenta factores que en la actualidad dificultan un abordaje eficaz de esta cuestión, principalmente porque la luz se asocia al bienestar y la calidad de vida, lo que radica en la falta de información adecuada sobre sus potenciales efectos y de lo que el cielo representa para nuestro entorno desde sus orígenes (S.Bará & D. Veiga 2011). Afortunadamente en muchos barrios y pueblos alrededor del mundo, los ciudadanos se han organizado para exigir a las autoridades recuperar parte de su patrimonio y cultura, comenzado a observar nuevamente el cielo nocturno, aportando nuevos elementos en la enseñanza de las ciencias y de la cultura local y global de una manera simple y a la vez específica que implica conocer el cielo y su trascendencia a través de la historia.

Son varias las iniciativas que se han desplegado con el fin de proteger y promover el patrimonio cultural tangible e intangible asociada a la visión del cielo nocturno (C. Marín 2011), dentro de las cuales destaca la impulsada por la UNESCO en 2009 denominada “Astronomía y Patrimonio mundial”, que busca resaltar y reconocer el carácter astronómico

y cultural de lugares como Teotihuacán, Stonehenge, Giza, Carnac, Chichen Itza, Delos y Jaipur. Tal vez cuando entendamos que el cielo es nuestra herencia común y universal, así como una parte integral del medio ambiente que el ser humano percibe (UNESCO 2005), hagamos algo para cuidarlo y preservarlo para las generaciones futuras.

Desde la mirada de los efectos en la **Sociedad** La extensión de los sistemas de alumbrado público ha sido uno de los avances fundamentales para el desarrollo de las sociedades urbanas a partir de mediados del siglo XIX, pero el innecesario mal uso de este recurso ha desembocado en un problema ambiental de gravedad cada vez mayor (S. Bará 2011).

La luz en la sociedad tiene un rol muy importante, asociado a la alegría, a la belleza, al progreso y por sobre todo a la seguridad (G. Echague 2011), este último concepto, sumado a la extensión constante de las jornadas de trabajo y esparcimiento de las personas, ha implantado la necesidad de iluminación de calles, carreteras y diversos espacios exteriores e interiores donde se realizan estas actividades.

Mayor iluminación no es igual a mayor seguridad, así como tampoco una mayor cantidad de luminarias o mayor potencia de estas asegura la iluminación adecuada de un espacio determinado. Este simple razonamiento es ignorado por completo por la mayoría de la población y por gran parte de las autoridades, las cuales al momento de iluminar un espacio público o privado lo hace de una forma inadecuada generando excedentes de luz que se dispersan en la atmosfera llegando hasta nuestros ojos provocando ciertos grados de deslumbramiento.

Desde el punto de vista de la iluminación vial, se ha estudiado la relación entre la capacidad de reacción del conductor con las diferentes fuentes de luz, para mismos valores de luminancia (Mar Gandolfo 2011). Cuando mejor es la sensibilidad visual de una persona, es más rápida la percepción del entorno y por ende es más rápida la capacidad de responder. Esta capacidad visual en una instalación realizada con luz blanca es mayor que con luz

amarilla. Existe una relación entre luz blanca y el incremento de la visión periférica (S. Blumtritt 2004), especialmente por los conductores, sobre todo en lugares conflictivos, tales como cruces, accesos, grietas, etc. En este sentido toma mucha importancia la fuente de esta luz blanca, ya que como se mencionó en numerales anteriores, también se observa la pérdida de la visión periférica en presencia de luz proveniente de lámparas o sistemas LEDs (Kobayashi & Dhomen 2005).

Para la iluminación de espacios públicos, tradicionalmente observable en plazas y vías peatonales, la iluminación resulta deficiente por la mala estrategia de iluminación que mezcla diferentes tipos de lámparas, o bien diferentes tipos de potencia, llevando a una percepción pobre del entorno o pérdida de este por deslumbramiento por la mala utilización de la luminaria, generando importantes problemas de seguridad para la comunidad.



