



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Estudio de la luz artificial durante la noche en la Ciudad de
México

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

Licenciado en Ciencias de la Tierra

PRESENTA

Joshua Iván Muñoz Salazar

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Héctor Antonio Solano Lamphar
Consorcio para el Estudio de Zonas Metropolitanas

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 2019



per aspera ad astra

Agradecimientos

Añadir agradecimientos a familia (núcleo y Xalapa), amigos (Alan, Memo, Dianita, Beto, Facultad de Ciencias [Jimbo, Emily/David, Repoios, Alex, Mina y Anguiano-atlas], CCAmigos y Fabi], profesores (Marco Antonio Miramontes y Fernando García) y programa PAECI, erario México, UNAM, grupo IMM e Ivonne del CCA, CONACyT, la REPSA, Héctor Solano y Kocifaj, investigadores de Barcelona (UPC Y UB), sinodales honor por la inspiración, a la AGU y a las alcaldías por los datos facilitados de alumbrado público a través del Instituto de Transparencia, Acceso a la Información Pública, Protección de Datos Personales y Rendición de Cuentas de la Ciudad de México. Con dedicatoria a ese niño que quería ser veterinario.

Abreviaturas

- **AOD** *Aerosol Optical Depth* - Espesor Óptico de Aerosol
- **ASY** *Asymmetry Parameter* - Parámetro de Asimetría
- **CEF** *City Emission Function* - Función de Emisión Urbana
- **CL** Contaminación Lumínica
- **EM** Espectro Electromagnético
- **LED** *Light Emitting Diode* - Diodo Emisor de Luz
- **SI** Sistema Internacional de Unidades
- **SSA** *Single Scatter Albedo* - Albedo de Dispersión Simple

Resumen

Las ciudades albergan a la mayoría de las poblaciones humanas a nivel mundial (Zari, 2018). El caso de estudio de esta tesis es la Ciudad de México, la cual actualmente concentra cerca de 9 millones de habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015) y está inmersa en la Zona Metropolitana del Valle de México que tiene una población total de alrededor de 22 millones de habitantes (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2015). Esta aglomeración implica serias consecuencias ambientales y hace a la región altamente dependiente de subsidios: con sólo 7 % de la población total de México, en la Ciudad de México se consume casi un tercio del petróleo demandado en el país y 6 % del total de la energía eléctrica (Secretaría de Energía, 2013).

Como consecuencia de una dinámica centralista, en el área que abarca la Ciudad de México se cuenta con alrededor de 600 mil luminarias públicas funcionando en vías primarias y secundarias (Instituto de Transparencia, Acceso a la Información Pública, Protección de Datos Personales y Rendición de Cuentas de la Ciudad de México, 2019); por la cantidad y características de tales puntos de luz, se puede hipotetizar que la capital del país actualmente se está enfrentando a otro problema ambiental más: la contaminación lumínica (CL).

La CL es el conjunto de efectos de difusión, en la atmósfera nocturna, de la luz producida por fuentes artificiales que alteran las condiciones originales de luminosidad; estos efectos se producen por la emisión del flujo luminoso en intensidades, direcciones, rangos espectrales u horarios innecesarios, siendo algunos de los más apremiantes la degradación de los socioecosistemas y, más específicamente, afectación a la población humana en temas de uso sustentable de energía, salud y ética (Lot et al., 2012), (Gil et al., 2012), (Stone, 2017).

Aunque este tipo de contaminación comenzó a considerarse un problema ambiental desde principios de la década de 1960 (Gil et al., 2012), hasta ahora no se han realizado estudios referentes al tema en ninguna ciudad del país. Esta tesis es el primer antecedente de la estimación de los niveles de contaminación lumínica en la Ciudad de México, con el uso del modelo teórico de dispersión de la luz en la atmósfera *SkyGlow* desarrollado por Kocifaj (Miroslav Kocifaj, 2007).

Aquí se agregarán los resultados encontrados a grandes rasgos.

Productos

Congresos

Joshua Iván Muñoz Salazar *Efectos de la contaminación lumínica en especies de hábito nocturno.* En Noche de las Estrellas: 3 de diciembre de 2016. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Joshua Iván Muñoz Salazar y Héctor Antonio Solano Lamphar. *Radiación lumínica en la atmósfera.* En Tercer Simposio de Ciencias de la Tierra: 6 - 8 de noviembre de 2017. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Joshua Iván Muñoz Salazar y Héctor Antonio Solano Lamphar. *Determinación de propiedades ópticas de nubes con base en su contenido de agua líquida.* En XII Congreso Internacional de Meteorología: 13 - 16 de noviembre de 2018. Universidad Veracruzana, Veracruz, México.

Joshua Iván Muñoz Salazar y Héctor Antonio Solano Lamphar. *Contaminación lumínica: otra dimensión para la mitigación del calentamiento global.* En 8º Congreso Nacional de Investigación en Cambio Climático: 9 y 10 de octubre de 2018. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Estancias de investigación

Grupo de Estudios Luminotécnicos. Departamento de Ingeniería de Proyectos y Construcción. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña: diciembre 2018. Barcelona, España.

Índice general

Agradecimientos	II
Abreviaturas	III
Resumen	IV
Productos	V
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	IX
1. Introducción	1
1.1. Fundamentos teóricos de la luz	1
1.1.1. Radiación electromagnética	1
1.1.2. Propiedades ópticas	1
1.1.3. Unidades de medición	2
1.2. Brillo del cielo nocturno	3
1.2.1. Componentes del brillo del cielo nocturno	3
1.2.2. Variación natural del brillo del cielo nocturno por influencia de la Luna . . .	3
1.2.3. Variación natural del brillo artificial del cielo nocturno por influencia de las condiciones atmosféricas	4
1.3. Luz artificial	7
1.3.1. Fundamentos teóricos de las fuentes artificiales de luz	7
1.3.2. Fuentes de luz artificial	8
1.3.3. Tipos de luminarias	9
1.3.4. Función de emisión urbana	9
1.4. Contaminación lumínica (CL)	10
1.4.1. El enfoque socioecosistémico	10
1.4.2. Importancia del ciclo día-noche en la evolución de la vida	10
1.4.3. Uso y abuso de la energía eléctrica	11
1.4.4. Tipos de CL	11
1.4.5. Consecuencias de la CL	11
1.4.6. Contexto histórico del estudio de la CL	12
1.4.7. Marco regulatorio: normas y leyes en México y el mundo	12
1.5. Estudio de caso: Ciudad de México	12
1.5.1. Descripción del área de estudio	12
1.5.2. Inventario de alumbrado público	13
1.5.3. Consumo de energía eléctrica	13
1.5.4. Climatología de aerosol atmosférico y nubosidad	13
1.6. Hipótesis	13
1.7. Objetivos	13
1.7.1. Generales	13
1.7.2. Particulares	13

