



Justificación Restricción Espectral y Zonal Proceso Revisión DS043/2012 MMA

Oficina de Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile - OPCC

Resumen

Mediante resolución CVE1578632 del 24 de abril de 2019, el Ministerio de Medio Ambiente da inicio a la revisión de la Norma de Emisión para la Regulación de la Contaminación Lumínica DS043/2012 MMA. Luego, el 31 de mayo de 2019, la Oficina de Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile -OPCC- hizo entrega del documento Propuestas de la OPCC para la Revisión de la Norma de Emisión para la Regulación de la Contaminación Lumínica y sus Sistemas Asociados. Debido al gran impacto que sufre la operación de los grandes observatorios astronómicos por la contaminación lumínica, y a la urgente necesidad de reducir los niveles actuales de deterioro del cielo nocturno, se ha propuesto un conjunto de medidas que reducen los límites de emisión espectral en zonas cercanas a los observatorios. El presente documento es una justificación ampliada de la propuesta presentada en mayo pasado, en torno a limitar la magnitud de la radiancia espectral y la emisión lumínica en bandas inferiores a los 500nm, a fijar radios de protección y a establecer una clasificación zonal nacional.

Redactado por:

Miguel Martínez

Pedro Sanhueza

Carlos Corco

Hugo Rojas Astudillo

Rodolfo Angeloni

Guillermo Damke

Colaboración de:

Fabio Falchi

Guillermo Blanc

Índice

Introducción.....	3
Definición de Contaminación Lumínica.....	3
La Dependencia Espectral de la Contaminación Lumínica.....	5
Coste de la Contaminación Lumínica en los Observatorios	6
Investigación Astronómica Afectada por la Contaminación Lumínica	9
La Contaminación Lumínica en el Norte de Chile	11
Imágenes Satelitales del Brillo Artificial Nocturno.....	11
Evolución Temporal de la Contaminación Lumínica.....	12
Determinación de Zonas Contaminadas Lumínicamente	14
Mediciones de Contaminación Lumínica en Observatorios	16
Incremento Futuro de la Contaminación Lumínica	20
Medidas Para Reducir la Contaminación Lumínica.....	24
Radio de Protección Sobre los Observatorios Astronómicos	24
Reducción de Emisiones en Bajas Longitudes de Onda	27
Conclusiones.....	33
Anexo:	34
El Caso del Observatorio de Mount Wilson, un Ejemplo a Temer.	34
Referencias.....	38

Introducción

Definición de Contaminación Lumínica

La emisión de luz perturbadora (*obstrusive light*) se considera un contaminante porque es un riesgo para la seguridad, produce perturbaciones ecológicas, puede generar molestias visuales y medioambientales, y representa un desperdicio de energía (CIE-126, 1997). Otro tipo de contaminación lumínica es el brillo general difuso en el cielo (*sky glow*) que conlleva la pérdida de oscuridad (Narisadam & Schreuder, 2004).

El brillo del cielo nocturno (*sky brightness*) se produce por la reflexión de la radiación, dispersada por los componentes atmosféricos (moléculas de gas, aerosoles, y otras partículas), y consta de una componente natural producida por la radiación de las fuentes celestes y los procesos luminiscentes atmosféricos, y una componente artificial producida por fuentes antropogénicas (CIE-126, 1997).

Típicamente, se utiliza como umbral para definir la contaminación lumínica la Recomendación 1 de la Comisión 50 de la IAU (Smith, 1979), donde se indica que: el incremento en el brillo del cielo a una elevación de 45 grados debido a la luz artificial dispersada en un cielo despejado no debe exceder el 10% del menor nivel de brillo natural en ninguna parte del espectro entre longitudes de onda de 300nm y 1000nm. El menor nivel de brillo natural corresponde a aproximadamente $21.6 \text{ mag/arcsec}^2$ (Smith, 1979), aunque el valor concreto depende de las características particulares del lugar, como puede verse en la Tabla 1 (Hänel et al., 2018).

Observatorio	Radianza Cenital (mag/arcsec^2)
Tenerife, Observatory Teide	21.4
Calar Alto	21.8
La Palma, Obs. Roque de los Muchachos	21.9
Kitt Peak	22.0
Mauna Kea, Hawaii	22.05
La Silla	21.7
Paranal	21.7 (range 21.0-22.3)
Hubble Space Telescope	22.7 (range 22.1-23.3)

Tabla 1. Valores típicos del brillo de cielo en la banda Johnson V (Hänel et al., 2018)

Para determinar la calidad de la oscuridad de los cielos, Bortle (2001) creó una escala de Clases de Cielo Oscuro (*Bortle Dark Sky Scale*). Esta escala de clases define la calidad de la oscuridad de los cielos de un punto de vista cualitativo, en función de la observabilidad de distintos cuerpos celestes, siendo una Clase 1 unos cielos excelentes y una Clase 9 un cielo completamente oculto por la contaminación de una ciudad cercana. La Figura 2 muestra los rangos de brillo del cielo en unidades de $mag/arcsec^2$ y el incremento artificial del brillo natural correspondientes a las Clases de la Escala de Bortle. En esta escala, la Clase Bortle 3 representada en azul (con mediciones entre $21.5-21.3 mag/arcsec^2$) se consideran ya zonas con contaminación lumínica debido a que el incremento del brillo artificial supera en un 10% el brillo natural (Smith, 1979).

Color Magnitude	Bortle Class	Sky Brightness	
		mag/arcsec ²	Artifi./Natural
7.6 - 8.0	1	>21.90	<0.01
7.1 - 7.5	2	21.90 - 21.50	0.01 - 0.11
6.6 - 7.0	3	21.50 - 21.30	0.11 - 0.33
6.3 - 6.5	4	21.30 - 20.80	0.33 - 1.00
6.1 - 6.3	4.5	20.80 - 20.10	1.00 - 3.00
5.6 - 6.0	5	21.1 - 19.10	3.00 - 9.00
5.0 - 5.5	6,7	19.1 - 18.00	9.00 - 27.0
<4.5	8,9	<18.00	>27.0

de la Escala de Bortle. En esta escala, la Clase Bortle 3 representada en azul (con mediciones entre $21.5-21.3 mag/arcsec^2$) se consideran ya zonas con contaminación lumínica debido a que el incremento del brillo artificial supera en un 10% el brillo natural (Smith, 1979).

Figura 2. Niveles de la escala de cielo oscuro de Bortle y sus correspondientes magnitudes de brillo de cielo y de incremento respecto al brillo natural.

En la Figura 3 se representa el factor de incremento del brillo del cielo, los valores correspondientes en distintas unidades de medida ($mag/arcsec^2$ y mcd/m^2), y el correspondiente número de estrellas visibles en función de la escala de Bortle.

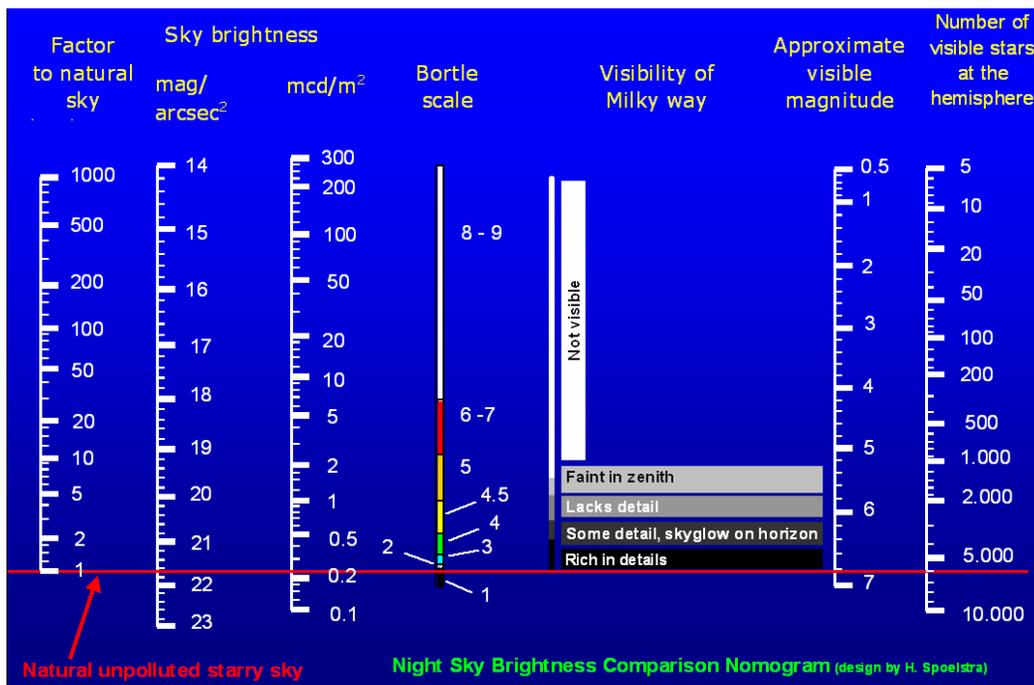


Figura 3. Clases de la escala de Bortle en distintas unidades (obtenido de www.darks skiesawareness.org)

La Dependencia Espectral de la Contaminación Lumínica

Actualmente existen múltiples tecnologías de iluminación con distintos espectros de emisión en la banda visible. En la Figura 4 puede verse la emisión del espectro de la luz solar (*daylight*) comparada con las emisiones de algunas de las tecnologías más habituales de iluminación.

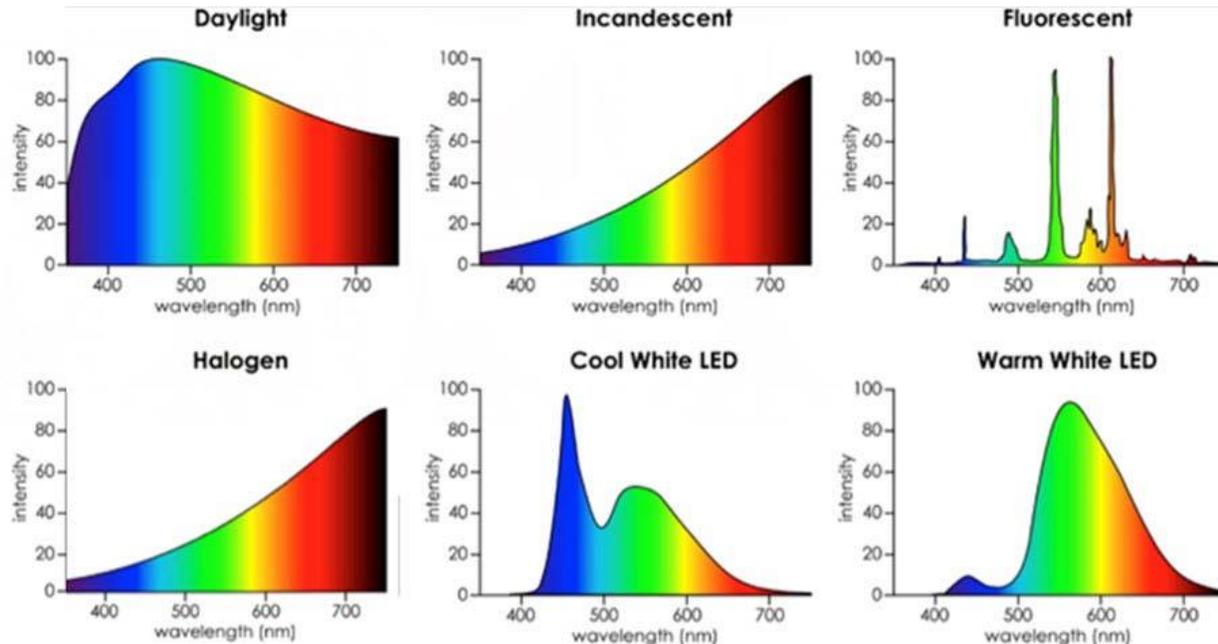


Figura 4. Espectro emitido por algunas tecnologías de iluminación en el rango visible (obtenido de: <https://media.mercola.com/ImageServer/Public/2016/October/led-lighting-2.jpg>)

Incluso cuando las fuentes de iluminación están bien instaladas, ajustadas, y apantalladas, el cielo recibe una parte de su emisión directa y otra parte del reflejo en las superficies que iluminan (Narisadam & Schreuder, 2004). Esa luz se dispersa en distintas direcciones debido a la dispersión atmosférica (*scattering*), formando un brillo artificial difuso en el cielo (*sky glow*). Las emisiones de luz que se ven dirigidas en direcciones casi verticales recorren una distancia aproximadamente igual al espesor de la atmósfera (que típicamente se aproxima a unos 8km de altura), por lo que no sufren mucha dispersión atmosférica y por lo tanto no generan una gran contribución en el brillo del cielo. Por el contrario, las emisiones lumínicas en elevaciones casi horizontales pueden recorrer grandes distancias de más de 100km y, por lo tanto, tienen una mayor probabilidad de ser dispersadas y generar un brillo artificial del cielo (Narisadam & Schreuder, 2004).

Lunes, 26 de agosto de 2019

La dispersión de Rayleigh tiene una dependencia inversa a la cuarta potencia de la longitud de onda (λ^{-4}), lo que implica que las emisiones en 450nm (azul) se dispersan en la atmósfera tres veces más que las emisiones en 589nm (amarillo-ámbar) y seis veces más que en 700nm (rojo), y por lo tanto contribuyen mucho más intensamente al brillo del cielo (Luginbuhl et al., 2009). De hecho, esa dispersión es la responsable del color azul del cielo diurno. En el caso del cielo nocturno, la mayor dispersión provocada por las emisiones en el azul en las moléculas de la atmósfera incrementa sustancialmente el brillo del cielo nocturno, al punto que es necesaria únicamente una pequeña proporción de luz azul para que el efecto en el cielo sea notorio.

Coste de la Contaminación Lumínica en los Observatorios

La contaminación lumínica disminuye en gran medida el contraste del brillo de una estrella sobre el fondo, siendo actualmente uno de los retos medioambientales más importantes de la astronomía en las bandas ópticas e infrarrojas (Murdin, 2001). La efectividad de los telescopios para medir fuentes celestes con débil brillo disminuye con la contaminación lumínica, haciendo que un incremento del 10% en el brillo del cielo requiera aumentar un 10% el tiempo de observación para obtener la misma relación-sígnal-ruido (*SNR*) de la fuente a observar (Luginbuhl et al., 2009). Si el brillo del cielo artificial aumenta, eventualmente puede hacer que las estrellas con un brillo más débil no puedan ser discernibles, haciendo que la efectividad de la visualización de un telescopio se reduzca considerablemente.