Figura 15. En la imagen de la derecha se observa una persona bajo una luminaria del tipo globo con emisiones de luz blanca. Para la imagen de la izquierda no se aprecia con claridad la persona a pesar que se desplazó solo 1 metro hacia la derecha, lo cual evidencia que la seguridad pública está asociada a la forma adecuada de iluminación

VIII. Consideraciones ambientales en el recambio de luminarias y reflexiones finales

Casi nunca nos hemos detenido a examinar y evaluar hasta qué punto el alumbrado público es necesario y qué características básicas debería tener para satisfacer adecuadamente las necesidades de iluminación y ahorro energético (R. Barón 2011), tampoco nos hemos preocupado en demasía de los efectos del exceso de luz en el medio ambiente y de las alteraciones sobre la calidad de vida y la salud humana, pero ya es tiempo de asumir estos temas como parte integral de los proyectos de iluminación, ya sean nuevos o de recambio, y proponer soluciones sostenibles que permitan contar con una iluminación adecuada que garantice el bienestar ciudadano y cuidado del ecosistema.

En la actualidad los cambios de luminarias que se han realizado a lo largo del país, en su gran mayoría carecen de criterios técnicos reales que aporten en forma significativa a la eficiencia energética, la salud de las personas o al cuidado del medio ambiente, siendo la excepción a esto lo que ocurre en las regiones de Coquimbo, Atacama y Antofagasta, en las cuales, la presencia de importantes complejos astronómicos y una legislación específica vigente, ha permitido regular el despilfarro de luz por medio del recambio de luminarias en varias comunas de estas regiones, preservando así en parte la calidad astronómica del cielo y aportando en forma significativa en el ahorro de recursos y energía para los municipios que han implementado dichas medidas. Si bien desde 2014 el Ministerio de Energía ha impulsado el cambio de luminarias públicas, pasando desde las tecnologías convencionales a tecnologías LED, son pocos los municipios que han tomado los resguardos en materia ambiental y si lo han hecho, no hay certeza de que las medidas asumidas estén bien implementadas.

El desafío para los próximos años es poder encontrar un sistema de alumbrado público sostenible, capaz de responder a las necesidades de la comunidad en materia de

iluminación, ahorro energético y armonía con el medio ambiente. Para el logro de esta meta será vital el uso e implementación de la tecnología adecuada, normas acordes a los estándares mundiales y a la calidad de Chile como capital mundial de la astronomía, así como de una rigurosa fiscalización de estas condiciones por parte de las autoridades.

Si bien ya se encuentra lista para su promulgación la ley que define la luminosidad artificial como elemento contaminante en Chile, la cual además establece la elaboración de Estudios de impacto ambiental para actividades en zonas cercanas a glaciares y/o áreas de observación no resuelve el problema de la contaminación lumínica Chile, ya que como se ha mencionado a lo largo de este informe, los efectos de este tipo de contaminación son transversales, afectando a los ecosistemas y a la salud de las personas de todo el país y no solo de aquellas zonas que tienen observatorios astronómicos. Persiste entonces, el problema territorial asociado a la aplicación de la norma, y en virtud de la definición de la calidad astronómica del cielo, se sigue cometiendo el error de otorgar la capacidad de observación al cielo nocturno, en desmedro de su real función como variable ambiental capaz de regular los parámetros de luz y oscuridad que determinan los ecosistemas y la biología del planeta, incluso la nuestra como seres humanos.