2. Metodología	14
2.1. El software <i>Radiance Light Trends</i>	14
2.2. El modelo <i>SkyGlow</i>	14
3. Resultados y discusión	15
3.1. Tendencias de radiancia en las alcaldías de la Ciudad de México	15
3.2. Mapa de radiancia de la Ciudad de México	15
3.3. Gráficas tipo <i>all sky</i> de distribución de radiancia	15
3.4. Experimentos numéricos	15
3.4.1. Cambio del tipo de luminarias en la Ciudad de México	15
3.4.2. Influencia del aerosol atmosférico en la distribución de radiancia	15
3.4.3. Influencia de la nubosidad en la distribución de radiancia	15
4. Conclusiones	16
5. Recomendaciones	17
6. Anexos	18
Referencias	19

Índice de figuras

1.1. Espectro electromagnético (National Aeronautics and Space Administration, 2007) .	2
1.2. Distribución espectral de A) LED, B) Vapor de mercurio, C) Halogenuros metálicos, D) Sodio a alta presión y E) Sodio a baja presión (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2013b)	8
1.3. Ángulo de apantallamiento de luminaria (Marin, 2009)	9
1.4. Simulación de la historia geológica de la duración del día terrestre (Stevenson and Bartlett, 2016)	11

Índice de tablas

1.1. Propiedades ópticas de la luz (Born and Wolf, 2003)	1
1.2. Unidades del SI utilizadas en radiometría (Meyer, 1968)	2
1.3. Componentes del brillo del cielo nocturno (Leinert et al., 1998)	3
1.4. Principales fuentes de luz artificial (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2013b), (Elvidge et al., 2010), (Gil et al., 2012)	8

Capítulo 1

Introducción

1.1. Fundamentos teóricos de la luz

1.1.1. Radiación electromagnética

La luz es radiación electromagnética que se propaga en forma de onda a través del espacio transportando energía radiante en el proceso. Está constituida por partículas elementales sin masa denominadas fotones (Purcell and Morin, 2013). Las propiedades de la luz están condensadas en el espectro electromagnético (EM) (Figura 1.1) con base en el número de oscilaciones de la onda por unidad de tiempo (frecuencia, ν) y la distancia lineal entre dos puntos equivalentes de ondas sucesivas (longitud de onda, λ).

Una de las propiedades de la luz de interés para este trabajo en la región visible del EM (~ 380 - 780 nm) es la temperatura de color (T) que está definida a partir de la Ley de desplazamiento de Wien (Halliday et al., 2008). Esta ley explica la relación inversa entre la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro (λ_{max}) y T :

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (1.1)$$

Donde $b = 2.897... \times 10^{-3}$ m K, es denominada la constante de Wien. Un cuerpo negro es un objeto ideal que absorbe y emite toda radiación electromagnética; en equilibrio termodinámico y térmico, emite radiación térmica sólo con dependencia en su temperatura.

En la **Sección 1.3** y en la **Sección 1.4** se presenta la aplicación del concepto de temperatura de color para la clasificación del color de las fuentes de luz y su implicación biológica en los seres vivos.

1.1.2. Propiedades ópticas

La óptica es el campo de la física que se encarga de estudiar la interacción de la luz con la materia. En la **Tabla 1.1** se resumen las principales propiedades ópticas.

Tabla 1.1: Propiedades ópticas de la luz (Born and Wolf, 2003)

Propiedad	Descripción
Absorción	La luz es captada en el objeto y aumenta su energía térmica
Transmisión	La luz atraviesa el objeto sin cambio de dirección ni intensidad
Dispersión	La luz es captada en el objeto y se re-emite con diferente dirección e intensidad
	Rayleigh Dispersión elástica (conserva energía) en que la longitud de onda de la luz incidente es mucho mayor que el tamaño del objeto
	Mie Dispersión elástica en que la longitud de onda de la luz incidente es similar al tamaño del objeto
Reflexión	La luz se desvía al chocar con el objeto con un ángulo igual al de incidencia
Refracción	La luz cambia de dirección y velocidad al atravesar por un medio diferente

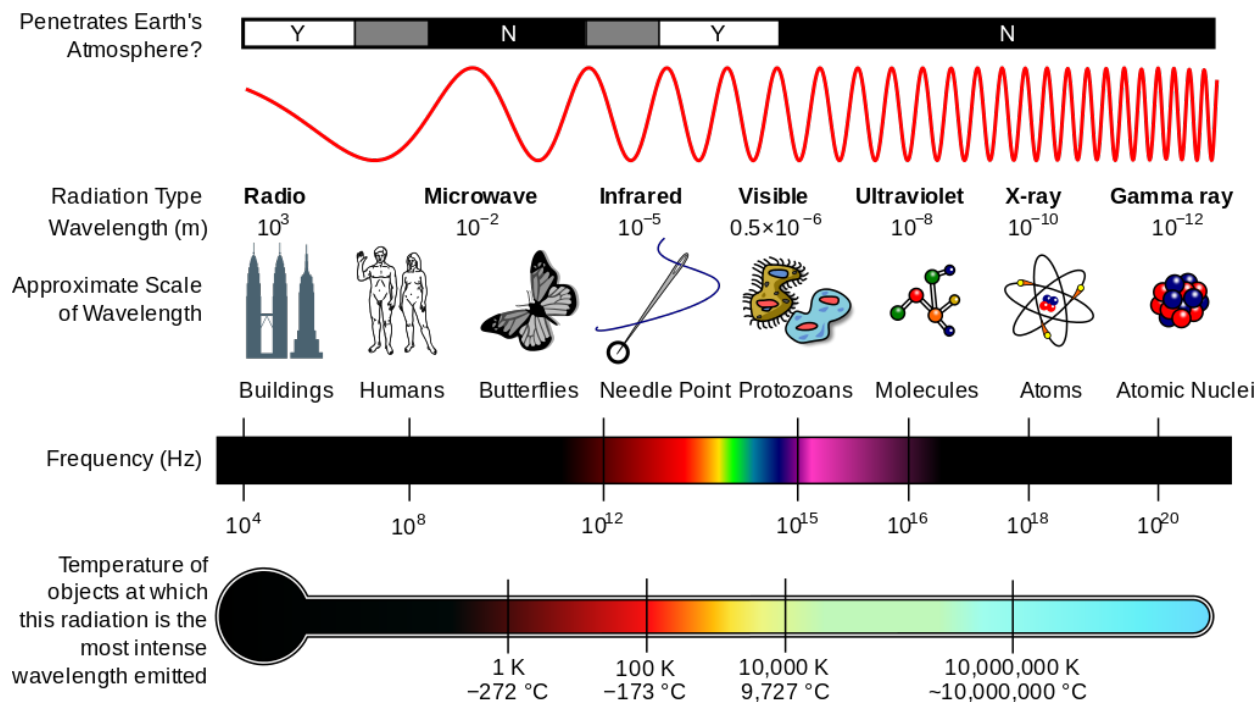


Figura 1.1: Espectro electromagnético (National Aeronautics and Space Administration, 2007)

1.1.3. Unidades de medición

Existen dos campos de estudio que se encargan de la medición de la luz: la fotometría y la radiometría. La fotometría se encarga de medir la luz con base en la sensibilidad de la vista humana. Por otro lado, la radiometría mide la luz abarcando todas las longitudes de onda del EM. Al ser de carácter general este trabajo, en la **Tabla 1.2** se muestran las unidades del Sistema Internacional de Unidades (SI) utilizadas en radiometría.