El efecto de reducir el contraste debido a la contaminación lumínica es equivalente a reducir el diámetro efectivo del espejo primario del telescopio (Schreuder, 2001). El coste de un telescopio se incrementa con la tercera potencia del diámetro del espejo, por lo que las pérdidas económicas de la contaminación lumínica son extremadamente elevadas (Schreuder, 2001). En los grandes telescopios ópticos los efectos de la contaminación pueden reducir el valor efectivo del instrumento, llegando a ser calculadas unas reducciones del 10-40% del valor original en los telescopios de Mount Palomar o Mount Wilson (Murdin, 2001). Ver Anexo "El Caso del Observatorio de Mount Wilson, un Ejemplo a Temer", de Guillermo Blanc, elaborado para explicar cómo la contaminación lumínica afectó de tal manera a este observatorio que le hizo perder relevancia científica, después de haber sido por décadas el más relevante del mundo. Actualmente representa una Clase 6-7 en la escala de Cielo Oscuro de Bortle debido a la contaminación lumínica generada por la ciudad de Los Ángeles

Lunes, 26 de agosto de 2019

Un estudio de David L. Crawford (2000) cuantificó las pérdidas de valor efectivo de un telescopio de 4 metros de apertura debidas a la disminución efectiva de la apertura del espejo por la contribución de la contaminación lumínica. Se estimó la apertura equivalente del telescopio debida a la acción de la contaminación lumínica como $A_e = (A^2/X)^{0.5}$, donde A es la apertura real del telescopio, y X el incremento de brillo del cielo artificial (p.e. un valor de 1.2 significa un incremento del 20% respecto del brillo natural del cielo). El porcentaje del coste del telescopio se estimó considerando que escalaba como $\Delta\$(\%) = (A_e/4)^{2.7}$. Los resultados del modelo de Crawford para un telescopio de 4 metros de apertura pueden verse en la Tabla 2.

Incremento del brillo del cielo artificial	Apertura equivalente del telescopio (m)	Porcentaje de pérdida del valor original
0%	4	0%
5%	3.9036	6.37%
10%	3.8139	12.07%
20%	3.6515	21.82%
50%	3.2660	42.15%
100%	2.8284	60.77%

Tabla 2. Porcentaje de pérdida de valor efectivo de un telescopio de 4 metros de apertura debido al incremento del brillo artificial estimado por el modelo de Crawford (2000).

Cuando la contaminación lumínica reduce el diámetro efectivo del espejo primario un 5% (con valores de incremento del brillo del cielo artificial de aproximadamente un 10% en cielos contaminados según Smith, 1979), las pérdidas económicas son del 15% aproximadamente (Schreuder, 2001). Un telescopio de una apertura relativamente grande puede tener fácilmente costos de más de 100 millones de USD, por lo que la lucha contra la contaminación lumínica podría implicar evitar pérdidas de más de 15 millones de USD por cada telescopio instalado (Schreuder, 2001).

Lunes, 26 de agosto de 2019

En la actualidad, existen múltiples proyectos de observatorios en desarrollo en Chile, pudiendo consultarse en CONICYT la lista completa de los costes de los grandes observatorios (<https://www.conicyt.cl/documentos/Fichasobservatorios.pdf>), siendo de 700 millones de Euros en Paranal, 200 millones de USD en Gemini Sur, 200 millones de Euros en La Silla, 130 millones de USD en Las Campanas, 250 millones de USD en el CTIO, 28 millones de USD en el SOAR, 450 millones de USD en el LSST, 1000 millones de Euros en el E-ELT, y 400 millones de USD en el TAO. En total, el coste de los grandes proyectos de observatorios astronómicos ópticos e infrarrojos es de aproximadamente 3500 millones de USD, por lo que las pérdidas debidas a la contaminación lumínica pudieran ser superiores a los 500 millones de USD.

Actualmente, las observaciones astronómicas se ven seriamente perjudicadas por el incremento en el brillo del cielo nocturno. El Dr. Richard Wainscoat y Elizabeth Alvarez han comparado espectros de los observatorios de Mauna Kea, en la Isla de Hawái, y de Lick, en California, Estados Unidos. En el segundo caso es notorio el efecto adverso de fuentes de luz artificial tales como las lámparas de sodio de alta y baja presión y también las lámparas de mercurio. Estas fuentes contaminan con sus líneas de emisión características, afectando la espectroscopia de objetos tenues, obligando en el Observatorio de Lick a realizar exposiciones hasta 20 veces más largas que en el caso de los telescopios de Mauna Kea. Por otro lado, la obtención de imágenes del cielo de amplio espectro en el observatorio Lick requiere de dos a cuatro veces más tiempo comparando versus el observatorio de Mauna Kea, dependiendo del filtro usado.

Ya en el año 2000, Malcom Smith (director del Cerro Tololo Inter-American Observatory -CTIO- en ese momento) alertaba que los cielos de Chile, un lugar seleccionado mundialmente para la observación astronómica, no se podían considerar exentos de la invasión de la contaminación lumínica y era necesaria una monitorización continuada para alertar de esa situación (McNally and Mitton, 2000).

Investigación Astronómica Afectada por la Contaminación Lumínica

La contaminación lumínica no solo reduce la magnitud límite alcanzable de observación de un telescopio, prohibiendo así la observación de objetos más débiles y, por ende, en general, más lejanos. Además, afecta drásticamente la investigación astronómica porque la distribución espectral del brillo del cielo artificial de forma selectiva a unas longitudes de ondas más que a otras. Este efecto de selectividad espectral implica que determinados fenómenos astrofísicos (y por ende áreas de investigaciones específicas) puedan verse mayormente comprometidas al producirse un empeoramiento de las condiciones contaminantes.

Un caso ejemplar es el representado por el cambio hacia una iluminación con tecnología de LED blanco que, al producir un substancial aumento en el brillo artificial del cielo a longitudes de onda inferiores a 550nm impacta de forma significativa a algunas áreas astrofísicas de fundamental importancia. En el espectro en la banda inferior a los 550nm corresponde a una tercera parte de la entera capacidad observacional de telescopios como el nuevo Gran Telescopio para Rastros Sinópticos (LSST). En termino de los filtros utilizados por el telescopio LSST, el sistema de filtros fotométricos Sloan está compuesto por 6 filtros (con bandas 'u', 'g', 'r', 'i', 'y', y 'z'), de los cuales dos de estos filtros (bandas 'u' y 'g') están en longitudes de onda inferiores a los 550nm.

Por ende, una lista representativa, aunque incompleta, de las investigaciones que se verían afectadas por esta pérdida de señales de "fotones azules naturales" debidas a la contaminación lumínica en la banda inferior a los 550nm, abarca áreas que van desde la búsqueda y caracterización de planetas extra-solares hasta la estructura a gran escala del entero Universo.

Por ejemplo:

- 1) El estudio simultáneo de fenómenos rápidamente variables (*flickering*), resultado de procesos de transferencia de masa, juega en astrofísica un papel importante a lo largo de todas las escalas espaciales, desde la formación de sistemas protoplanetarios, estrellas binarias, hasta cúmulos de galaxias, aportando información valiosa sobre un rango de fenómenos magneto-hidrodinámicos escasamente estudiados. Estos fenómenos son detectables casi exclusivamente en las bandas azules del espectro electromagnético (por ejemplo, la banda u del sistema Sloan).
- 2) El estudio y la caracterización química y dinámica de las estrellas en los cúmulos globulares, permitiendo así afinar los modelos de formación hidrodinámica para algunas de las poblaciones estelares más antiguas del Universo.

Lunes, 26 de agosto de 2019

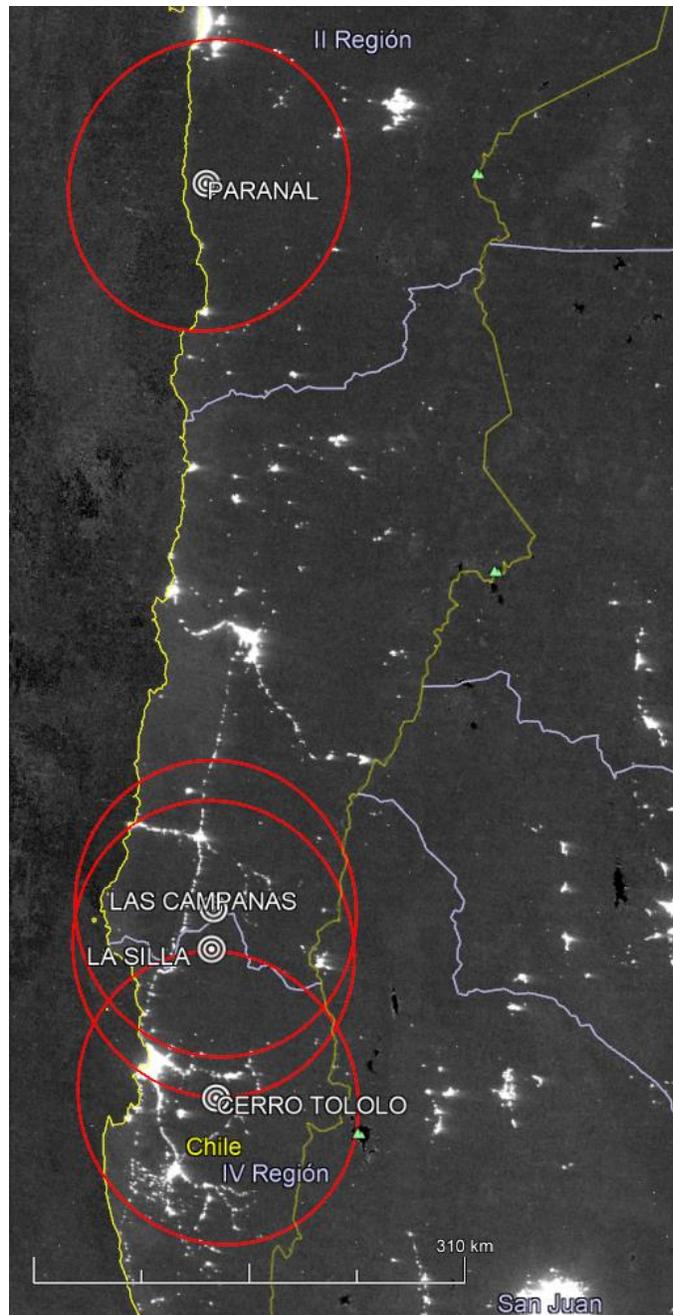
3) El descubrimiento y la caracterización de exoplanetas, es decir, planetas que orbitan alrededor de estrellas distintas al Sol, siendo esta una de las áreas de investigación astronómica más emocionante y de más rápido desarrollo hoy en día. Entre los numerosos exoplanetas que se están descubriendo continuamente, los planetas que eclipsan sus estrellas son especialmente interesantes, ya que la fortuita geometría de la órbita permite la medición de propiedades físicas que generalmente no son accesibles para otros sistemas (e.g., masas y radios planetarios). Una de las posibilidades más emocionantes que permiten los exoplanetas en tránsito es el estudio de sus atmósferas, en donde una vez más las bandas azules pueden ayudar a descifrar su composición química y por lo tanto determinar si existiera una atmósfera capaz de sustentar condiciones favorables al desarrollo de la vida.

4) La forma en que el Sistema Solar ha evolucionado a su estado actual se puede explorar caracterizando tanto la dinámica como la física de los asteroides y cometas que orbitan a varias distancias alrededor del Sol. Las moléculas que emiten en las bandas azules son determinantes para caracterizar la composición y posible evolución química de estos pequeños objetos que representan una reliquia del Sistema Solar primordial, abriendo así el estudio de los mecanismos de formación y evolución tanto de nuestro Sistema Solar como de los sistemas planetarios que pueblan el Universo Local.

Lunes, 26 de agosto de 2019

La Contaminación Lumínica en el Norte de Chile

Imágenes Satelitales del Brillo Artificial Nocturno



Los varios satélites Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) del DoD y el satélite Suomi National Polar Partnership (NPP) de NASA y NOAA disponen de instrumentos calibrados para cuantificar la radiancia cenital nocturna terrestre. Los sensores Operational Linescan System (OLS) de los satélites DMSP y el Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band (DNB) del satélite NPP permiten capturar imágenes con radiancias 10 millones de veces inferiores a las reflejadas por la luz solar durante el día (Miller et al., 2013). El VIIRS DNB tiene una resolución horizontal espacial (HSR) 0.75km x 0.75km muy superior a la resolución del OLS, trabajando en modo pancromático en la banda espectral de 500-900nm (FWHM) (Miller et al., 2013). Hay que notar que ese ancho espectral es muy poco sensible a la contribución en el azul de la contaminación lumínica, y que además captura una parte de radiación de la banda infrarroja.

Figura 5. Mapa de brillo artificial del cielo nocturno del Norte de Chile producto de los datos nocturnos del VIIRS DNB procesados mensualmente para Abril de 2019 (NOAA). En rojo el radio de 100km en torno a los grandes observatorios del Norte de Chile.

Lunes, 26 de agosto de 2019

El Earth Observations Group (EOG) de NOAA/NCEI analiza los datos de las imágenes obtenidas por el VIIRS DNB y provee un producto compuesto de radiancia promedio utilizando los datos nocturnos filtrados para excluir los datos con luz directa, rayos, iluminación lunar, y cubiertos por nubosidad (Baugh et al., 2013).

En la Figura 5 puede observarse el mapa de radiancia lumínica cenital artificial del Norte de Chile obtenido del producto promedio del EOG para el mes de Abril de 2019. En esa imagen puede observarse que las fuentes de contaminación lumínica más importantes de la zona son principalmente las zonas urbanas con mayor número de habitantes (las ciudades de La Serena, Coquimbo, Antofagasta, y Copiapó). Una gran contribución es también debida a las luminarias en carreteras y autopistas. Además, pueden observarse múltiples focos relacionados con las faenas de minería en la zona.

Evolución Temporal de la Contaminación Lumínica

Mediante las mediciones de radiancia cenital obtenidas por el sensor VIIRS DNB del satélite Suomi NPP es posible cuantificar la evolución inter-anual de emisión lumínica.

En la Figura 6 puede verse el incremento de radiancia promedio proveniente de la zona que cubre las ciudades de La Serena-Coquimbo entre 2012 y 2019 calculado utilizando dicha aplicación online.

La Figura 6 muestra que entre 2012 y 2016 se obtuvo un valor de radiancia promedio de $2.05nW/cm^2sr$. Esa radiancia se vio incrementada un 25% a principios de 2017, obteniendo un valor promedio de $2.56nW/cm^2sr$ entre 2017 y 2019. En la Figura 7 pueden verse las imágenes de radiancia promedio de los meses de Enero de 2016 y Junio de 2019. En esas imágenes puede verse un aumento de la radiancia debido a la incorporación de luminarias en carreteras y autopistas, pero también un crecimiento de la radiancia total de la zona que pudiera relacionarse con el crecimiento poblacional.

Los datos mostrados en las Figuras 6 y 7 demuestran el crecimiento de la contaminación lumínica en la Región de Coquimbo a lo largo del tiempo. El incremento anual medido de la radiancia promedio ha sido de 4.47%, y está en concordancia con el incremento de emisión lumínico global del 3-6% anual (Schroer and Hölker, 2017).

