

# Estimación de la iluminancia que contribuye a la contaminación lumínica en el Centro Histórico de la Ciudad de México

## Estimation of illuminance that contributes to light pollution in the Historic Center of Mexico City

Gabriel V. Hernández-Torres <sup>a,\*</sup>, Cecilia G. Guadarrama-Gándara <sup>a</sup>, Alejandro D. Infante-Rendón <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura - PMDA, Campo de Conocimiento de Tecnologías, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

### Resumen

La iluminación urbana tiene una importancia en la prolongación de las actividades nocturnas, ya que juega un papel crucial en la calidad de vida de los habitantes de las ciudades. El crecimiento poblacional a nivel mundial impulsa la expansión desmedida de las zonas urbanas, lo que a su vez provoca un aumento considerable en el uso de la iluminación que altera las condiciones naturales en el cielo. Esto trae como consecuencia una serie de efectos negativos en el medio ambiente y en la salud de los usuarios, por esto, se le considera a esta luz excesiva como contaminación lumínica. Este trabajo expone al lector los conceptos del problema y el trabajo experimental en donde se muestra las condiciones de iluminación en una de las principales calles del Centro Histórico de la Ciudad de México, donde se estimaron los niveles de iluminancia (lux) que hay en la superficie a nivel de pavimento que contribuyen a la contaminación lumínica del cielo.

**Palabras Clave:** Iluminación urbana, Contaminación lumínica, Resplandor luminoso nocturno, ODS, Iluminancia.

### Abstract

Urban lighting plays an important role in extending nighttime activities, as it is crucial to the quality of life for city dwellers. Global population growth drives the uncontrolled expansion of urban areas, which in turn leads to a significant increase in the use of lighting, altering natural conditions in the sky. This has a series of negative effects on the environment and on public health, which is why this excessive light is considered light pollution. This work exposes the reader to the concepts behind the problem and the experimental work that shows the lighting conditions in one of the main streets of the Historic Center of Mexico City, where illuminance levels (lux) on the pavement surface were estimated, contributing to the light pollution in the sky.

**Keywords:** Urban lighting, Light pollution, Sky Glow, SDG, Illuminance.

## 1. Introducción

El alumbrado público juega un papel crucial en el desarrollo económico, cultural y social de las ciudades (CONUEE, 2015). No solo porque la iluminación proporciona condiciones que facilitan la movilidad y permiten prolongar las actividades durante la noche, sino porque se asocia con las condiciones de vida de las sociedades desarrolladas. En la actualidad, más del 50% de la población mundial vive en entornos urbanos y se estima que para el año 2050 aumentará al 70% (Mahimunah, 2022). De modo que el crecimiento previsto de las ciudades requerirá de políticas públicas para garantizar condiciones de desarrollo, transporte, equidad o

seguridad, así como una planificación adecuada de la iluminación pública. Algunos autores (Tavares, et al., 2021) han identificado que la iluminación tiene un impacto directo en varias de las directrices de los Objetivos de Desarrollo Sustentable de la Agenda 2030, lo que motiva a valorar el impacto que el alumbrado público tiene en las ciudades y sus habitantes.

Por ello, así como el crecimiento de las ciudades es un reto para el desarrollo sostenible, también lo es el incremento del alumbrado en exteriores. Los astrónomos detectaron hace cincuenta años el impacto que tiene el exceso de luz en el cielo nocturno, pues impide la observación astronómica (ODS 18 - Calidad del cielo nocturno y acceso a la luz de las estrellas,

\*Autor para la correspondencia: gabomesaboogie@comunidad.unam.mx

**Correo electrónico:** gabomesaboogie@comunidad.unam.mx (Gabriel Valentín Hernández-Torres), ceciguadarrama@fa.unam.mx (Cecilia Genoveva Guadarrama-Gándara), alejandro.diazinfante@fa.unam.mx (Alejandro Díaz-Infante-Rendón).