Para estudios enfocados en los niveles de luminosidad en ecosistemas y su influencia en cada uno de sus componentes con base en su sensibilidad, es fundamental utilizar medidas fotométricas tal y como se aborda en el **Capítulo 5**.

Tabla 1.2: Unidades del SI utilizadas en radiometría (Meyer, 1968)

Magnitud física	Unidad del SI	Notas
Energía radiante (Q)	julio (J)	Energía
Flujo radiante (Φ)	vatio (W)	Energía radiada por unidad de tiempo (potencia)
Intensidad radiante (I)	vatio por estereorradián (W sr^{-1})	Potencia por ángulo sólido
Irradiancia (E)	vatio por metro cuadrado (W m^{-2})	Potencia incidente por superficie
Emitancia radiante (M)	vatio por metro cuadrado (W m^{-2})	Potencia emitida por superficie de la fuente radiante
Radiancia (L)	vatio por estereorradián por metro cuadrado ($\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2}$)	Potencia por ángulo sólido y por superficie
Radiancia espectral (L_λ)	vatio por estereorradián por metro cúbico ($\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-3}$)	Potencia por ángulo sólido, por superficie y por longitud de onda

1.2. Brillo del cielo nocturno

1.2.1. Componentes del brillo del cielo nocturno

En la **Tabla 1.3** se describen los principales componentes del brillo total del cielo nocturno sin Luna (I_{tot}) tal como Leinert et al. (1998) lo reportan para el rango del ultravioleta lejano (~ 100 nm) al infrarrojo lejano ($\sim 200 \mu\text{m}$).

Tabla 1.3: Componentes del brillo del cielo nocturno (Leinert et al., 1998)

Componente	Descripción
Brillo del aire (I_A)	Excitación de átomos de oxígeno y nitrógeno de la atmósfera superior por su interacción con la radiación solar
Luz zodiacal (I_{ZL})	Dispersión de la radiación solar en partículas de polvo interestelar
Luz estelar (I_{ISL})	La luz de las estrellas en su conjunto
Luz difusa galáctica (I_{DGL})	Luz emitida y dispersada por partículas de polvo de la galaxia
Luz de fondo extragaláctica (I_{EBL})	Luz producida por galaxias o cúmulo de galaxias
Luz artificial (I_{SCA})	Luz artificial dispersada en la tropósfera

La suma de tales componentes (excepto luz artificial, netamente de origen antropogénico) se considera de origen natural y es susceptible de ser atenuada por acción de la extinción atmosférica. De acuerdo con esta clasificación, el brillo total del cielo nocturno puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$I_{tot} = (I_A + I_{ZL} + I_{ISL} + I_{DGL} + I_{EBL}) e^{-\tau} + I_{SCA} \quad (1.2)$$

Donde τ es el coeficiente de extinción atmosférica que depende de la longitud de onda, la distancia cenital (la distancia angular del cuerpo celeste con respecto al cenit), la altura sobre el nivel del mar del observador y las condiciones atmosféricas.

La definición matemática del brillo total del cielo nocturno nos permite inferir que las principales contribuciones se deben al brillo del aire y a la luz zodiacal; estimaciones experimentales confirman este comportamiento reportando mediciones de hasta $10^{-4} \text{ W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$ atribuibles al brillo del aire (Leinert et al., 1998).

1.2.2. Variación natural del brillo del cielo nocturno por influencia de la Luna

La luz lunar percibida en la Tierra es resultado de la reflexión de la luz solar y, en menor medida, terrestre en la superficie de la Luna. El albedo lunar es 0.136 lo que significa que refleja 13.6% del total de la radiación incidente (Matthews, 2008). La cantidad de luz lunar varía hasta en tres órdenes de magnitud a lo largo del mes de acuerdo con el ciclo lunar (Kyba et al., 2017).

En condiciones atmosféricas despejadas y de nula luz artificial, la luz lunar es la principal responsable del brillo total del cielo nocturno ya que, típicamente, los valores de brillo del aire son hasta tres órdenes de magnitud más pequeños que los reportados para la luz lunar (Hanel et al., 2018).

Es importante tomar en cuenta la advertencia de Kyba et al. (2017) quienes reportan que en la literatura científica existen datos erróneos de luz lunar y hacen visible la necesidad de una publicación que reporte valores típicos de referencia de luz lunar a través de estudios de largo plazo

(al menos de un año) en localidades sin influencia de luz artificial.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, para efectos de este estudio centrado en la luz artificial, se procede a desprestigiar los términos de luz de origen natural en la ecuación de brillo total del cielo nocturno sin Luna, reduciéndose entonces a:

$$I_{tot} = I_{SCA} \quad (1.3)$$

En la **Sección 1.4** se aborda la importancia en términos fotométricos de considerar la influencia de la luz lunar en los ecosistemas a diferentes escalas según la sensibilidad de sus componentes.

1.2.3. Variación natural del brillo artificial del cielo nocturno por influencia de las condiciones atmosféricas

En esta sección se presentan los principales mecanismos que dispersan la luz artificial en la tropósfera ($\sim 0 - 12$ km) (Lohmann et al., 2016).

Propiedades ópticas del aerosol atmosférico

La concentración de aerosol atmosférico depende principalmente de emisiones naturales y antropogénicas, patrones de circulación sinóptica, meteorología local y características topográficas (Carabali et al., 2017).

Garstang (1991) predijo por primera vez la dispersión de la luz artificial por acción del aerosol atmosférico. Posteriormente Miroslav Kocifaj (2007) verifica que el aerosol atmosférico puede amplificar o reducir el brillo del cielo nocturno con base en las propiedades ópticas de bulto descritas a continuación.