Lunes, 26 de agosto de 2019

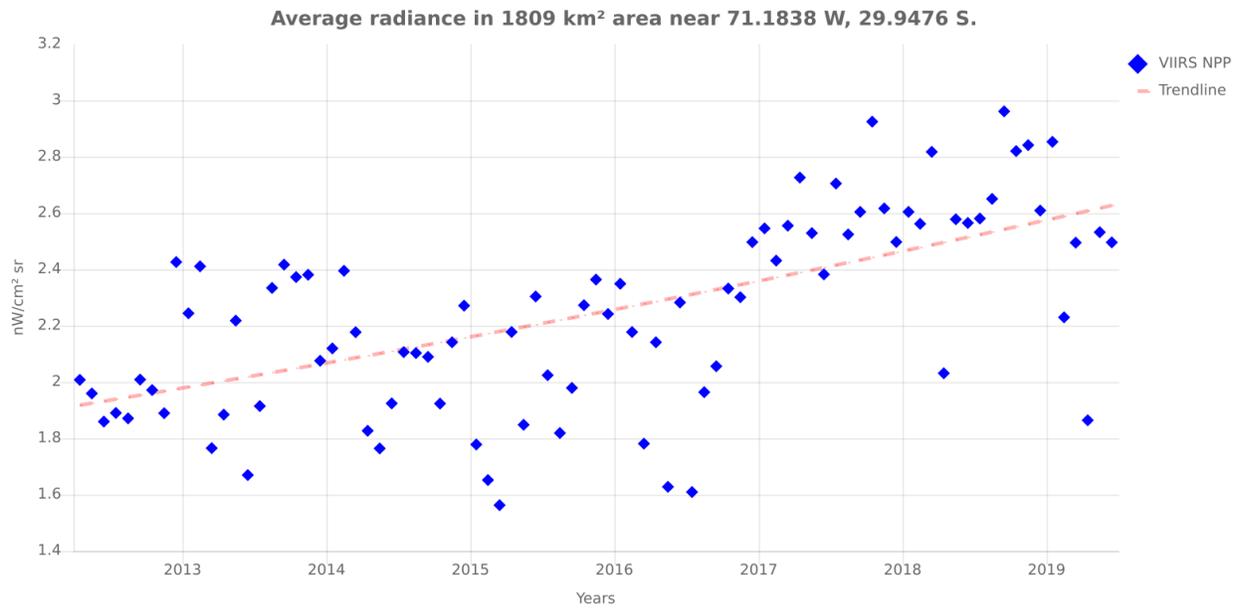


Figura 6. Variación mensual de la radiancia promedio en la zona de Coquimbo y La Serena desde 2012.

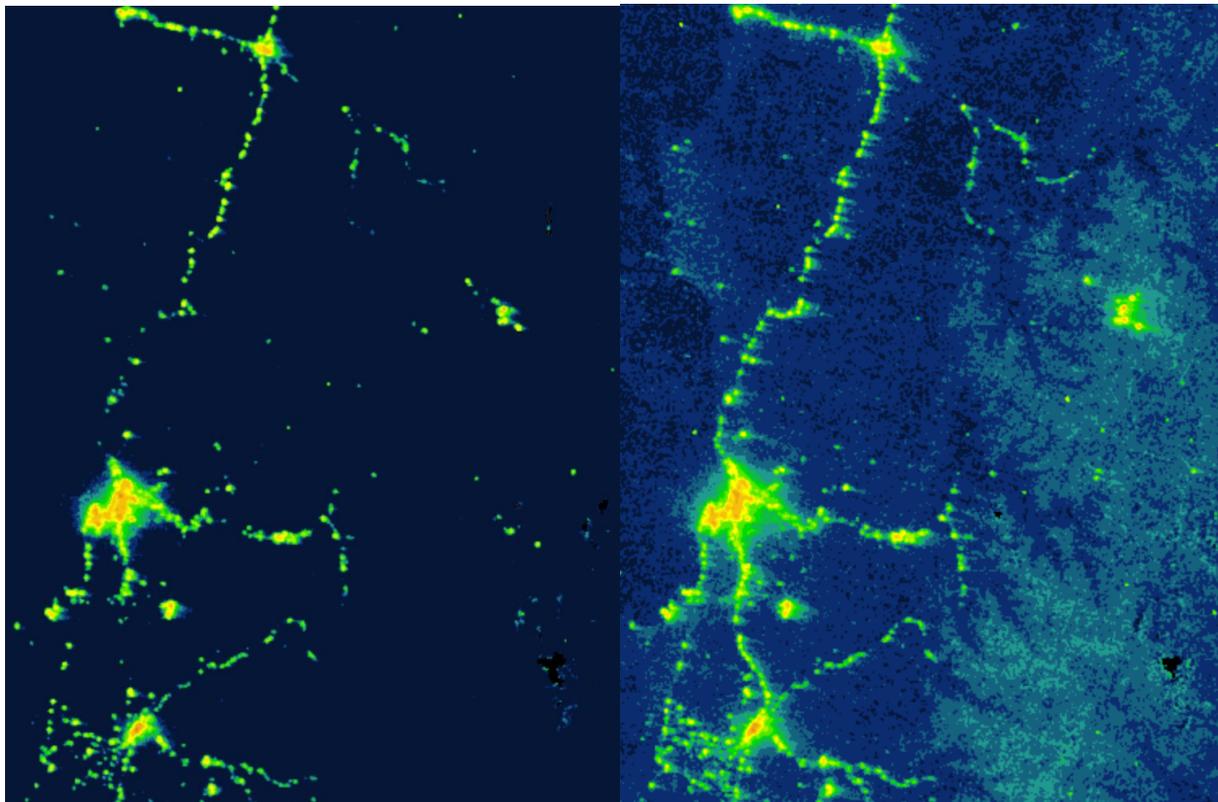
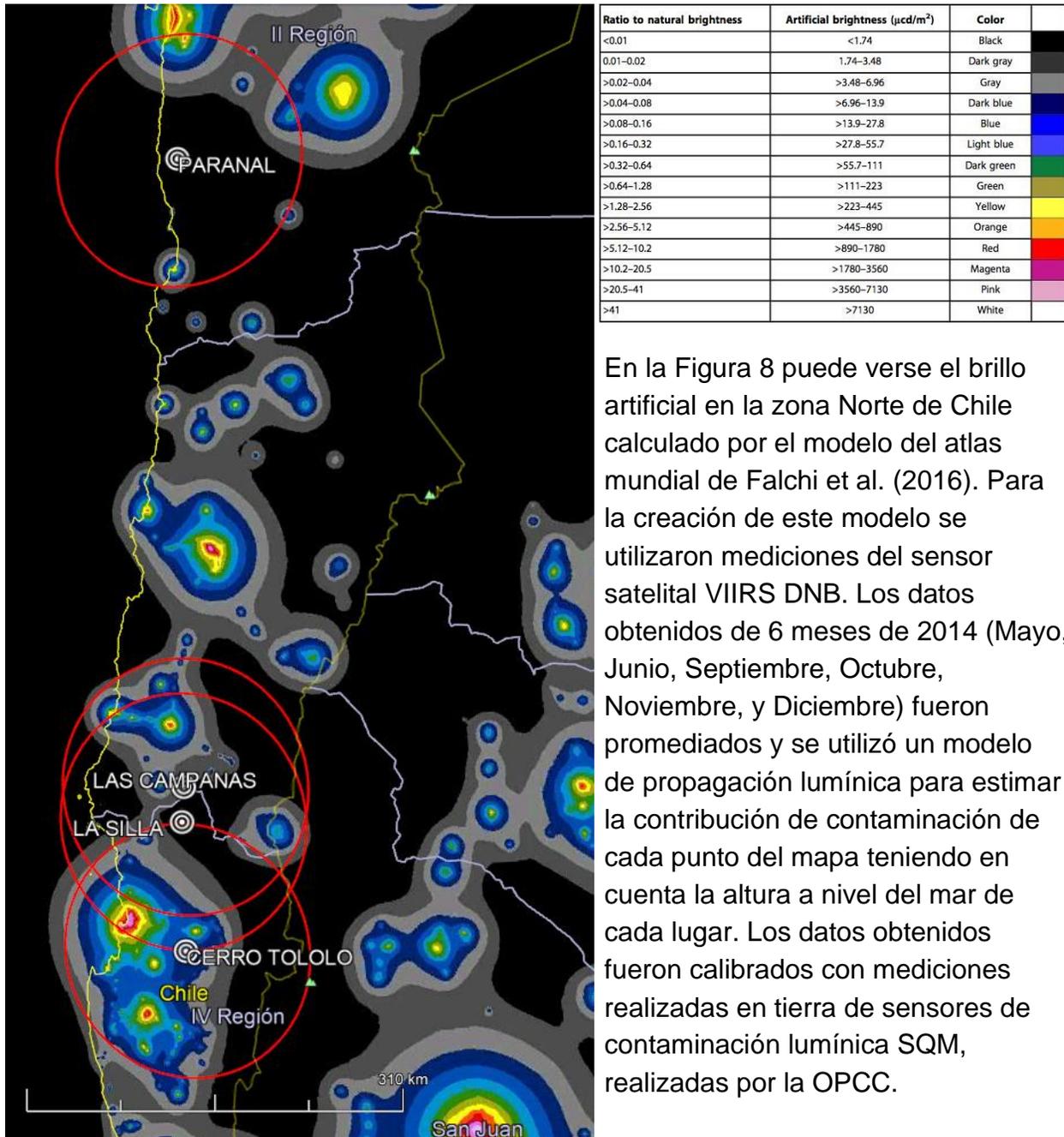


Figura 7. Radiancia Mensual promedio obtenida por el sensor VIIRS NPP de la Región de Coquimbo en los meses de (izquierda) Enero de 2016 y (derecha) Junio de 2019.

Determinación de Zonas Contaminadas Lumínicamente

Actualmente es posible estimar los niveles de contaminación aproximados en una región de interés mediante el uso de los atlas mundiales de contaminación lumínica (Cinzano et al., 2001; Falchi et al., 2016).



En la Figura 8 puede verse el brillo artificial en la zona Norte de Chile calculado por el modelo del atlas mundial de Falchi et al. (2016). Para la creación de este modelo se utilizaron mediciones del sensor satelital VIIRS DNB. Los datos obtenidos de 6 meses de 2014 (Mayo, Junio, Septiembre, Octubre, Noviembre, y Diciembre) fueron promediados y se utilizó un modelo de propagación lumínica para estimar la contribución de contaminación de cada punto del mapa teniendo en cuenta la altura a nivel del mar de cada lugar. Los datos obtenidos fueron calibrados con mediciones realizadas en tierra de sensores de contaminación lumínica SQM, realizadas por la OPCC.

Figura 8. Modelo de Brillo Artificial del Cielo Nocturno del Norte de Chile (Falchi et al., 2016)

Lunes, 26 de agosto de 2019

Las zonas en color azul de la Figura 8 cuentan con un incremento 8-16% del brillo natural (asumiendo un fondo natural de 22 mag/arcsec^2 o $174 \mu\text{cd/m}^2$), por lo que se pueden considerar zonas contaminadas lumínicamente (Falchi et al., 2016), ya que superan los valores de la Recomendación 1 de la Comisión 50 de la IAU (Smith, 1979).

Es de especial importancia resaltar que, tanto el observatorio astronómico Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO), situado en el Cerro Tololo como los emplazados en el Cerro Pachón, se encuentran en el mapa de la Figura 8 en una zona contaminada lumínicamente, principalmente debido a las contribuciones lumínicas de las zonas urbanas de Coquimbo y La Serena.

Por otro lado, en el mapa de la Figura 8 los observatorios de La Silla y de Las Campanas se encuentra en una zona no contaminada lumínicamente, aunque se encuentran cercanos a diversos focos de contaminación que podrían afectar las observaciones en el futuro cercano. El incremento poblacional de la región podría aumentar los niveles de contaminación lumínica hasta afectar la operación de los observatorios astronómicos.

Recientemente, un estudio realizado en colaboración con la OPCC (Falchi et al., 2019) ha evaluado la contaminación lumínica del área urbana de Coquimbo y La Serena en los observatorios mediante el software que se utilizó para calcular el Nuevo Atlas Mundial de Contaminación Lumínica (Falchi et al., 2016). Utilizando ese modelo se han obtenido incrementos de brillo artificial del cielo en Cerro Tololo del 6.0%, en Cerro Pachón del 4.2%, en La Silla del 0.8%, y en Las Campanas del 1.1%.

De todos modos, hay que considerar que el modelo de Falchi et al. (2016) que se ha utilizado para representar la Figura 8 utiliza datos del VIIRS NBD obtenidos durante 2014, y en la actualidad los valores obtenidos por ese sensor de la radiancia cenital de la zona de Coquimbo y La Serena han aumentado en algunas zonas hasta un 25%, como se indicó anteriormente. En resumen, se puede concluir que el observatorio astronómico internacional CTIO se encuentra actualmente en una zona con una elevada probabilidad de tener contaminación lumínica.

Mediciones de Contaminación Lumínica en Observatorios

Para cuantificar en detalle los efectos de la contaminación lumínica en los observatorios astronómicos del Norte de Chile, la OPCC ha realizado diversas mediciones del brillo del cielo con una Sky Quality Camera (SQC) (Jechow et al., 2019). Este instrumento es una cámara digital DSLR con una lente de gran angular o de ojo de pez que permite capturar imágenes con cobertura de todo el cielo (all-sky). La principal característica de este instrumento es que la sensibilidad de la cámara permite hacer fotometría de la imagen, siendo calibrada para cuantificar la luminancia de todo el hemisferio superior en unidades de magnitudes astronómicas visuales por arco-segundo al cuadrado (Hänel et al., 2018; Jechow et al., 2019). Las imágenes son procesadas mediante el Sky Quality Camera software (Jechow et al., 2019) que permite determinar la orientación de la imagen mediante el alineamiento estelar y extraer la componente lumínica de las estrellas brillantes y la Vía Láctea para poder cuantificar correctamente la contaminación lumínica de todo el cielo.

Las Figuras 9, 10 y 11 muestran las mediciones realizadas por la OPCC con la SQC en el Observatorio de Cerro Tololo el 12 de Octubre de 2018, en el Observatorio de La Silla el 23 de Mayo de 2019, y en el Cerro Pachón el 26 de Agosto de 2019. Las imágenes muestran el producto procesado de brillo del cielo, una vez se ha sustraído la contribución natural de las estrellas más brillantes y de la Vía Láctea. En la parte inferior de esas figuras se representa la orientación de la imagen, donde además pueden verse las distintas fuentes lumínicas y su distancia relativa al punto de observación, mientras que el eje superior representa la elevación. La escala de color falsa de estas imágenes corresponde con la escala de color de las clases de Bortle representada en la Figura 1.