Bibliografía

- B, L. O. (2008). *Photobiology: The Science of life*. Sweden: Springer.
- Bará, S., & Ecofert, J. (2018). On lamps, walls, and eyes: The spectral radiance field and the evaluation of light pollution indoors. *Journal of Quantitative*, 267-277.
- B. M. Matesanz, I. A. (2006). Diseño de una prueba psicofísica para la evaluación del tiempo de recuperación al deslumbramiento: aplicación a la conducción nocturna. *Opt. Pura Apl.*, 39(4), 297-302.
- Bennie, J., Davies, T. W., & David Cruse, K. J. (2016). Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *Journal Ecology*, 611-620.
- Brehm, G. (2017). A new LED lamp for the collection of nocturnal Lepidoptera and a spectral comparison of light-trapping lamps. *Nota Lepi*, 87-108.
- Briscoe, A. (2001). Functional Diversification of Lepidopteran Opsins Following Gene. *Mol. Biol. Evol.* , 18(12), 2270-2279.
- Briscoe, A., & Chittka, L. (2001). The Evolution of Color Vision in Insect. *Annual Reviews Entomology*, 471-510.
- Bruno Augusto Souza de Medeiros, A. B. (2016). Streetlights attract a broad array of beetle species. *Revista Brasileira de Entomología*, 74-79.
- Carlos Zamora, L. E. (2011). Patrones de distribución de los geométridos de la Región del Biobío, Chile: Una aproximación para su conservación. *Revista Chilena de historia Natural*, 465-480.
- Carolina Rojas, E. S.-Z. (2015). Patrones de urbanización en la biodiversidad de humedales urbanos en Concepción Metropolitano . *Revista de Geografía Norte Grande*, 61: 181-204 , 181-204.
- Conrad, K., Warren, M., & Fox, R. (2006). Rapid declines of common, widespread British moths. *Biological Conservation* , 279-291.
- D. Galadí (2011); “Contaminación Lumínica: La propagación de la luz en la atmosfera y sus implicancias para la astronomía”; *Revista del Colegio Oficial de Físicos de España*; Centro Astronómico Hispano Alemán Almería, España.
- D.G Stavenga, S. F. (2006). Light on the moth-eye corneal nipple array of butterflies. *Proc. R. Soc. B*(273), 661-667.

- Davies, T. W., Bennie, J., Inge, R., Hmpel, N., & Gaston, K. J. (2013). Artificial light pollution: are shifting spectral signatures. *Global Change Biology*, 1417-1423.
- D.. Plachetzki, J. M. (Septiembre de 2005). *TRENDS in Ecology and Evolution* Vol.20 No.9 September 2005. *TRENDS in Ecology and Evolution* Vol.20 No.9 September 2005, 20(9).
- Donoso, C. (2008). *Ecología Forestal*. Santiago, Chile: Editorial Universitaria.
- Eisenbeis, G., & Hanel, A. (2009). Light pollution and the impact of artificial night. *Ecology of Cities and Towns*, 243-263.
- Eisuke Eguchi, K. W. (1982). A Ccomparisson of Electrophysiologically Determined espectral responses in 35 species of lepidoptera. *Insect Physiol.* , 28(8), 675-682.
- Elton Silva, A. M. (August de 2017). Light pollution affects nesting behavior of loggerhead turtles and predation risk of nests and hatchling. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 173, 240-249.
- Elvidge, C. D., Keith, D. M., Tittle, B. T., & Baugh, K. E. (2010). Spectral Identification of Lighting Type and Character. *Sensors*, 3961-3988.
- Falchi, F., Cinzano, P., & Kyba, D. D. (2016). The new world atlas of artificial night. *American Association for*, 1-25.
- Felicisimo, A., & Fernández, G. (1984). Estimación de la Radiación solar incipiente sobre superficies con pendiente y orientacion variable. *Sivdia Ecologica*, 267-284.
- Frank, K. (1988). Impact of outdoor lighting on moth an assesment. *Journal of the Lepidopterists' Society*, 63-93.
- Frank B. Salisbury *y+ Cleon W. Ross (2000); “Fisiología de las plantas” , Editorial Iberoamericana
- Galad, D. (2010). Contaminación Luminínica:La propagación de la luz en la atmósfera. *Física y Sociedad*, 8-10.
- Garza, M. (2016). Mecanismos no químicos de comunicación en insectos. *Artrópodos y salud*, 21-29.
- Gordon L. Fain, R. H. (2010). Phototransduction and the Evolution of Photoreceptors. *Current Biology*.
- Grenis, K. (2016). Impact of Light Pollution on Species Interactions. University of Denver.
- Herranz, C., Olle, J. M., & Jáuregui, F. (2010). La Iluminación con LED y el problema de la contaminación lumínica. *Física y Sociedad*, 36-42.
- Jhan Saavedra, L. Z. (2013). Circadian rhythm: the master clock. Alterations involving the state of sleep and wakefulness in the area of healt. *Morfolia*, 16-35.