Espesor óptico de aerosol (AOD)

El AOD es una cantidad adimensional que representa la extinción atmosférica de la luz por el aerosol atmosférico integrada verticalmente en toda la columna atmosférica. La diferencia de potencial (V) medido por un fotómetro solar es proporcional a la radiancia espectral (L_λ) que es captada por el instrumento en la superficie (Holben et al., 1998). El espesor óptico total (τ_{TOT}) puede calcularse a partir de la siguiente ecuación conocida como la ley de Beer-Lambert-Bouguer:

$$V(\lambda) = V_0(\lambda) d^2 e^{-\tau_{TOT} m} \quad (1.4)$$

Donde V es la diferencia potencial medida en una longitud de onda dada λ , d es la tasa entre el promedio y la distancia real Tierra-Sol y m es la masa óptica de aire. La masa óptica de aire es la tasa entre la masa de aire que la luz solar atraviesa hasta la superficie de la Tierra y la masa de aire que atravesaría si la incidencia fuera vertical.

Otros constituyentes atmosféricos pueden dispersar la luz y, por lo tanto, deben de considerarse en el cálculo del AOD (Holben et al., 1998) tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\tau(\lambda)_{Aerosol} = \tau(\lambda)_{TOT} - \tau(\lambda)_{agua} - \tau(\lambda)_{Rayleigh} - \tau(\lambda)_{O_3} - \tau(\lambda)_{NO_2} - \tau(\lambda)_{CO_2} - \tau(\lambda)_{CH_4} \quad (1.5)$$

Parámetro de Angstrom

La distribución por tamaño del aerosol atmosférico puede ser estimada a través del Parámetro de Amstrong (α) (Holben et al., 1998) definido a partir de la siguiente ecuación:

$$\alpha(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{-\ln(\frac{\tau_{\lambda_2}}{\tau_{\lambda_1}})}{\ln(\frac{\lambda_2}{\lambda_1})} \quad (1.6)$$

Donde τ_{λ_1} y τ_{λ_2} son el AOD en las longitudes de onda λ_1 y λ_2 respectivamente. $\alpha > 1$, indica que el modo fino de aerosol atmosférico es dominante mientras que $\alpha < 1$ indica que el modo grueso es el más abundante (Carabali et al., 2017).

Parámetro de Asimetría (ASY)

Definido como el promedio del coseno del ángulo de dispersión ponderado por intensidad. Su valor es una medida de la dirección de la dispersión de la luz. Cuando $ASY = 1$, toda la luz es dispersada hacia adelante; $ASY = 0$, indica una dispersión isotrópica (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2015).

Albedo de Dispersión Simple (SSA)

Este parámetro relaciona los coeficientes de dispersión (ϵ_{SCA}) y absorción (ϵ_{ABS}) (Foot and Lee-son, 1987) como muestra la ecuación:

$$SSA = \frac{\epsilon_{SCA}}{\epsilon_{SCA} + \epsilon_{ABS}} \quad (1.7)$$

De esta definición se puede inferir que para el aerosol atmosférico que menos absorbe, el valor del SSA es cercano a 1, mientras que, para el menos absorbentes, el valor de SSA es cercano a 0.

Propiedades ópticas de las nubes

Twomey (1967) desarrolló por primera vez una teoría de dispersión de la luz debido a la nubosidad. Estudios más recientes (Miroslav Kocifaj, 2007), (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2014), (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2015), han encontrado cambios significativos en el brillo del cielo por la dispersión de luz artificial por acción de la nubosidad. Las nubes son un medio dispersivo complejo, esto es, que poseen diferentes constituyentes con diferente índice refractivo complejo (\underline{n}) definido como:

$$\underline{n} = n + ik \quad (1.8)$$

Donde n , la parte real de la ecuación, indica la velocidad de la luz dentro de un medio y la parte imaginaria k es el coeficiente de extinción, una medida de la atenuación de la luz dentro del medio en cuestión (Born and Wolf, 2003). Los valores de la parte imaginaria del índice refractivo complejo para las gotitas de nube y los cristales de hielo que forman las nubes son muy bajos de acuerdo con HA. Solano and Miroslav Kocifaj (2015).

Tomando en cuenta lo anterior, HA. Solano and Miroslav Kocifaj (2015) consideran a las nubes como cuerpos Lambertianos con albedo espectral variante para su estudio óptico. Un cuerpo Lambertiano es aquel que posee una superficie ideal que refleja la luz incidente de manera

isotrópica, permitiendo así que el brillo de tal superficie sea la misma para el observador independientemente de su ángulo de visión (Born and Wolf, 2003).

El albedo espectral de las nubes depende principalmente de factores como la altitud de su base con respecto al observador y la microfísica incluyendo el contenido de agua líquida y la distribución por tamaño de las gotitas de nube (Miroslav Kocifaj, 2007).

Resulta complicado medir el albedo espectral de las nubes durante la noche ya que la mayoría de los fotómetros que miden esta propiedad funcionan con base en niveles de radiación presentes sólo durante el día. Por esta razón, las simulaciones numéricas de la influencia de las nubes en el brillo del cielo nocturna resultan útiles (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2015).

Además, es importante mencionar que los factores que se toman en cuenta en la modelación teórica son capaces de reproducir diferentes comportamientos del brillo del cielo con respecto a la posición del observador, lo cual es deseable para la predicción del brillo del cielo nocturno influenciado por diferentes tipos de nubes (Miroslav Kocifaj, 2007), (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2015).

1.3. Luz artificial

En esta sección se aborda la caracterización de la luz artificial (de origen netamente antropogénico). Para esta tesis se considera que el alumbrado público es el principal responsable del brillo del cielo nocturno por luz artificial (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2013b).

1.3.1. Fundamentos teóricos de las fuentes artificiales de luz

El diseño de iluminación es una disciplina fundamental para la correcta iluminación en el alumbrado público, la cual requiere de colaboraciones con otros campos como la física, biología, ciencias de la Tierra, ingeniería y arquitectura. El reto es grande ya que una correcta iluminación debe ser sustentable, apropiada para su contexto y debe lograr ahorro económico (Gil et al., 2012), (Schulte et al., 2018). A continuación se presentan los conceptos físicos fundamentales detrás de la correcta iluminación.

Producción de luz

Para la producción artificial de luz se necesita de una serie de transformaciones de energía. El primer paso es la generación de energía eléctrica. De acuerdo con Ramos and Montenegro (2012), la mayoría de la energía eléctrica consumida en México es generada a partir de la transformación de energía química por medio de la combustión de hidrocarburos.

Una vez generada la energía eléctrica, necesita ser transformada en energía radiante. Esto se logra por medio del mecanismo interno de la fuente de luz. Los mecanismos más utilizados son la termorradiación (radiación de un cuerpo caliente) y luminiscencia (radiación de cuerpo no caliente) (Gil et al., 2012). En la **Subsección 1.3.2** se abordan las particularidades de cada uno de estos mecanismos.