En las Figuras 9, 10 y 11 puede verse que la mayor fuente de contaminación lumínica proviene de La Serena-Coquimbo, estando más afectado el Cerro Tololo que La Silla, dada su mayor cercanía. Por otro lado, existen otras fuentes que generan una contribución mucho más difusa que tienen su origen en zonas urbanas cercanas, carreteras, y faenas de minería cercanas. En estas figuras puede verse que, para casi todas las orientaciones de la imagen, la observación en elevaciones entre los 40° y 20° se ve afectada por la contaminación lumínica, teniendo valores de Clase Bortle 3 (incremento del brillo artificial entre 11-33% del brillo natural).

En el caso de la medición del Observatorio de La Silla (Figura 9), el brillo del cielo obtenido a 45° de elevación en la orientación de la máxima contaminación es de $21.84 \text{ mag/arcsec}^2$, mientras que en el Observatorio del Cerro Tololo (Figura 10), el valor es de aproximadamente $21.74 \text{ mag/arcsec}^2$, y en el Cerro Pachón (Figura 11) el

Lunes, 26 de agosto de 2019

valor medido es de aproximadamente $21.55 \text{ mag/arcsec}^2$. En estos tres casos, el valor del incremento de la contaminación lumínica a 45° de elevación es inferior al 10% de la contribución natural, por lo que no puede considerarse un cielo contaminado según la Recomendación 1 de la Comisión 50 de la IAU (Smith, 1979). De todos modos, los valores obtenidos son muy cercanos a dicho valor límite, principalmente en Cerro Pachón y Cerro Tololo, indicando que muy probablemente la observación en los telescopios se verá afectada en un corto periodo de tiempo debido al incremento de la contaminación lumínica. En el caso de Cerro Tololo la mayor contribución lumínica proviene de La Serena y Coquimbo, que se encuentra a una distancia de 51km aproximadamente, aunque en Cerro Pachón además hay que considerar una mayor cercanía de la ciudad de Ovalle, que se encuentra a 56km de distancia aproximadamente. Respecto de Cerro Tololo, esta ciudad se encuentra a 60km.

Como un ejemplo de contaminación extremo, el 4 de Agosto de 2019 la OPCC realizó mediciones de la intensidad de la contaminación lumínica en el Observatorio del Cerro Mayu (www.cerromayu.cl), situado a 25km de la ciudad de La Serena y a 27km del CTIO, que se muestran en la Figura 12. El Observatorio del Cerro Mayu pertenece a un centro cultural y educacional que pretende homenajear el patrimonio de los cielos de nuestras culturas precolombinas (Mayu en lengua Inca quiere decir "Vía Láctea"), siendo además el primer observatorio astro-turístico instalado al alero de un colegio.

Las mediciones realizadas en el Observatorio del Cerro Mayu (Figura 12) demuestran claramente un cielo contaminado en la dirección noroeste, siendo la contribución de contaminación lumínica de La Serena y Coquimbo extremadamente importante. En este caso, el brillo del cielo obtenido a 45° de elevación en la orientación de la máxima contaminación es de $21.19 \text{ mag/arcsec}^2$. Ese valor se corresponde a una Clase 4 en la Escala de Bortle, teniendo un brillo artificial del cielo de más de un 33% del brillo natural en esa orientación (Figura 1), y viéndose el cielo claramente contaminado. El caso de estudio del Cerro Mayu es un claro ejemplo del efecto que la contaminación lumínica tiene en entidades dedicadas al astro-turismo, reduciendo la observación astronómica y afectando de ese modo al negocio de la zona.

Cabe hacer notar que estas mediciones son más bien puntuales, siendo recomendable realizar campañas más extensas. No obstante ello, de todas formas dan cuenta con notable precisión del estado del cielo nocturno en el entorno de los observatorios analizados.

Lunes, 26 de agosto de 2019

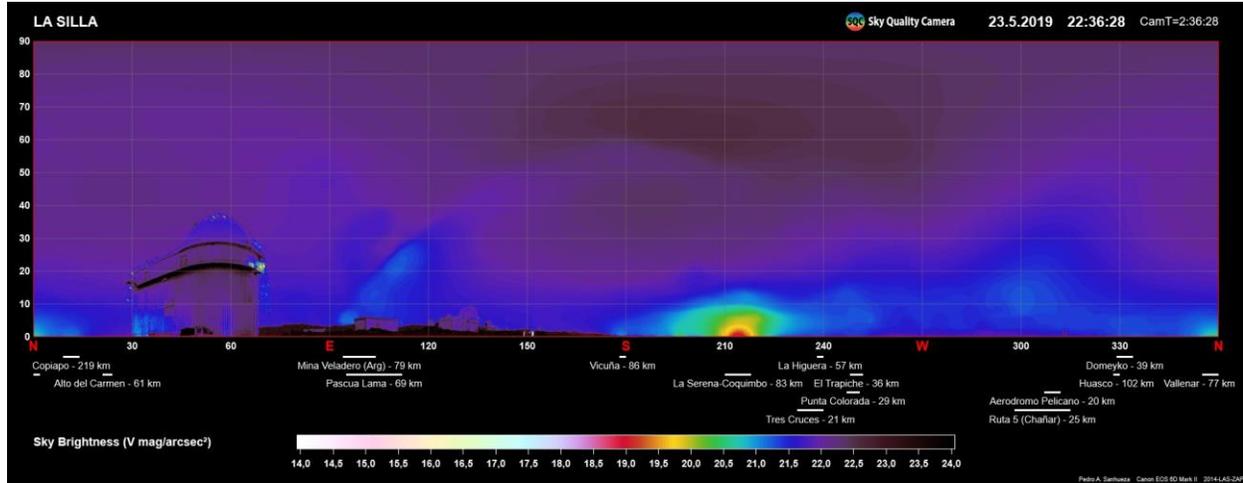


Figura 9. Mediciones de brillo del cielo realizadas con SQC en La Silla.

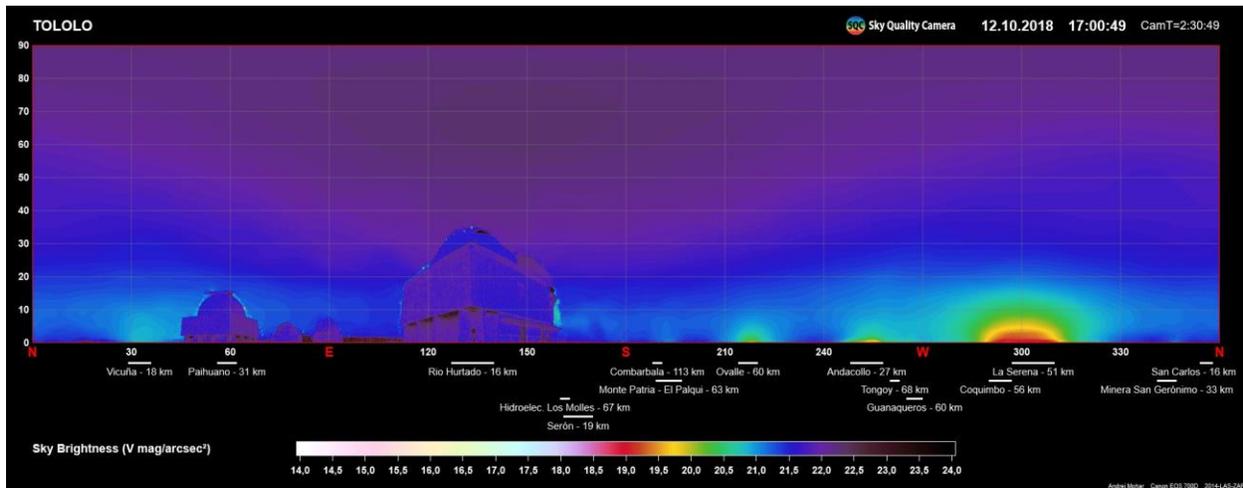


Figura 10. Mediciones de brillo del cielo realizadas con SQC en Cerro Tololo.

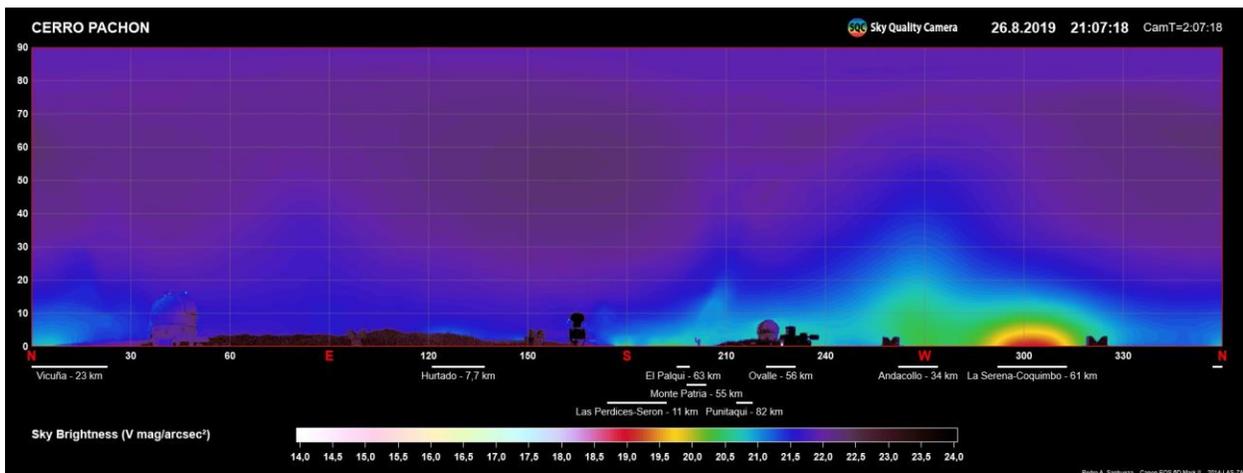


Figura 11. Mediciones de brillo del cielo realizadas con SQC en Cerro Pachón.

Lunes, 26 de agosto de 2019

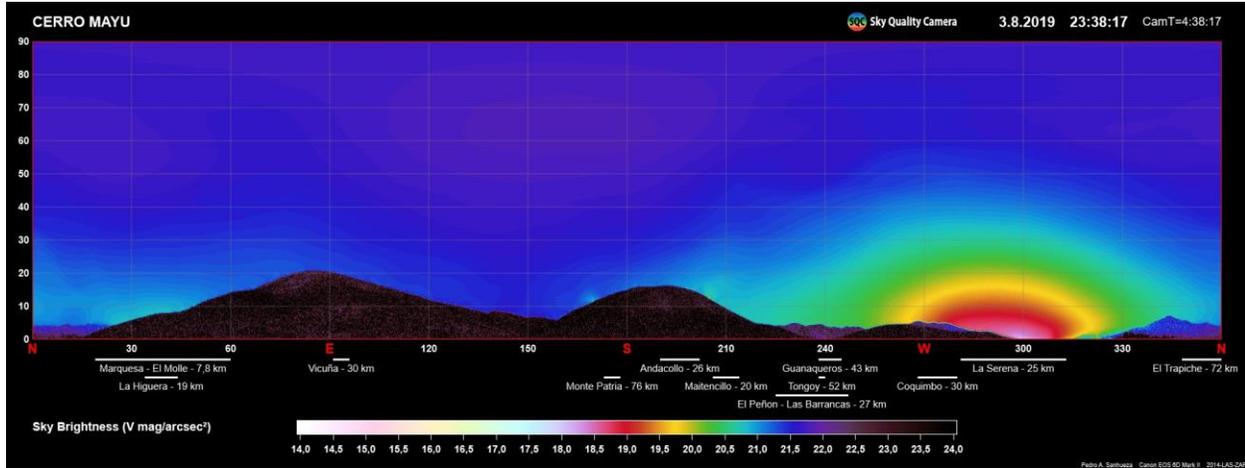


Figura 12. Mediciones de brillo del cielo realizadas con SQC en Cerro Mayu.

Incremento Futuro de la Contaminación Lumínica

En 1977, Merle Walker, de la Universidad de California, desarrolló un modelo general para estimar el incremento del brillo del cielo de una ciudad dado su número de habitantes (Crawford, 2000; Mizon, 2002; Narisadam & Schreuder, 2004; Luginbuhl et al., 2009). El modelo de Walker es una buena aproximación para contabilizar el incremento de la contaminación lumínica de una ciudad dado su crecimiento poblacional, cuando no se consideran medidas de mitigación.

El modelo de Walker (mostrado en la Figura 13) obtiene el incremento en el brillo artificial (*sky glow increase*, ΔI) en un ángulo vertical de 45° en la dirección hacia la ciudad como una relación $\Delta I(\%) = Pr^{-2.5}$, donde P es la población de la ciudad y r es la distancia de la ciudad en km.

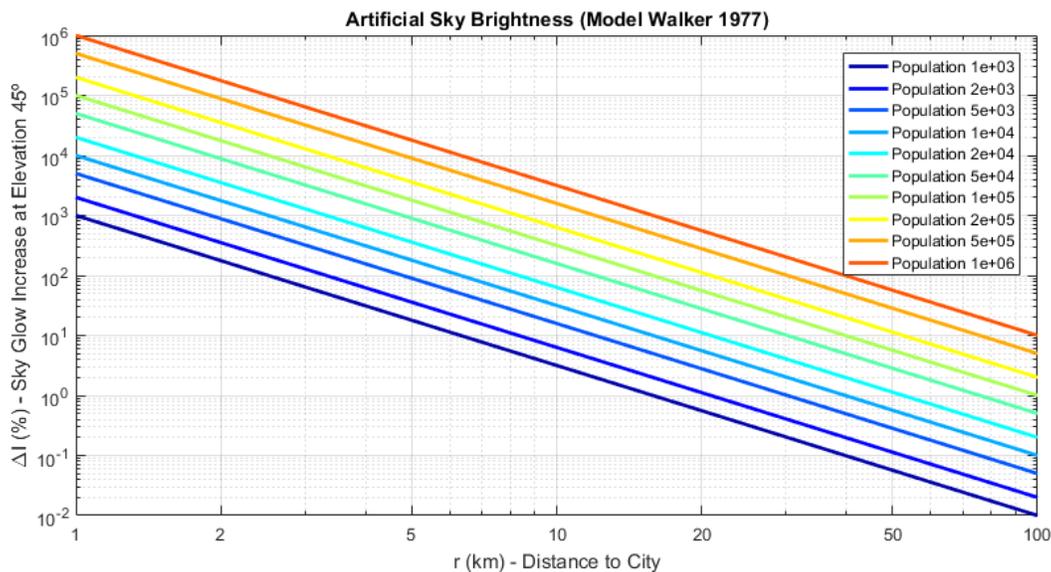


Figura 13. Incremento del brillo artificial (en porcentaje) según el modelo de Walker 1977.