- Jiménez-Sánchez, Á. (2010). Biodiversidad y Tectónica de Placas. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra,, 85-96.
- Jin-Tun Lin, P.-C. H.-C. (2002). Visual Organization and spectral Sensitivity of larval eyes in the moth *trabala vishnou* Lefebur (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Zoological studies*, 41(4), 366-375.
- Jochen Smolka, E. B. (2016). Night sky orientation with diurnal and nocturnal eyes: dim-light adaptations are critical when the moon is out of sight. *Animal Behaviour*, 127-146.
- Jorge Castresana, L. P. (2017). Estudio comparativo de diferentes trampas de luz (LEDs) con energía solar para la captura masiva de adultos polilla del tomate *Tuta absoluta* en invernaderos de tomate en la Provincia de Entre Ríos, Argentina. *IDESIA*, 87-95.
- Kevin J. Gaston, *. J. (2013). The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biological Reviews*(88), 912-927.
- Kohen, E., Santus, R., & Hirschberg, J. (1995). Photobiology. En E. Kohen, R. Santus, & J. Hirschberg, *Photobiology* (págs. 3-22;138-139). San Diego, California, EE.UU: Academic pres. Recuperado el 25 de mayo de 2018
- Lancore, T., & Rich, C. (2004). Ecological Light pollution. *Frontiers in ecology and environmental*, 191-198.
- Langevelde, F. V., Attema, J. A., Donners, M., Wallis, M. F., & Groenendijk, D. (2011). Effect of spectral composition of artificial light on the attraction of moths. *Biological Conservation*, 2274-2281.
- MacGregor, C. J., Pocok, M. J., Fox, R., & Evans, D. M. (2014). Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of a light pollution: review. *Ecological Entomology*, 21-29.
- Manzano E., R. M. (2014). Requerimientos para luminarias de LED en iluminación urbana. XII Conferência Ibero-Americana de Iluminação - Lux América 2014.
- Navarro, C., & Hughes, L. E. (2015). Effects of light pollution on the emergent fauna of shallow marine. *Marine Pollution Bulletin*, 235-240.
- L. Olof, (2008). *Photobiology, The Science of Life and Light*, SPRINGER, Sweden
- P. Cinzano, F. F. (2000). The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements. *Revista Soc. Astron.*, 641-657.
- P. Cinzano F. Falchi1, a. C. (2001). The first World Atlas of the artificial night sky brightness. *Revista Soc. Astron.*, 689-707.

- Parra, L. E., I.-V. H. (1986). Taxonomía y notas biológicas de un nuevo género y especie de Geometridae de Chile (Insecta: Lepidoptera). SHILAP Revista de Lepidopterología , 53-61.
- Patricia Bocaz, L. E. (2003). Larval Morphological Variation and its relation to host plants in *Syncirsodes Primata* (LEPIDOPTERA: GEOMETRIDAE). *Gayana*, 39-44.
- Poot, H., Ens, B. J., & Vries, H. d. (2008). Green Light for Nocturnally Migrating Birds. *Ecology and Society*.
- Ragni, M., & RIBERA, M. (2004). Light as an information carrier underwater. *Journal of Plankton Research* , 26(4), 433-443.
- Roch, M., Chow, S., & McGeoch. (2001). Testing a bioindicator assemblage : gall-inhabiting moths and urbanization. *African Entomology*, 85-94.
- Romina Villagrán, M. A. (Revista Chilena de Historia natural). Relación entre características del hábitat y estructura del ensamble de insectos en humedales palustres urbanos del centro-sur de Chile. *Humedart*, 195-202.
- Rudi Verovnik. (2015). How to reduce the impact of artificial lighting on moths: A case study on cultural heritage sites in Slovenia. *Journal for Nature Conservation*, 105-111.
- Yamin G., J. A., & Pattini, A. E. (2016). Evaluación de confort visual en escenas con iluminación natural directa. I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable (ENCACS 2016) , (págs. 189-199).
- Verovnik, R., Fiser, Z., & Zaksek, V. (2015). How to reduce the impact of artificial lighting on moths: A case study on cultural heritage sites in Slovenia. *Journal of nature Conservation*, 105-111.
- Warrant, E., & Dacke, M. (2011). Vision and Visual Navigation in Nocturnal Insect. *Annual Reviews Entomology*, 239-254.