Distribución espectral

La cantidad de energía radiada en determinadas regiones del EM (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2013a). En la **Subsección 1.3.2** se muestran los gráficos de distribución espectral para diferentes tipos de fuentes de luz artificial.

Temperatura de color

La temperatura de color define el color de una fuente de luz sólo si esta se asemeja a un cuerpo negro. La mayoría de las fuentes de luz tradicionalmente utilizadas (incandescentes) se asemejan a un cuerpo negro, mientras que para las que no cumplen con esa característica (de descarga y LED), se implementa la temperatura de color correlacionada (Gil et al., 2012).

Para efectos de evaluación de reproducción de color y confort se asocia una apariencia de color a los rangos de temperatura de color teniendo «luz cálida» para temperatura de color de hasta 3000 K, «luz intermedia» de 3000 - 5300 K y «luz fría» para temperaturas de color mayor a 5300 K (Schulte et al., 2018).

Eficiencia

Definida para estudios fotométricos, se trata de la cantidad de flujo luminoso (visible) emitido por una fuente de luz por unidad de potencia consumida. La unidad del flujo luminoso es el lumen (lm), el equivalente fotométrico del flujo radiante. No es posible obtener una eficiencia de 100 % debido a las pérdidas ocasionadas por disipación calorífica y radiaciones no visibles para el humano (Gil et al., 2012).

1.3.2. Fuentes de luz artificial

Existen tres principales tipos de fuentes de luz artificial: incandescente, de descarga y diodo emisor de luz (LED, por sus siglas en inglés) (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2013b), (Elvidge et al., 2010), (Gil et al., 2012).

La iluminación incandescente es la más antigua y la más utilizada para interiores, su funcionamiento se basa en hacer pasar corriente eléctrica a través de un filamento, aumentando su temperatura hasta hacer que emita radiaciones visibles (termorradiación).

Por otro lado, la luz de descarga, utilizada ampliamente para alumbrado público, es generada por la excitación de un gas sometido a descargas eléctricas entre dos electrodos (luminiscencia).

Por último, el LED, que recientemente se ha comenzado a implementar en el alumbrado público, genera luz moviendo electrones de un semi-conductor sólido de un estado de alto nivel de energía a uno más bajo a través de la aplicación de una diferencia de potencial (electroluminiscencia).

En la **Tabla 1.4** se presentan ejemplos de las principales fuentes de luz artificial.

Tabla 1.4: Principales fuentes de luz artificial (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2013b), (Elvidge et al., 2010), (Gil et al., 2012)

Tipo	Fuente de luz	Distribución espectral (ver Figura 1.2)	Temperatura de color (K)	Eficiencia (lm W^{-1})
Incandescente	Lámpara incandescente	Continuo en el visible	2700	8 - 18 (baja)
	Lámpara de sodio a baja presión (LPS)	Discontinuo con pico en 589 nm	2000	180 (muy alta)
De descarga	Lámpara de sodio a alta presión (HPS)	Discontinuo con pico en 819 nm	2300	100 (alta)
	Lámpara de halogenuros metálicos (MH)	Discontinuo con pico alrededor de 600 nm y en 819 nm	2800 - 5000	70 - 90 (alta)
	Lámpara de vapor de mercurio (MV)	Discontinuo con picos en 546 y 578 nm	3200 - 4000	60 (media)
LED	LED	Continuo en el visible	2700 - 5000	10 - 150 (baja)

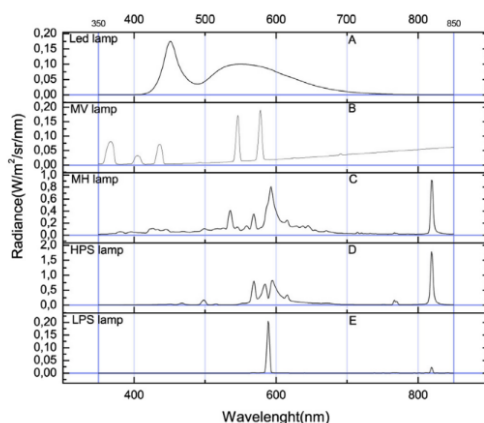


Figura 1.2: Distribución espectral de A) LED, B) Vapor de mercurio, C) Halogenuros metálicos, D) Sodio a alta presión y E) Sodio a baja presión (HA. Solano and Miroslav Kocifaj, 2013b)

1.3.3. Tipos de luminarias

Las luminarias son dispositivos que alojan y protegen la fuente de luz y reconduce la luz hacia donde se quiere iluminar (Gil et al., 2012). Para el caso del alumbrado público existen dos tipos: luminarias para vías principales (autopistas, carreteras) y luminarias para vías secundarias (calles) (Instituto de Transparencia, Acceso a la Información Pública, Protección de Datos Personales y Rendición de Cuentas de la Ciudad de México, 2019).

La forma en que la luminaria distribuye en el espacio la luz emitida por la fuente es fundamental en el efecto sobre el brillo del cielo nocturno. Marin (2009) propone el ángulo entre la línea vertical de la fuente de luz y la línea máxima a la que se ilumina (ángulo de apantallamiento) para garantizar un buen aprovechamiento de la luz y evitar que se desperdicie escapando hacia la atmósfera. El ángulo de apantallamiento ideal es por debajo de los 75° (A); para ángulos mayores a ese (B - E) existe afectación en diferente proporción al brillo del cielo nocturno (Figura 1.3).

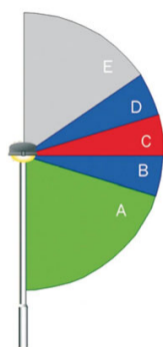


Figura 1.3: Ángulo de apantallamiento de luminaria (Marin, 2009)

1.3.4. Función de emisión urbana

La distribución angular de la luz emitida por una ciudad es fundamental para la modelación del brillo del cielo nocturno ocasionado por luz artificial (Miroslav Kocifaj and HA. Solano, 2014).

Las fuentes de luz artificiales (públicas y privadas) emiten luz en casi todas las direcciones (Miroslav Kocifaj and HA. Solano, 2014), (Miroslav Kocifaj and HA. Solano, 2016). Por lo tanto, la luz artificial emitida a la atmósfera se debe a la superposición de emisiones de las fuentes en la superficie tomando en cuenta su distribución.

La luz emitida por una región (o incluso a nivel fuente puntual) es caracterizada a través de una función de emisión parametrizada denominada Función de Emisión Urbana (CEF, por sus siglas en inglés) la cual únicamente depende de las características del sistema de iluminación de una ciudad (Miroslav Kocifaj and HA. Solano, 2014).