Con ese modelo general se puede estimar que una ciudad de 1 millón de habitantes a una distancia de 100 km generará un brillo del cielo artificial (*artificial sky brightness*) del 10% (el límite para considerar un lugar contaminado lumínicamente según Recomendación 1 de la Comisión 50 de la IAU de Smith, 1979). En esta relación puede verse que el efecto de la distancia en la contaminación lumínica es de extrema relevancia, haciendo que una ciudad situada a la mitad de la distancia tenga un efecto seis veces mayor, y una ciudad situada a una décima parte de la distancia tenga un efecto 316 veces mayor (Crawford, 2000).

Lunes, 26 de agosto de 2019

En la actualidad, la población de la región de Coquimbo tiene un total de 757.586 habitantes (censo INE 2017), de los que el 59% (448.784) se concentran en las ciudades de La Serena y Coquimbo. Hay que notar que el modelo de Walker no considera la adición de múltiples fuentes de contaminación en la misma orientación, por lo que la contribución de las ciudades de La Serena y Coquimbo debe considerarse como un único foco lumínico. Utilizando la fórmula de Walker aproximada, y considerando que el Observatorio del Cerro Tololo está a 51km de distancia de Coquimbo-La Serena, se debería recibir un incremento del brillo del cielo del 24.16%, indicando que sus cielos estarían claramente contaminados lumínicamente. Además, como se ha visto, la contribución de ciudades cercanas a los observatorios con poblaciones pequeñas puede ser mucho mayor que la de las grandes ciudades a grandes distancias. En particular, la ciudad de Vicuña se encuentra a 18km de distancia del Observatorio del Cerro Tololo y una población de 49.049 habitantes, obteniendo un incremento teórico del brillo artificial sobre el natural de 35.68%. Ese valor implica un cielo altamente contaminado, afectando directamente la observación astronómica, y obteniendo un cielo de Clase 5 de Bortle.

Hay que notar que, en los casos estudiados de contribuciones lumínicas de La Serena y Coquimbo y de Vicuña en el Observatorio de Cerro Tololo, los datos del incremento del brillo artificial obtenidos con el modelo general de Walker son superiores a los datos medidos por la SQC (mostrados en la Figura 10). Eso indica que el modelo de Walker sobreestima la contaminación de esos dos casos. Posiblemente, esa diferencia sea debida a las medidas de mitigación impuestas en las normativas de protección del cielo nocturno y a que el modelo de Walker no tiene en cuenta las distintas altitudes de las fuentes lumínicas ni distintos tipos de tecnologías de iluminación. Es notable recalcar que el modelo de Walker es únicamente una aproximación basada en casos de estudio previos. De todos modos, estos datos indican que, aunque aún no se ha llegado a los valores indicados en la Recomendación 1 de la Comisión 50 de la IAU (Smith, 1979), existe una gran probabilidad de obtener niveles de contaminación lumínica que pueden afectar la observación astronómica (como se ha visto en el apartado anterior).

Por otro lado, el Observatorio de La Silla está a 83km de distancia, y los datos del modelo de Walker obtienen únicamente un incremento de 7.15% de brillo del cielo, y por lo tanto no estando aún contaminado, pero se encontraría muy cercano a estarlo. Cuando la población de Coquimbo y La Serena sea de 650.000 habitantes (aprox. en 2055), el Observatorio de La Silla tendría niveles de brillo superior al 10% del natural.

Para evaluar el efecto de la contaminación lumínica en el futuro, se ha considerado el efecto provocado por el incremento poblacional de las distintas ciudades alrededor de los observatorios. Para modelar la evolución de la población de las distintas ciudades,

Lunes, 26 de agosto de 2019

se ha considerado el incremento poblacional de Chile indicado por el INE en 2017 (www.censo2017.cl) durante el periodo entre 1992 y 2030.

Para simplificar los cálculos, se ha utilizado un modelo lineal de crecimiento de toda la población chilena (Figura 14) y se ha considerado un crecimiento homogéneo en todas las poblaciones del país. Por lo tanto, la población de una ciudad a lo largo del tiempo se ha modelado con la siguiente regla $P_{(year=x)} = P_{(year=2017)}(0.1873x - 359.3)/18.4192$, siendo P la población de una ciudad en millones de habitantes.

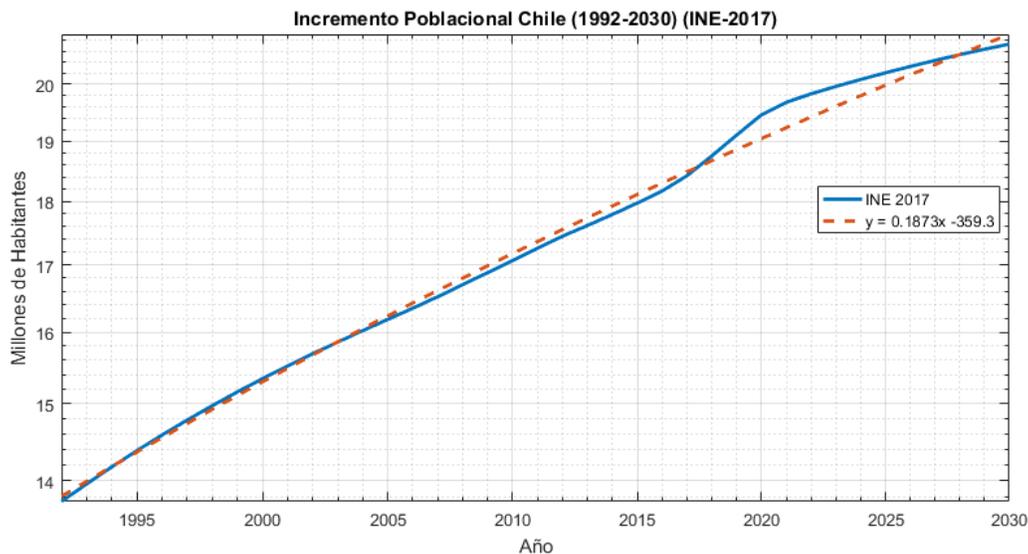


Figura 14. Incremento poblacional de Chile según INE 2017 y modelo lineal aproximado.

En la Tabla 3 se muestra el escenario futuro de incremento del brillo del cielo artificial respecto al natural debido a las poblaciones cercanas. En esa tabla puede verse la distancia a los observatorios y el valor estimado por el modelo Walker del incremento del brillo artificial respecto al natural ($\Delta I(\%)$) en los años 2030 y 2040. Los resultados mostrados en la Tabla 3 demuestran el escenario a futuro sin medidas de mitigación en los observatorios astronómicos más importantes de Chile.

Lunes, 26 de agosto de 2019

Distancia (km) / $\Delta I(\%)_{2030}$ - $\Delta I(\%)_{2040}$	La Serena - Coquimbo (448.784 p)	Vicuña (49.049 p)	Andacollo (11.044 p)	Ovalle (111.272 p)	Huasco (10.149 p)	Vallenar (51.917 p)
Cerro Tololo	51km/ 27.4-29.89%	18km/ 40.5-44.15%	27km/ 3.31-3.61%	60km/ 4.53-4.94%	193km/ 0.02-0.03%	177km/ 0.14-0.16%
Cerro Pachón	62km/ 16.8-18.3%	22km/ 24.5-26.7%	34km/ 1.86-2.03%	59km/ 4.73-5.15%	184km/ 0.02-0.03%	203km/ 0.10-0.11%
La Silla	83km/ 8.12-8.84%	85km/ 0.83-0.91%	114km/ 0.09-0.1%	153km/ 0.44-0.48%	100km/ 0.11-0.13%	77km/ 1.17-1.28%
Las Campanas	112km/ 3.84-4.18%	112km/ 0.42-0.16%	141km/ 0.05-0.06%	195km/ 0.24-0.26%	80km/ 0.2-0.22%	49km/ 3.51-3.82%

Distancia (km) / $\Delta I(\%)_{2030}$ - $\Delta I(\%)_{2040}$	Antofagasta (361.873 p)	Taltal (13.317 p)
Cerro Paranal	110km/ 3.24-3.53%	87km/ 0.21-0.23%
Cerro Armazones	105km/ 3.64-3.96%	94km/ 0.18-0.19%

Tabla 3. Estimación del incremento de brillo del cielo artificial respecto al natural para los años 2030 y 2040 generado por distintas ciudades cercanas a los observatorios.

Los valores de la Tabla 3 claramente alertan que la contaminación lumínica afectaría seriamente la operación de los telescopios del Observatorio del Cerro Tololo y Cerro Pachón si no se aplican medidas de mitigación. En el caso del Observatorio de La Silla, la contribución lumínica de las ciudades de La Serena y Coquimbo se estima que llegue en un periodo inferior a los 30 años a los niveles de contaminación indicados por la Recomendación 1 de la Comisión 50 de la IAU (Smith, 1979).

Se sugiere revisar los valores de estimación futura de contaminación lumínica obtenidos mediante el modelo de Walker utilizando otros modelos que consideren distintos tipos de tecnologías de iluminación, la dispersión espacial de las ciudades, los efectos atmosféricos, y las distintas altitudes de las fuentes y de los observatorios.

Medidas Para Reducir la Contaminación Lumínica Radio de Protección Sobre los Observatorios Astronómicos

La contaminación puede propagarse a distancias superiores a los 100km de la fuente lumínica (Murdin, 2001). Los modelos y las mediciones realizadas mostrados en el apartado anterior indican que ciudades muy alejadas de los observatorios generan contaminación lumínica que puede llegar a afectar las observaciones astronómicas, aunque actualmente los niveles de contaminación no llegan al nivel indicado en la Recomendación 1 de la Comisión 50 de la IAU (Smith, 1979). En el caso de las mediciones de la Figura 9 realizadas en el Observatorio de La Silla, pueden verse claramente las contribuciones lumínicas de La Serena y Coquimbo y de Vallenar, situados a distancias de 83km y 77km, respectivamente.

Para reducir las interferencias sobre las observaciones astronómicas, la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) ha elaborado diversas recomendaciones. El trabajo del informe CIE 126 (1997) “Directrices para la Minimización del Brillo del Cielo” se ha basado en dos conceptos clave: la zonificación y el establecimiento de un horario de “toque de queda” (*curfew*) (Schreuder, 2001; Narisadam & Schreuder, 2004).

La zonificación es una práctica comúnmente establecida en base a regulaciones medioambientales para describir y limitar distintos tipos de contaminación (ruido, vibración, contaminación de aire y agua, etc.) (Schreuder, 2001; Narisadam & Schreuder, 2004). Esta medida considera que, cuando no es posible evitar enteramente la contaminación, las consecuencias medioambientales no afectan de igual modo en todas partes (CIE 126, 1997). En dichas zonas se establecen límites de iluminación en función de los requerimientos de la zona. Por otro lado, la idea de establecer un horario de emisión lumínica está relacionada con que los requisitos de iluminación son mucho más importantes en altas horas de la noche que al anochecer.

Las zonas medioambientales indicadas en el sistema de división del CIE 126 (1997) se describen en la Tabla 4, siendo la zona E1 una zona “dedicada a las actividades astronómicas de los observatorios de categoría nacional e internacional”. En la Tabla 5 se dan las recomendaciones de distancias mínimas entre el borde de una zona y un punto de referencia, aunque estas distancias permiten obtener un brillo del cielo “aceptable” (CIE 126, 1997). Como puede verse, se recomienda situar las zonas E3-E4 a una distancia de 100km de una zona E1. En ese informe se recomienda duplicar las distancias de la Tabla 5 para “asegurar unas condiciones de observación favorables”.

Lunes, 26 de agosto de 2019

ZONA	Descripción
E1	Áreas con paisajes intrínsecamente oscuros: Parques Nacionales, Áreas de notable belleza natural (donde las carreteras, habitualmente, están sin iluminar)
E2	Áreas de “distrito de baja luminosidad”: generalmente fuera de las áreas residenciales urbanas y rurales (donde las carreteras están iluminadas según las normas para carreteras residenciales)
E3	Áreas de “distrito de luminosidad media”: generalmente áreas residenciales urbanas (donde las carreteras están iluminadas según las normas para calzadas con mucho tráfico)
E4	Áreas de “distrito de alta luminosidad”: generalmente áreas urbanas que incluyen zonas residenciales y para usos comerciales con una alta actividad durante la franja horaria nocturna.

Tabla 4. Descripción de las zonas medioambientales de la CIE 126 (1997)

Distancia (km)	E1-E2	E2-E3	E3-E4
E1	1	10	100
E2	SIN LIMITES	1	10
E3	SIN LIMITES	SIN LIMITES	1
E4	SIN LIMITES	SIN LIMITES	SIN LIMITES

Tabla 5. Distancia mínima (en km) entre los bordes de una zona y un punto de referencia (CIE 126, 1997)

Recientemente, en el nuevo informe CIE 150 (2017) “Guía sobre la limitación de los efectos de la luz perturbadora de las instalaciones de iluminación exterior” y en la recomendación GN01 de la Institution of Lighting Professionals (ILP 2011) se considera una zonificación adicional específica E0 para los grandes observatorios ópticos y reservas de cielo oscuro (Tabla 6). En particular, en el informe CIE 150 (2017) se indica: “Independientemente del nivel de desarrollo urbano, las recomendaciones indicadas para las zonas E0 o E1 deberían ser implementadas en todos los lugares que se encuentren al interior de un radio de 100km de un gran observatorio astronómico óptico. Independientemente del nivel de desarrollo urbano, las recomendaciones indicadas para las zonas E2 (o mayor) deberían ser implementadas en todos los lugares que se encuentren al interior de un radio de 30km de un observatorio astronómico óptico urbano en operación, y en todos los lugares entre 100km y 300km de un gran observatorio astronómico óptico”.

Lunes, 26 de agosto de 2019

ZONA	Descripción	Ejemplos
E0	Áreas con paisajes intrínsecamente oscuros	Reservas Starlight UNESCO, Parques Dark Sky IDA, grandes observatorios ópticos
E1	Áreas oscuras	Áreas rurales relativamente inhabitadas
E2	Áreas de “distrito de baja luminosidad”	Áreas rurales parcialmente habitadas
E3	Áreas de “distrito de luminosidad media”	Áreas rurales bien habitadas y asentamientos urbanos
E4	Áreas de “distrito de alta luminosidad”	Centros de pueblos y ciudades y otras zonas comerciales

Tabla 6. Descripción de las zonas medioambientales de CIE 150 (2017) y ILP GN01 (2011)

Por lo tanto, siguiendo las recomendaciones internacionales para minimizar el brillo artificial del cielo, se recomienda establecer una zonificación en torno a los grandes observatorios del país que cubra las zonas que se encuentren al interior de un radio de 100km (como mínimo). En dichas zonas se requiere establecer límites de iluminación particulares para no afectar la observación astronómica.