Debido a la falta, hasta la actualidad, de inventarios detallados de las fuentes de luz (públicas y privadas) y su naturaleza heterogénea, resulta extremadamente complicado obtener la CEF a través de estudios teóricos o experimentales (Miroslav Kocifaj and HA. Solano, 2014). Garstang (1986) desarrolló una aproximación semi-empírica para la estimación de la CEF basándose en datos poblacionales (emisiones de luz per cápita) que es ampliamente utilizada hoy en día.

1.4. Contaminación lumínica (CL)

Revisión de Tweets

Descripción: primero se aborda el enfoque filosófico (donde estoy parado) y la importancia base de la luz de los ecosistemas a los socioecosistemas.

Conclusión: la CL es producida por una visión no sustentable de los recursos”.

1.4.1. El enfoque socioecosistémico

Socioecosistema

1 Socioecosistema IES

2 De ecosistema a socioecosistema diseñado como territorio del capital agroindustria

3 Sistemas socio-ecológicos: elementos teóricos y conceptuales para la discusión en torno a vulnerabilidad hídrica.

1.4.2. Importancia del ciclo día-noche en la evolución de la vida

La duración del ciclo día-noche en la Tierra ha cambiado significativamente a lo largo de la historia geológica debido a la variación de la rotación del planeta. La velocidad de rotación original de los planetas es consecuencia de la conservación del momento angular que poseía la nebulosa interestelar que, al colapsar, dio origen al Sistema Solar hace aproximadamente 4600 Ma (?). Sin embargo, si la hipótesis del Impacto de Theia es correcta, es factible que la rotación primordial de la Tierra haya sido reconfigurada hace alrededor de 4500 Ma, cuando un cuerpo astronómico del tamaño de Marte, nombrado Theia, colisionó tangencialmente con nuestro planeta dando origen, además, a la Luna (Stevenson, 1987).

La masa lunar es lo suficientemente grande y cercana con respecto a la Tierra para ejercer atracción gravitatoria significativa sobre los océanos, generando así abultamientos de masas de agua (mareas) en ambos extremos del planeta alineados con el eje Tierra-Luna. Sin embargo, la rotación terrestre ocasiona el arrastre de las mareas hacia delante del mencionado eje, lo que implica que una fracción de la atracción gravitatoria Tierra-Luna está desfasada y da origen al torque lunar τ_0 que reduce la velocidad de rotación de la Tierra (Conway, 1982).

Como se muestra en la Figura 1.4, la duración que tuvo el día terrestre posterior a la gran colisión de Theia debió de ser de tan sólo 7 horas aproximadamente gracias a la gran velocidad de rotación y el cambio en la inclinación del eje de rotación que el planeta llegó a experimentar luego del evento (Stevenson and Bartlett, 2016), (Stevenson, 1987); con el paso de los millones de años, tal velocidad fue disminuyendo como consecuencia del torque lunar (Conway, 1982).

El periodo estable de duración del día terrestre de 21 horas que se mantuvo durante gran parte del Precámbrico (Figura 1.4) se explica con la llamada Hipótesis de Estabilización Resonante (Zahnle and Walker, 1987), la cual sostiene que, durante algún tiempo, el anteriormente mencionado torque lunar pudo haber sido cancelado por un torque de signo contrario originado por la resonancia entre las mareas atmosféricas semi-diurnas térmicamente accionadas y las oscilaciones libres de la atmósfera.

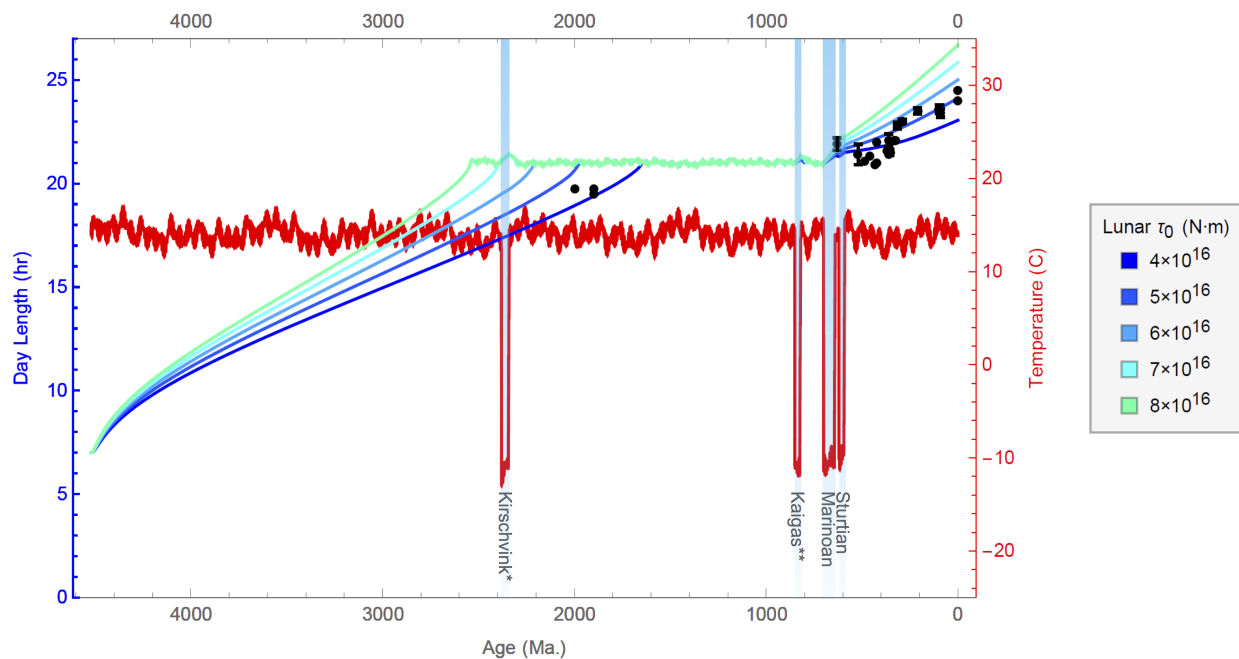


Figura 1.4: Simulación de la historia geológica de la duración del día terrestre (Stevenson and Bartlett, 2016)

La velocidad de rotación actual de la Tierra debió comenzarse a perfilar hace aproximadamente 600 Ma cuando las grandes glaciaciones de ese entonces pudieron haber desestabilizado térmicamente el torque atmosférico, por lo que actualmente, el torque lunar sigue siendo lo suficientemente considerable como para continuar disminuyendo la velocidad del planeta (Stevenson and Bartlett, 2016). Para el final del Criogénico, el ciclo día-noche tomó, finalmente, su configuración actual al mismo tiempo que los niveles de oxígeno y ozono estratosférico fueron óptimos para el surgimiento y desarrollo de vida más compleja (multicelular) en un evento conocido como *la Radiación del Cámbrico*, durante el que se originaron y diversificaron la mayoría de los filos animales incluyendo el de los cordados, al que pertenecemos los humanos.

Poner la gráfica de Holker. Oscuridad, ventaja evolutiva. Más horas de noche, mayor nocturnidad con el paso del tiempo. Diferentes tipos de visión.

1.4.3. Uso y abuso de la energía eléctrica

1.4.4. Tipos de CL

Skyglow de interés

1.4.5. Consecuencias de la CL

PRIMARIAS

En qué región del espectro se ven afectadas diferentes clases de animales de acuerdo con su visión (luminancia).

SECUNDARIAS

Podrían estimular la nucleación de partículas ultrafinas que se forman por reacciones fotoquímicas.

Calentamiento global

1.4.6. Contexto histórico del estudio de la CL

Revisión de la tesis de Héctor Linares

On the relation between zenith sky brightness and horizontal illuminance

Modelo teórico vs medidas experimentales con SQM

1.4.7. Marco regulatorio: normas y leyes en México y el mundo

PREOCUPACIÓN POR QUE LA LEGISLACIÓN FEDERAL SEA SUSTENTABLE Y CON BASES CIENTÍFICAS Y ESTUDIOS.

Ley 31/1998 Protección de la Calidad Astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias.

Ley 6/2001 Ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio nocturno.

Zonificación con 4 categorías y una especial.

- E1. Espacios que por sus características naturales o su valor astronómico especial, sólo se puede admitir un brillo mínimo.
- E2. Áreas incluidas en ámbitos territoriales que sólo admiten un brillo reducido.
- E3. Áreas incluidas en ámbitos territoriales que admiten un brillo medio
- E4. Áreas incluidas en ámbitos territoriales que admiten un brillo alto.
- Punto de referencia. Puntos cercanos a las áreas de valor astronómico o natural especial incluidos en E1, para los que hay que establecer una regulación específica en función de la distancia a la que se encuentren del área en cuestión.

Según el Departamento de Estudios Luminotécnicos de la ETSEIB (UPC) en *Evaluación del Impacto Ambiental Lumínico en Zonas Protegidas del Área Metropolitana de Barcelona*, los aspectos importantes para controlar la Contaminación Lumínica son:

- Niveles más estrictos a los permisos de las luminarias (Comité Internationale d'Eclairage)
- Límites de luminosidad en el espacio-tiempo (periodo de protección especial a partir de las 23 hrs.)
- Cambiar el uso de luz blanca (especialmente nociva) a una temperatura de color neutra (4200 K), promoviendo las cálidas (inferiores a 3000 K)

1.5. Estudio de caso: Ciudad de México

1.5.1. Descripción del área de estudio

División política, extensión, situación geográfica,
Incluir REPSA

1.5.2. Inventario de alumbrado público

Incluir número total de luminarias

1.5.3. Consumo de energía eléctrica

Datos de consumo de energía eléctrica por entidad federativa por el Sistema de Información Energética de la Secretaría de Energía.

Su relación con las emisiones de gases de efecto invernadero

1.5.4. Climatología de aerosol atmosférico y nubosidad

Artículo de Giovanni Caraballi

Mexico City is located in a sub-tropical zone where the seasons can be generally separated into three periods (Jáuregui, 2002; de Foy et al., 2005; Collins and Scott, 1993): the Dry Winter (DW) season from November to March, the Dry Spring (DS) season from April through May, and the RAiny (RA) season from June until October. The starting and ending dates for these seasons vary from year to year, but these

three seasonal periods will be employed in the analysis as an operational definition,

Qué nubes son típicas en cada estación del año: hurcanes vs frentes fríos

1.6. Hipótesis

1.7. Objetivos

1.7.1. Generales

- Reproducir el modelo *SkyGlow* para el caso de la Ciudad de México
- Estimar los niveles de contaminación lumínica en la Ciudad de México
- Generar un antecedente para la campaña de validación del modelo *SkyGlow* en la Ciudad de México

1.7.2. Particulares

- Caracterizar el alumbrado público de la Ciudad de México
- Elaborar un mapa teórico de contaminación lumínica de la Ciudad de México bajo condiciones de cielo despejado
- Construir mediante simulaciones diferentes escenarios del brillo del cielo nocturno tomando en cuenta diferentes posiciones del observador y condiciones atmosféricas
- Inferir la influencia del aerosol atmosférico y la nubosidad en el brillo del cielo nocturno a partir del objetivo anterior

Capítulo 2

Metodología

2.1. El software *Radiance Light Trends*

2.2. El modelo *SkyGlow*

Marco teórico del modelo SkyGlow

In general, if we want to know how radiation will be attenuated in the atmosphere by aerosols, gases and/or clouds we need to solve a radiation transfer equation, which requires information on optical properties of the gases and particulates (such as extinction coefficients, single scattering albedo, scattering phase function, etc.).

La radiancia espectral es un problema de transferencia radiativa que se puede resolver considerando condiciones de frontera:

Función de emisividad de la ciudad. Relativamente constante en el tiempo. Depende de la cantidad y tipo de luminarias, la geometría (tamaño) de la ciudad y la posición del observador.

Características fluctuantes de la atmósfera. Efecto del aerosol atmosférico o turbidez atmosférica (propiedades ópticas de bulto del aerosol) Contenido de agua líquida de las nubes que es función del tamaño de gotitas de nube y su densidad espacial así como su altitud en la atmósfera.

Depending on the city size, the distance to a hypothetical observer and the altitude of the cloud base, a city is split into

Urban night-sky luminance and cloud type 3

many pixels to keep the computational accuracy at a predefined level. Every pixel can be characterised by its geometrical position with respect to the observer, the total spectral radiant flux emitted to the upper hemisphere and spectral radiance as a function of zenith angle. These functions are provided for discrete wavelengths, thus simulating the weighted spectrum of all light sources (lamps) in a given pixel. Solano2015

Inputs del modelo

Correr el modelo sólo para 20 nm y así ahorrar tiempo de computación. Justificar por qué esto es representativo.

Productos:

Gráficas tipo all-sky de radiancia en puntos específicos de luz que llega desde todas partes del cielo (180 grados) o en el cenit.

Capítulo 3

Resultados y discusión

3.1. Tendencias de radiancia en las alcaldías de la Ciudad de México

3.2. Mapa de radiancia de la Ciudad de México

Tabla con niveles de radiancia en otras ciudades y comparar

3.3. Gráficas tipo *all sky* de distribución de radiancia

3.4. Experimentos numéricos

3.4.1. Cambio del tipo de luminarias en la Ciudad de México

LED, vapor de sodio

3.4.2. Influencia del aerosol atmosférico en la distribución de radiancia

En el cenit y en una esfera

3.4.3. Influencia de la nubosidad en la distribución de radiancia

The correct interpretation of sky radiance or luminance distributions experimentally determined under overcast conditions requires the theoretical treatment of light scattering processes in an inhomogeneous atmosphere. Solano 2015

En el cenit y en una esfera para TODO tipo de nubes

Capítulo 4

Conclusiones

Capítulo 5

Recomendaciones

Los resultados de este trabajo van encaminados a la legislación y técnicas de iluminación conociendo qué tipo de fuentes resultan más contaminantes.