Es importante notar que, en el informe CIE 126 (1997) se recomienda que, para obtener condiciones óptimas de observación, la distancia de la zona de protección debiera ser de 200km. Por su parte, en el informe CIE 150 (2017) se indica que, aunque deba existir una zona específica de 100km de radio alrededor de los grandes observatorios, todas las zonas habitadas rurales y urbanas en el radio de 300km debieran seguir las recomendaciones para áreas de “distrito de baja luminosidad” (E2). Ambas recomendaciones del CIE indican que el radio de protección de 100km alrededor de los grandes observatorios que propone la OPCC es una solicitud de mínimos (es la mínima distancia de protección que debería solicitarse), pudiendo considerarse extender esa distancia de protección en el futuro.

Finalmente, hay que considerar que el impacto de la contaminación lumínica depende tanto de la intensidad de la fuente lumínica como su distancia al observatorio. Por ejemplo, una ciudad con 20.000 habitantes a 20km de distancia del observatorio tiene efectos similares a una ciudad con un millón de habitantes a 100km de distancia, teniendo ambas ciudades las mismas limitaciones lumínicas (CIE 150, 2017). Ese efecto puede verificarse en los resultados del modelo de Walker que se muestran en la Figura 13.

Reducción de Emisiones en Bajas Longitudes de Onda

Tal y como se indica en la recomendación CIE 150 (2017) “Guía sobre la limitación de los efectos de la luz perturbadora de las instalaciones de iluminación exterior”, el brillo artificial del cielo es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda de la luz emitida, por lo que siempre es de preferencia el uso de luces rojas o cálidas frente a las luces azules o frías.

El problema del brillo artificial del cielo (sky glow) en la observación astronómica puede mitigarse utilizando iluminación de lámparas de vapor de sodio de baja presión (SBP o LPS por sus siglas en inglés) (o diodos emisores de luz -LEDs- con una emisión espectral similar) en las luces exteriores situadas alrededor al observatorio, incluyendo las luminarias de las carreteras (CIE 150, 2017). Las lámparas SBP son preferidas en entornos cercanos a los observatorios porque emiten luz en líneas espectrales muy estrechas, principalmente en una banda estrecha de 589nm (Figura 15), interfiriendo muy poco con la observación astronómica (Luginbuhl, 2001). En distancias mucho más alejadas del observatorio, los requerimientos de iluminación son menos restrictivos, pudiendo utilizarse fuentes de iluminación con emisiones limitadas en la banda de 550nm como las de lámparas de vapor de sodio de alta presión (SAP o HPS por sus siglas en inglés) (CIE 150, 2017). Las lámparas SAP son la segunda mejor opción para los telescopios ya que emiten en una porción amarilla más ancha del espectro, aunque tienen otros componentes espectrales de baja intensidad en el rojo y azul (Luginbuhl et al., 2009).

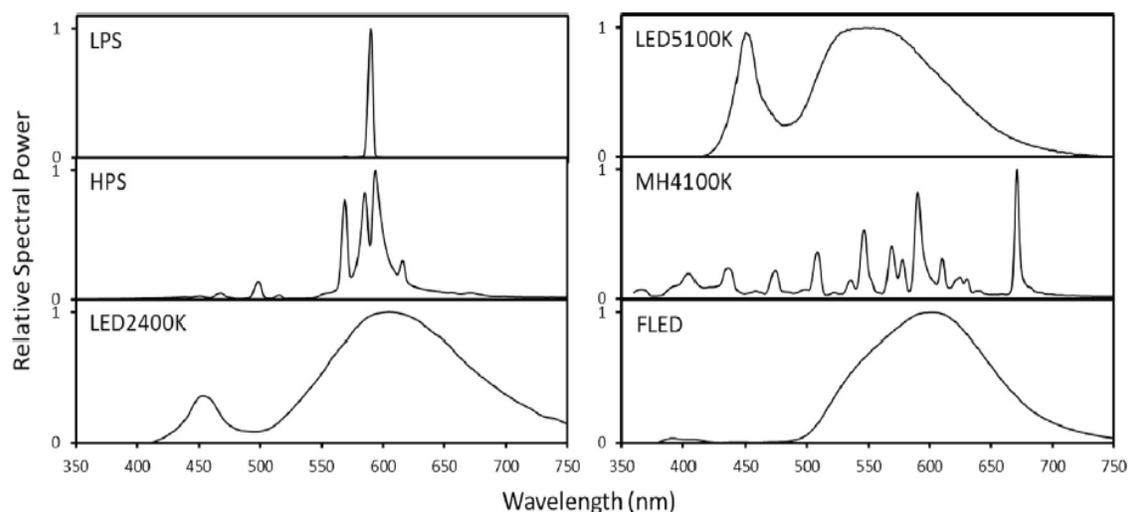


Figura 15. Distribución espectral de potencia de distintas de fuentes lumínicas: Low-pressure sodium (LPS); high-pressure sodium (HPS); LED CCT de 2400K y 5100K; ceramic metal halide con CCT de 4100K (MH4100K); y LED blanco (3000 K CCT) con un filtro a 500nm (FLED) (Luginbuhl et al., 2014)

Lunes, 26 de agosto de 2019

La mayoría de los LEDs y las lámparas de halogenuros metálicos emiten fuertemente en el azul, causando el reconocido daño a la astronomía. Estudios recientes (Luginbuhl et al., 2014), han demostrado que LEDs con temperaturas de color elevadas y lámparas de haluro metálico producen un brillo del cielo 8 veces mayor que las lámparas de vapor de sodio de baja presión (SBP) y 3 veces mayor que lámparas de vapor de sodio de alta presión (SAP). Debido a su elevado contenido en luz azul, el brillo artificial del cielo resultante por esas fuentes se mantiene visible en distancias superiores a los 300km (Luginbuhl et al., 2014).

Las fuentes lumínicas LED de temperatura de color (CCT) de 2.200K, 2.700K, y 3.000K presentan contenidos de azul bajos (de no más de 15% en el último caso), pero su efecto sigue siendo significativo. Se ha modelado el efecto de este tipo de fuentes mediante el software que se utilizó para calcular el Nuevo Atlas Mundial de Contaminación Lumínica (Falchi et al., 2016). Los resultados de estas simulaciones pueden verse en las Figuras 16, 17, y 18, para temperaturas de color de 2.200K, 2.700K, y 3.000K, respectivamente.

El caso de los LED de 2.200K, conocidos como LED ultra cálidos, pese a contar con una emisión de entre 380 y 499nm menor al 8% respecto del rango visible de los seres humanos, su efecto es casi tan relevante como el de fuentes con mayor contenido de azul, como es el caso de los diodos de 2.700K y 3.000K (que cumplen con la normativa actual definida en el DS043/2012 MMA).

Como se puede verificar en las Figuras 16, 17, y 18, se puede concluir que la variación en el porcentaje de luz azul de estas fuentes (entre 5 a 15% de emisión espectral entre los 380 y 499nm) no genera una reducción en la contaminación lumínica del cielo nocturno. Ese resultado verifica que es necesaria únicamente una pequeña proporción de emisión en el azul para que el efecto de la contaminación lumínica sea manifiesto.

Por otro lado, en la Figura 19 se ha modelado el efecto de la contaminación lumínica utilizando el mismo software (Falchi et al., 2016) para fuentes lumínicas del tipo denominado LED PC Ámbar (LED *Phosphor-Converted Amber*).

Es notable la diferencia del impacto de contaminación lumínica con las imágenes de las fuentes LEDs a 2.200K, 2.700K, y 3.000K (Figuras 16, 17, y 18) y la versión LED PC Ámbar (Figura 19). El espectro de la opción LED PC Ámbar no contiene emisiones de luz bajo los 500nm, haciendo que el efecto de dispersión atmosférica global sea significativamente menor. En este caso, únicamente los grandes centros urbanos presentan zonas con ratios de brillo artificial respecto del cielo nocturno natural de entre 5.12 a 10.2 (rojo), donde la Vía Láctea ha desaparecido.

Lunes, 26 de agosto de 2019

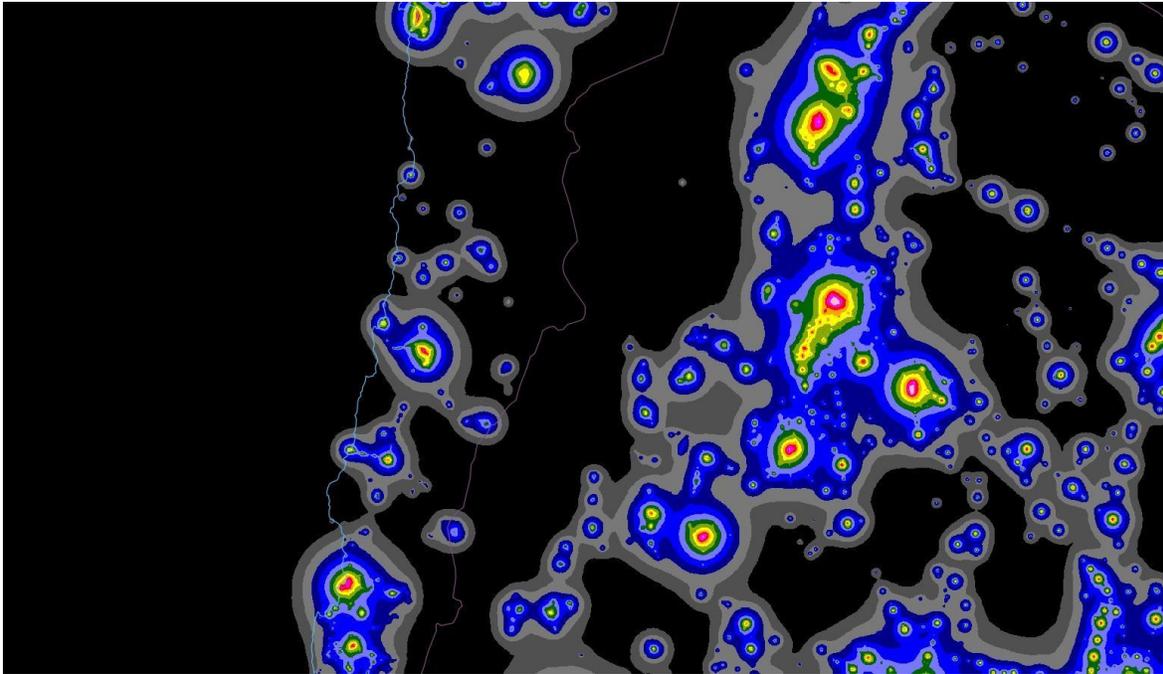


Figura 16. Mapa de contaminación lumínica calculado para fuentes LED de 2.200K.

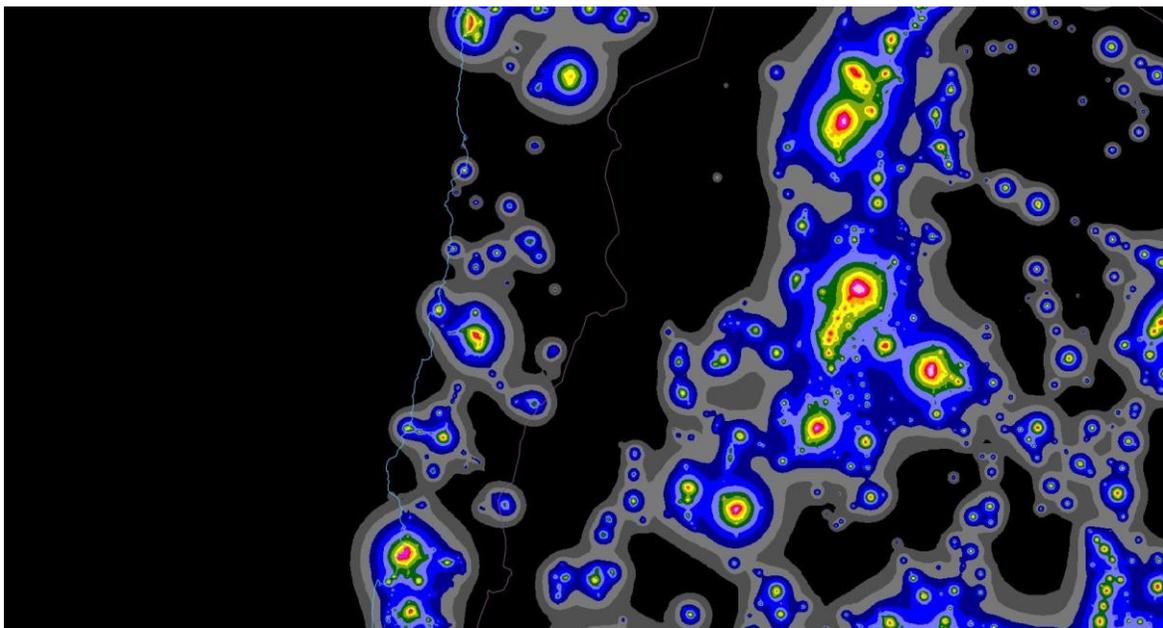


Figura 17. Mapa de contaminación lumínica calculado para fuentes LED de 2.700K.

Lunes, 26 de agosto de 2019

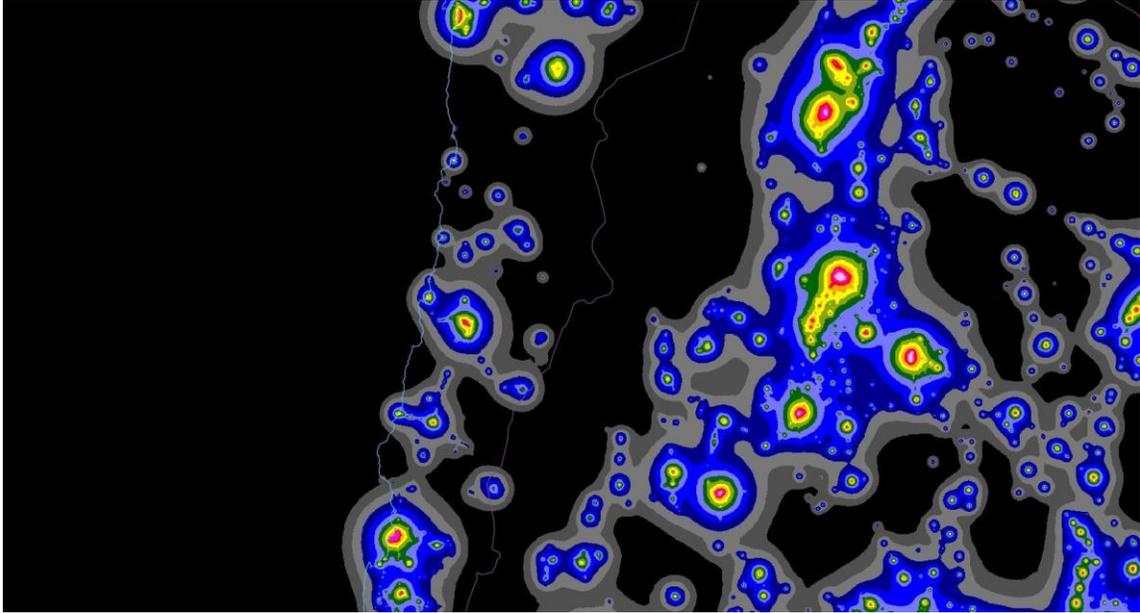


Figura 18. Mapa de contaminación lumínica calculado para fuentes LED de 3.000K.

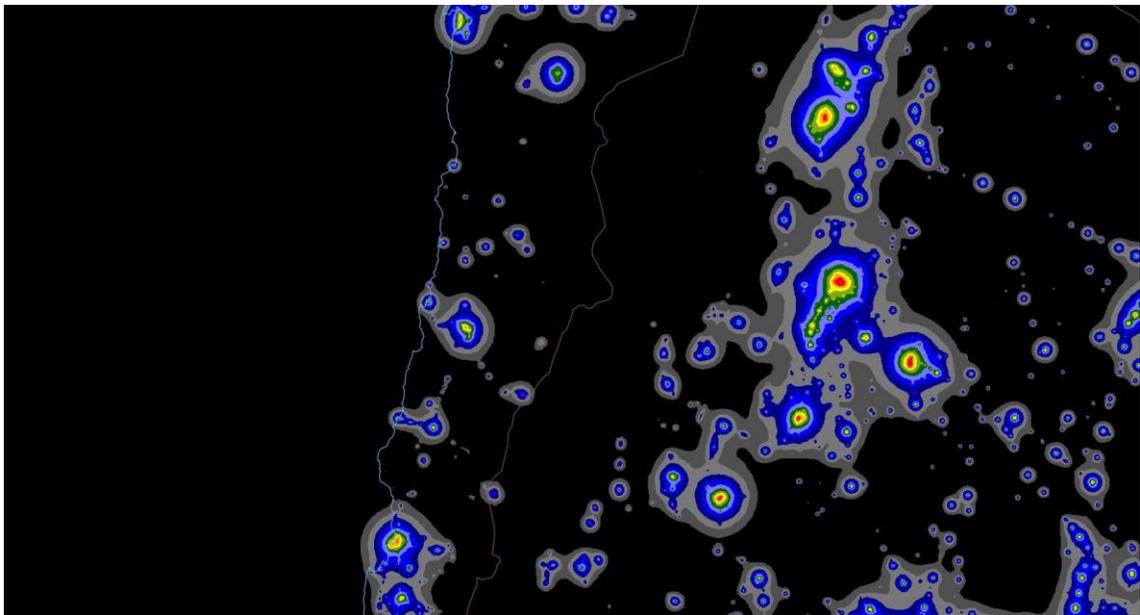


Figura 19. Mapa de contaminación lumínica calculado para fuentes LED PC Ámbar.

El resultado que se muestra en la Figura 19 y su comparativa con los resultados de las figuras anteriores lleva a proponer la utilización de solo fuentes PC Ámbar en las zonas cercanas a los grandes observatorios astronómicos, generando emisiones por debajo de los 500nm prácticamente nulas.

Lunes, 26 de agosto de 2019

Las fuentes LED de 4.000K y 5.000K están fuera de los rangos espectrales contenidos en el DS043. Específicamente, sobrepasan el 15% del rango 380 - 499nm definido en el decreto actual, presentando en algunos casos valores de más de 30% de emisión en dicho rango. Como comparativa, se presentan en las Figuras 20 y 21 las simulaciones realizadas para las temperaturas de 4.000K y 5.000K, respectivamente.

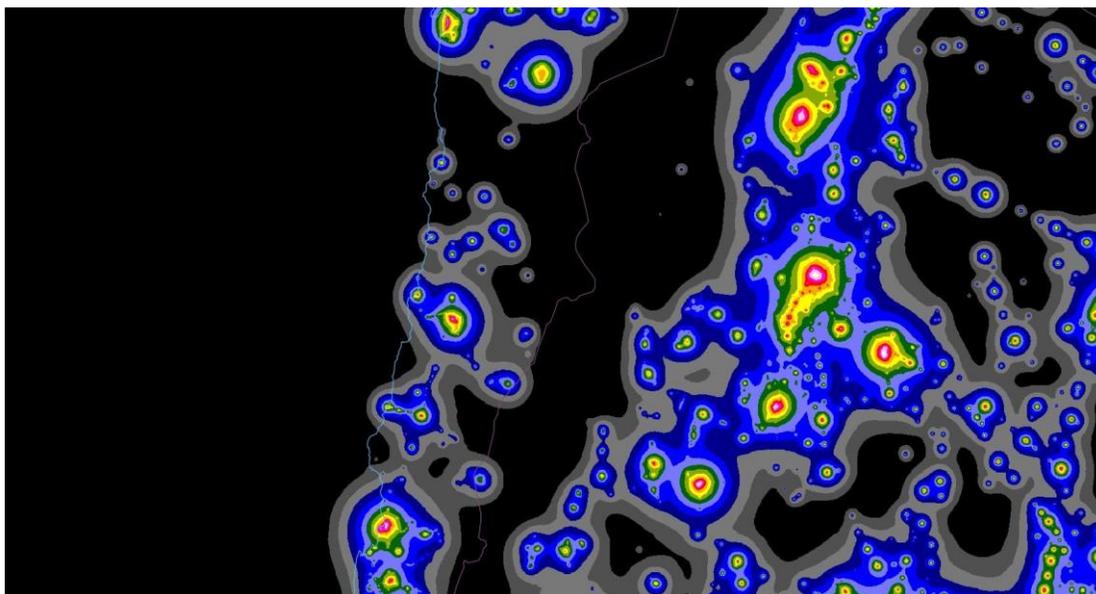


Figura 20. Mapa de contaminación lumínica calculado para fuentes LED de 4.000K.

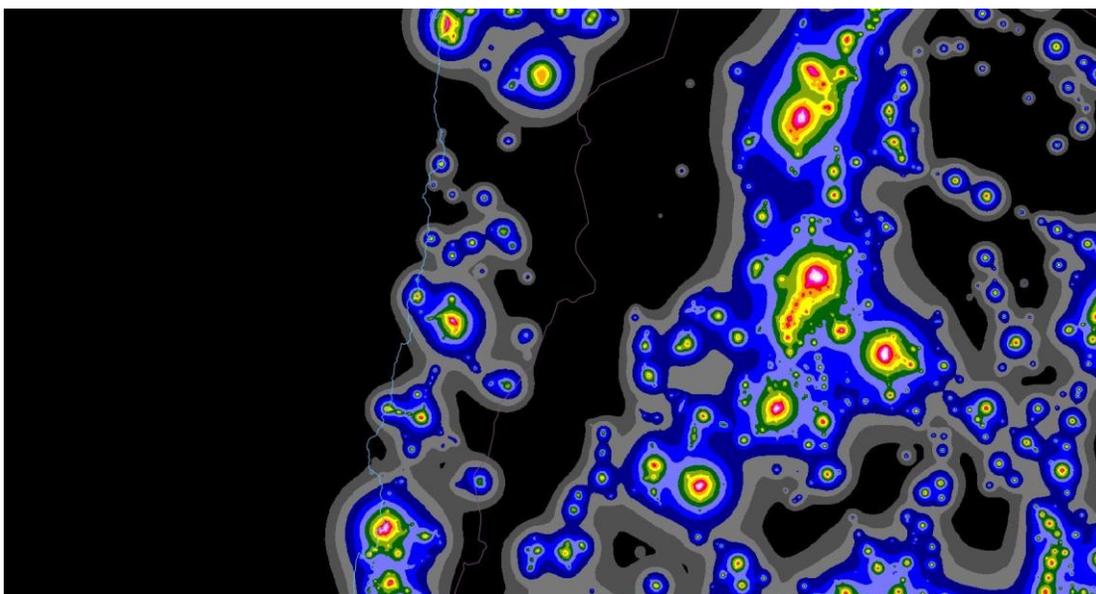


Figura 21. Mapa de contaminación lumínica calculado para fuentes LED de 5.000K.

Lunes, 26 de agosto de 2019

Se puede apreciar en la simulación de contaminación lumínica para fuentes LED de 4.000K de la Figura 20 que el centro urbano de La Serena eleva su brillo artificial a niveles entre 20.5 a 41 sobre el cielo prístino, provocando una situación de no adaptación del ojo humano a la condición de oscuridad, en donde ya no funcionan los bastones (oculares) y la visión es solo con los conos retinales.

En el caso de fuentes LED de 5.000K mostrado en la Figura 21 se puede ver que se agrava aún más el impacto de las fuentes frías en el cielo nocturno. Sobre la zona costera, el centro de La Serena y también en Coquimbo, no hay adaptación del ojo humano a la condición de oscuridad, por lo que los bastones retinales se vuelven inútiles para aquellos que se encuentren permanentemente expuestos a esa condición de exagerada iluminación en el entorno.

Por otro lado, desde el proceso de revisión del DS686/1998 MINECON, durante el inicio de esta década, se ha acumulado mucha más evidencia en torno a los daños de la emisión lumínica en la banda azul a los seres humanos y a una gran diversidad de especies de fauna y flora. Por ello, restringir las emisiones espectrales en las bandas del azul cobra aún más fuerza y necesidad.

Actualmente, la tecnología de iluminación está casi completamente dominada por los LEDs, y ha incrementado significativamente tanto los niveles de iluminación, las coberturas de áreas sujetas a iluminación, como también de la presencia de fuentes preferentemente azules, con emisiones espectrales bajo los 499nm. Estas fuentes de luz blanca (algunas de ellas directamente de luz fría), representan la mayoría de las instalaciones nuevas de alumbrado exterior a nivel mundial, nacional e incluso también en la zona astronómica (regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo). La normativa de control de la contaminación lumínica no ha logrado frenar este desarrollo, pese a que muchas de estas fuentes no cumplen el vigente DS043/2012 MMA. La casi total ausencia de fiscalización, más un extenso periodo de transición en la entrada en vigencia de todo el cuerpo normativo asociado a este decreto supremo, ha provocado un efecto devastador en la calidad del cielo nocturno del norte del país, en donde, por contraste, se están instalando actualmente la mayoría de los grandes telescopios de la última generación (del rango de 20 a 40 metros de diámetro de espejo principal). Al perder la característica oscuridad de nuestro cielo nocturno en el norte del país, se está amenazando seriamente la continuidad de la astronomía científica en Chile.

Conclusiones

En este documento se han resumido los principales efectos de la contaminación lumínica en la observación astronómica, modelos y mediciones del estado actual de dicho fenómeno en la Zona Norte de Chile, y modelos de su incremento en el futuro.

La contaminación lumínica disminuye el contraste en las observaciones astronómicas, reduciendo de forma efectiva la apertura del espejo primario del telescopio y limitando la ciencia que se puede hacer en los observatorios. En unos cielos contaminados lumínicamente, ese efecto de reducción equivale a reducir el valor efectivo del observatorio. En el caso de los proyectos de grandes observatorios que actualmente están operando o planean ser instalados en el país, las pérdidas asociadas pueden equivaler a varios cientos de millones de dólares.

Los modelos y las mediciones realizadas indican que, aunque actualmente los niveles de contaminación no llegan al nivel indicado para considerar un cielo contaminado según la Recomendación 1 de la Comisión 50 de la IAU (Smith, 1979), algunos observatorios tienen un incremento en el brillo artificial de los cielos cercano al límite de dicha recomendación.

El incremento de la contaminación lumínica está directamente relacionado al crecimiento poblacional, por lo que se considera una cuestión de tiempo llegar a los niveles de polución en los que se afecte la operación de los grandes observatorios astronómicos que se encuentran en el país.

Para mitigar el avance de la contaminación lumínica se ha realizado una propuesta de reducción de la emisión en bandas espectrales bajas en torno a los observatorios. El radio de protección de 100km propuesto está basado en la mínima distancia de protección indicada en las recomendaciones internacionales (CIE 126, 1997; ILP GN01, 2011; CIE 150, 2017). Por otro lado, la reducción de emisiones en la banda azul propuesta está también indicada en las recomendaciones internacionales (CIE 150, 2017), documentada en la bibliografía científica (por ejemplo: Luginbuhl, 2001; Luginbuhl et al., 2009; Luginbuhl et al., 2014), y se ha demostrado con modelos de propagación de la contaminación lumínica en la Zona Norte de Chile.

Anexo:

El Caso del Observatorio de Mount Wilson, un Ejemplo a Temer.

Guillermo A. Blanc

Observatories of the Carnegie Institution for Science, Pasadena, CA, USA

Observatorio Las Campanas, La Serena, Chile

Departamento de Astronomía, Universidad de Chile, Santiago, Chile

La contaminación lumínica representa hoy la principal amenaza a la actividad astronómica profesional en el norte de Chile. Los niveles actuales de contaminación lumínica y la tasa a la cual ésta aumenta, están hoy en niveles que afectan directamente la competitividad del país como un polo de atracción para la investigación astronómica profesional. No adoptar medidas fuertes se traducirá en ahuyentar a futuros proyectos a instalarse en lugares más oscuros como las Islas Canarias, Hawaii, Sudáfrica y Namibia. Esto pone en riesgo las grandes inversiones que Chile está haciendo para posicionar la astronomía como un eje de nuestra imagen país, y como un pilar para el desarrollo científico y tecnológico a través de áreas como la astroingeniería, y el “big-data” (e.j. el Observatorio de Datos impulsado por el Ministerio de Economía).

Históricamente existen ejemplos concretos de cómo la contaminación lumínica ha destruido la competitividad científica de observatorios profesionales. Una experiencia ejemplar es la del Observatorio Mount Wilson, en la sierra de San Gabriel en las cercanías de la ciudad de Los Ángeles en California. Mount Wilson fue fundado, por el célebre astrónomo George Ellery Hale, en la primera década del siglo XX. En dos ocasiones se inauguraron en este lugar los telescopios más grandes del mundo. El telescopio de 60 pulgadas en 1908, y el telescopio de 100 pulgadas en 1917. Este observatorio fue, de forma indiscutida, el más importante del planeta durante la primera mitad del siglo XX, y en sus dependencias se encontraron figuras notables de la ciencia mundial como Albert Einstein, Edwin Hubble, y otros. Desde Mount Wilson se hicieron descubrimientos tan fundamentales como la expansión del universo, que dio lugar a la teoría del Big Bang, o la comprobación de que los elementos químicos que componen nuestro cuerpo y el resto de la materia que observamos en la Tierra, se originan en el interior de las estrellas a través de fusiones nucleares. En cierta forma Mount Wilson fue en la primera mitad del siglo XX lo que el norte de Chile es en la primera mitad del siglo XXI.