Figura de Luis que hace necesario conocer como se comporta la luz en nube de hielo. Ya que son tan abundantes, valdría la pena investigar cómo se comporta la luz en una nube de hielo.

Estudios fotométricos en la REPSA para proponerlo como Urban Night Sky Place.^{en} el programa IDA.

Capítulo 6

Anexos

Los resultados de este trabajo van encaminados a la legislación y técnicas de iluminación conociendo qué tipo de fuentes resultan más contaminantes.

Referencias

- Born, M. and Wolf, E. (2003). Principles of optics. *Cambridge University Press*.
- Carabali, G., Estévez, H., Valdés-Barrón, M., Bonifaz-Alfonzo, R., Riveros-Rosas, D., Velasco-Herrera, V., and Vázquez-Gálvez, F. (2017). Aerosol climatology over the Mexico City basin: characterization of optical properties. *Atmospheric Research*, 194:190–201.
- Conway, B. A. (1982). On the history of the lunar orbit. *Icarus*, 51(3):610–622.
- Elvidge, C., Keith, D., Tuttle, B., and Baugh, K. (2010). Spectral identification of lighting type and character. *Sensors*, 10:3961–3988.
- Foot, J. and Leeson, M. (1987). Aerosol single-scattering albedo: a method for obtaining climatology data. *Atmospheric Environment*, 21(7):1665–1670.
- Garstang, R. (1986). Model for artificial night-sky illumination. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 98:364–375.
- Garstang, R. (1991). Dust and light pollution. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 103:1109–1116.
- Gil, M. G., Páramo, R. S. M., Solano, H., and Payàs, P. F. (2012). Contaminación lumínica. Una visión desde el foco contaminante: el alumbrado artificial. *Universidad Politécnica de Cataluña*.
- HA. Solano and Miroslav Kocifaj (2013a). Light pollution in ultraviolet and visible spectrum: effect on different visual perceptions. *PLOS ONE*, 8(2):1–15.
- HA. Solano and Miroslav Kocifaj (2013b). Skyglow effects in uv and visible spectra: radiative fluxes. *Journal of Environmental Management*, 127:300–307.
- HA. Solano and Miroslav Kocifaj (2014). Quantitative analysis of night skyglow amplification under cloudy conditions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 443:3665–3674.
- HA. Solano and Miroslav Kocifaj (2015). Urban night-sky luminance due to different cloud types: a numerical experiment. *Lighting Research and Technology*, 0:1–17.
- Halliday, D., Resnick, R., and Walker, J. (2008). Fundamentals of physics. *John Wiley and Sons, Inc.*
- Hanel, A., Posch, T., Ribas, S. J., Aubé, M., Duriscoe, D., Jechow, A., Kollath, Z., Lolkema, D., Moore, C., Schmidt, N., Spoelstra, H., Wuchterl, G., and Kyba, C. (2018). Measuring night sky brightness: methods and challenges. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 205:278–290.
- Holben, B., Eck, T., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J., Kaufman, Y., Nakajima, T., Lavenue, F., Jankowiak, I., and Smirnov, A. (1998). AERONET. A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1):1–16.
- Instituto de Transparencia, Acceso a la Información Pública, Protección de Datos Personales y Rendición de Cuentas de la Ciudad de México (2019). Consulta digital.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015). Encuesta intercensal.
- Kyba, C., Mohar, A., and Posch, T. (2017). How bright is moonlight? *Astronomy and Geophysics*, 58(1):131–132.
- Leinert, C., Bowyer, S., Haikala, L., Hanner, M., and Hauser, M. (1998). The 1997 reference of diffuse night sky brightness. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1(127):1–99.
- Lohmann, U., Luond, F., and Mahrt, F. (2016). An introduction to clouds: from microscale to climate. *Cambridge University Press*.
- Lot, A., Escobedo, M. P., Alarcón, G. G., and Palacios, S. R. (2012). Atlas de riesgos de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. *Coordinación de la Investigación Científica*.
- Marin, C. (2009). Starlight: a common heritage. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 5:449–456.
- Matthews, G. (2008). Celestial body irradiance determination from an underfilled satellite radiometer: application to albedo and thermal emission measurements of the Moon using CERES. *Applied Optics*, 47(27):4981–4993.
- Meyer, J. (1968). Radiometry and photometry: units and conversion factors. *Applied Optics*, 7(10):2081–2084.
- Miroslav Kocifaj (2007). Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources. *Applied Optics*, 46(15):3013–3022.
- Miroslav Kocifaj and HA. Solano (2014). Skyglow: a retrieval of the approximate radiant intensity function of ground-based light sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 439:3405–3413.
- Miroslav Kocifaj and HA. Solano (2016). Angular emission function of a city and skyglow modeling: a critical perspective. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 128:1–16.
- National Aeronautics and Space Administration (2007). Electromagnetic spectrum properties.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (2015). Estudios territoriales de la OCDE. Valle de México, México.
- Purcell, E. and Morin, D. (2013). Electricity and magnetism. *Cambridge University Press*.
- Ramos, L. and Montenegro, M. (2012). La generación de energía eléctrica en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(4):197–211.
- Schulte, N., Dannemann, E., and Meier, J. (2018). Light pollution. A global discussion. *Helmholtz Centre for Environmental Research*.
- Secretaría de Energía (2013). Prospectiva de petróleo crudo y petrolíferos 2013-2027.
- Stevenson, D. J. (1987). Origin of the Moon - the collision hypothesis. *Annual review of Earth and Planetary Sciences*, 15(1):271–315.
- Stevenson, D. J. and Bartlett, B. C. (2016). Analysis of a Precambrian resonance-stabilized day length. *Geophysical Research Letters*, 43(11):5716–5724.

- Stone, T. (2017). The value of darkness: a moral framework for urban nighttime lighting. *Science and Engineering Ethics*, 24(2018):607–628.
- Twomey, S. (1967). Light scattering by cloud layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24:70–79.
- Zahnle, K. and Walker, J. C. (1987). A constant daylength during the Precambrian era? *Precambrian Research*, 37(2):950–105.
- Zari, M. P. (2018). The importance of urban biodiversity - an ecosystem services approach. *Biodiversity International Journal*, 2(4):357–360.