Lunes, 26 de agosto de 2019

La Figura 1 más abajo muestra dos curvas. La curva roja muestra la fracción de todos los artículos científicos publicados cada año, que mencionan al observatorio de Mount Wilson. Solo se incluyen artículos sujetos a referato, publicados en las principales revistas especializadas del mundo. La estadística fue construida utilizando la base de datos de publicaciones ADS (NASA's Astrophysics Data System). Es por lo tanto una medida de la relevancia científica del observatorio en función del tiempo, desde su fundación hasta el día de hoy, en que sigue operando, pero de forma muy modesta. Tal fue la importancia de Mount Wilson que en la década de los 1940's más de un cuarto de todos los artículos sobre astronomía publicados en el mundo mencionan a éste observatorio de una forma u otra. Pero en transcurso de dos décadas, entre 1950 y 1970, Mount Wilson se transformó en un lugar prácticamente irrelevante para la astronomía mundial. Entender la causa de este declive es fundamental para entender el riesgo que la contaminación lumínica conlleva hoy para la astronomía en Chile.

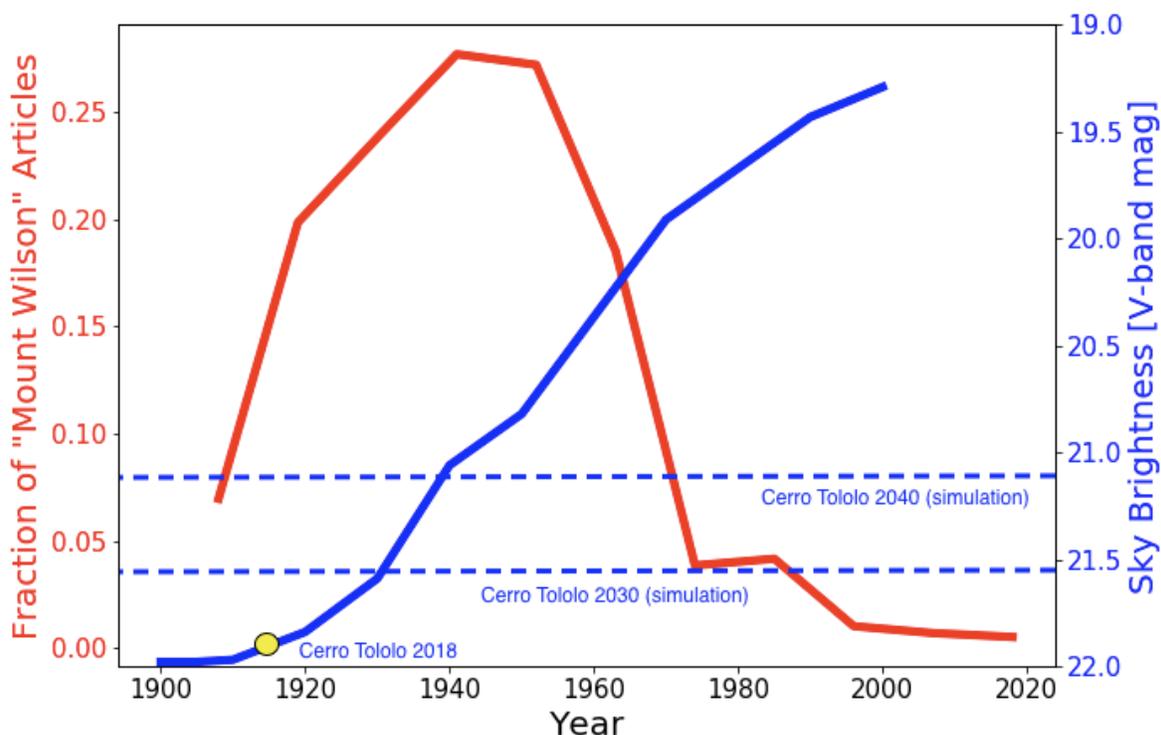


Figura 1: Declive en la relevancia científica de Mount Wilson (curva roja) debido al aumento de la contaminación lumínica (curva azul). El punto amarillo y las líneas punteadas muestran la situación actual de Cerro Tololo en Chile y las proyecciones a 20 años de mantenerse las tasas actuales de aumento de la contaminación lumínica que se miden.

Lunes, 26 de agosto de 2019

La principal causa detrás de la caída de Mount Wilson fue la inauguración, en 1948, del telescopio de 200 pulgadas (5 metros) en Mount Palomar, una locación significativamente más remota al interior del estado de California. Este nuevo observatorio se transformó rápidamente en un polo de atracción para los científicos más importantes de la época. La paradoja de ésta historia es que el fundador de Mount Palomar fue el mismo George Ellery Hale, quien 40 años antes había fundado Mount Wilson. Entonces, ¿por qué Hale no tomaría la decisión de seguir potenciando su propio observatorio con el que sería el nuevo telescopio más grande del mundo? La respuesta se puede apreciar observando la curva azul en el gráfico, que muestra el aumento en el brillo del cielo en Mount Wilson, debido principalmente a la contaminación lumínica proveniente de la ciudad de Los Ángeles (en unidad de magnitudes en la banda visible).

Hale tomó la decisión de que el siguiente telescopio más grande del mundo no se construiría en su querido Mount Wilson, sino en un nuevo sitio a mediados de la década de los 1920's, debido principalmente a la tasa de aumento que observaba en los niveles de contaminación lumínica (ver Figura 2). Esta sabia decisión permitió que la actividad astronómica continuara desarrollándose de forma óptima durante las siguientes décadas, pero significó el declive absoluto de Mount Wilson, él que se volvió rápidamente un lugar irrelevante en sus capacidades para hacer investigación astronómica de punta. Hoy en Chile estamos en éste mismo punto de inflexión, y las decisiones que tomemos dictarán el futuro de la astronomía en Desierto de Atacama.

La Figura 1 también muestra los niveles actuales de contaminación lumínica en el Observatorio de Cerro Tololo (punto amarillo) y las proyecciones a 2030 y 2040 de mantenerse los niveles actuales medidos de aumento del brillo del cielo. Las proyecciones son consistentes con el caso de Mount Wilson, y muestran que nos encontramos en un momento crítico en lo que respecta al control de la contaminación lumínica. De no tomar acciones fuertes y eficaces en el corto plazo para revertir las tendencias actuales, la actividad astronómica en el norte de Chile se vea significativamente afectada en las próximas dos décadas, poniendo en un real riesgo la posición del país como capital mundial de la astronomía.

Lunes, 26 de agosto de 2019

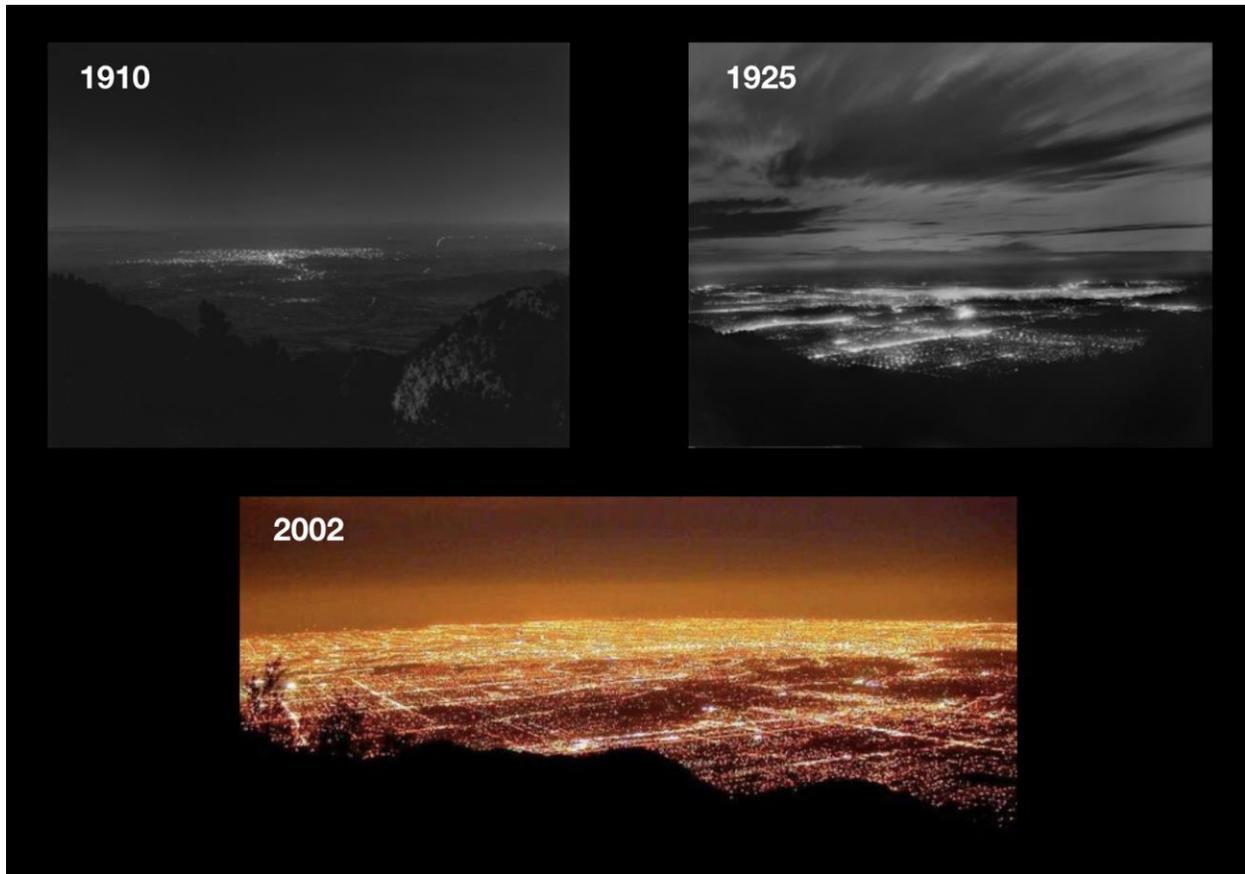


Figura 2: La ciudad de Los Ángeles vista desde Mount Wilson en 1910, 1925 y 2002. A mediados de la década de 1920 se toma la decisión de no construir el siguiente gran telescopio en éste lugar dada la alta tasa de aumento en la contaminación lumínica.

Referencias

- CIE 150 (2017). CIE 150-2017 Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Installations, 2nd Edition
- CIE 126 (1997). CIE 126-1997 Guidelines for minimising sky glow.
- CIE 001 (1980). CIE 001-1980 Guidelines for minimising urban sky glow near astronomical observatories. (Joint CIE/IAU publication)
- ILP GN01 (2011). Institution of Lighting Professionals. Guidance Notes for the Reduction of Obtrusive Light GN01:2011
- K. Baugh, F. Hsu, C. D. Elvidge, M. Zhizhin (2013) Nighttime Lights Compositing Using the VIIRS Day-Night Band: Preliminary Results. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, Vol. 35, p 70-86, ISSN 2227-3026 <http://dx.doi.org/10.7125/APAN.35.8>
- J. E. Bortle, (2001). Introducing the Bortle Dark-Sky Scale. *Sky and Telescope* (February), 126-129.
- P. Cinzano, F. Falchi, C.D. Elvidge (2001) The first World Atlas of the artificial night sky brightness, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 328, Issue 3, December 2001, Pages 689–707, <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04882.x>
- D. L. Crawford (2000) Light pollution, an environmental problem for astronomy and for mankind. *Memorie della Società Astronomia Italiana*, Vol. 71, p.11,
- F. Falchi, P. Cinzano, D. M. Duriscoe, C. Kyba, C. D. Elvidge, K. E. Baugh, B. A. Portnov, N. Rybnikova, and R. Furgoni (2016) The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science advances*. Vol 2, No. 6. DOI: 10.1126/sciadv.1600377
- F. Falchi, S. Bará, P. Sanhueza, (2019) Evaluation of the light pollution from La Serena/Coquimbo urban area. Report on January 2019
- A. Hänel, T. Posch, S. J. Ribas, M. Aubé, D. Duriscoe, A. Jechow, ... & H. Spoelstra (2018). Measuring night sky brightness: methods and challenges. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 205, 278-290. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.09.008>
- A. Jechow, C. Kyba, F. Hölker (2019). Beyond All-Sky: Assessing Ecological Light Pollution Using Multi-Spectral Full-Sphere Fisheye Lens Imaging. *Journal of Imaging*, 5(4), 46. <https://doi.org/10.3390/jimaging5040046>
- S. Miller, W. Straka, S. Mills, C. Elvidge, T. Lee, J. Solbrig, ... & S. Weiss (2013). Illuminating the capabilities of the suomi national polar-orbiting partnership (NPP) visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) day/night band. *Remote Sensing*, 5(12), 6717-6766. <https://doi.org/10.3390/rs5126717>
- B, Mizon (2002) Light Pollution: Responses and Remedies. Springer-Verlag London. ISSN: 1431-9756
- P. Murdin (2001) Environmental Challenges in Astronomy, in *Encyclopedia of Astronomy & Astrophysics*. Bristol & London. Institute of Physics & Nature Publishing Group. <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C01/E6-119-28.pdf>

Lunes, 26 de agosto de 2019

- C. B. Luginbuhl (2001), Why Astronomy Needs Low-Pressure Sodium Lighting, *Preserving the Astronomical Sky, Proceedings of IAU Symposium 196, Vienna, Austria*: International Astronomical Union, p. 81
- C. B. Luginbuhl, P. A. Boley, D. R. Davis (2014) The impact of light source spectral power distribution on sky glow, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Volume 139, 2014, Pages 21-26, ISSN 0022-4073, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.12.004>
- C. B. Luginbuhl, C. E. Walker, R. J. Wainscoat (2009). Lighting and astronomy. *Physics Today* 62, 12, 32 <https://doi.org/10.1063/1.3273014>
- D. McNally, J. Mitton (2000) Preserving the astronomical sky, *Astronomy & Geophysics*, Volume 41, Issue 2, April 2000, Pages 2.17–2.18, <https://doi.org/10.1046/j.1468-4004.2000.00217.x>
- K. Narisadam, D. Schreuder (2004). Light Pollution Handbook. Groningen, The Netherlands: Springer Netherlands. 966p. ISBN 9781402026669 <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2666-9>
- D. A. Schreuder, (2001) Recent CIE Activities on Minimizing Interference to Optical Observations, *Preserving the Astronomical Sky, Proceedings of IAU Symposium 196*, held 12-16 July 1999, in Vienna, Austria. Edited by R. J. Cohen and W. T. Sullivan, 2001., p.69
- S. Schroer, F. Hölker (2017) Light Pollution Reduction. In: Karlicek R., Sun CC., Zissis G., Ma R. (eds) *Handbook of Advanced Lighting Technology*. Springer, Cham https://doi.org/10.1007/978-3-319-00176-0_43
- F. G. Smith (1979) Report and recommendations of IAU commission 50, reports on astronomy. IAU Transactions XVIIA: 218–222
- Blanc, Guillermo (2019) El Caso del Observatorio de Mount Wilson, un Ejemplo a Temer. Solicitado por OPCC para este informe.