2022); ahora se sabe que también afecta al medio ambiente, perturba la actividad nocturna de aves e insectos, así como los ritmos circadianos de animales, plantas y personas (González-Madrigal et al., 2020). A esta dispersión de la luz en la atmósfera se le conoce como contaminación lumínica y el principal factor que se atribuye a la producción de este contaminante es el alumbrado en exterior, sea público o privado, vial, urbano, publicitario o decorativo. Por lo que, para comprender con mayor precisión el fenómeno de la contaminación lumínica, este artículo expone algunos conceptos para comprender la temática, y también, se analiza de manera experimental las condiciones de los niveles de iluminación en un entorno urbano, esto tiene el propósito de determinar el valor de la iluminancia del alumbrado público y de la luz proveniente de la arquitectura que son algunas de las fuentes que contribuyen a la CL. Se realizaron mediciones de iluminancia (lux) en un eje vial dentro del primer cuadro del Centro Histórico de la Ciudad de México, debido a que desde el 2011 el gobierno de la ciudad ha elaborado para este espacio urbano planes integrales de desarrollo que involucraron la renovación o sustitución de luminarias; esto proporciona el escenario ideal para una evaluación. Este diagnóstico luminotécnico permitirá contribuir al planteamiento de estrategias para mitigar el impacto de la contaminación lumínica y diseñar estrategias para una aproximación holística a la iluminación urbana.

## 2. Iluminación Urbana

La luz es energía que emana una fuente luminosa, está compuesta por fotones y longitudes de onda que irradia en el espacio, y que, al llegar al ojo humano, estimula células fotosensibles generando la sensación de visibilidad. Este fenómeno permite conocer, entender y apreciar el mundo y su belleza (Guadarrama, 2017, p. 23). Es necesario recalcar que la luz es energía, mientras que la iluminación es la acción de dar provisión de luz de forma controlada (Ortiz, 2015, p. 10). Es decir, la iluminación es el acto de proporcionar visibilidad a un objeto o entorno al dirigir luz desde una fuente específica. Se piensa que el principio del concepto de iluminación es la luz; pero el propósito de la iluminación es la visualización del ambiente iluminado por una fuente de luz, por lo que resulta más importante prestar atención al efecto de iluminar una superficie que a la exclusiva selección de una fuente luminosa. Por tanto, el diseño de la iluminación se ha ido convirtiendo en una búsqueda por satisfacer las necesidades estéticas y de confort fisiológico de la vida humana (Kormazer, 2018, p. 9).

Rozman (2021, p. 2) define un lugar urbano como una construcción sociofísica constituida de edificios, calles, espacios, diferentes usos de suelo y, sobre todo, comunidades conformadas por usuarios. De modo que, basándose en Kormazer (2018), la iluminación urbana es una necesidad para los espacios exteriores e interiores, y esta necesidad consiste en iluminar objetos arquitectónicos como edificios, calles y espacios exteriores para conformar un entorno urbano que pueda ser visible de noche. La iluminación urbana hace uso de técnicas de iluminación, diseño urbano y teoría estética para embellecer los entornos urbanos y volverlos habitables. Así pues, la iluminación urbana puede ser identificada a partir de los siguientes usos:

- Iluminación de edificios (históricos, templos religiosos, edificios modernos).
- Iluminación de plazas
- Iluminación de zonas peatonales
- Iluminación de parques y jardines
- Iluminación de elementos de agua
- Iluminación de calles y avenidas vehiculares

Estos tipos de iluminación también tienen el objetivo de brindar seguridad, protección y dar visibilidad durante la noche, encontrar caminos que lleven en una dirección u otra, y, sobre todo, hacer posibles las actividades al aire libre durante el horario vespertino. Dichos elementos forman, según Kormazer (2018, p. 10), la identidad urbana que embellece a una ciudad. Por otra parte, se ha vuelto importante iluminar las fachadas, con lo cual se generan nuevas propuestas de diseño. La iluminación de fachadas y vialidades resalta los espacios exteriores y la imagen de los edificios modernos e históricos, pero cuando el diseño de iluminación no brinda la luz necesaria en un espacio urbano-arquitectónico, puede generar una serie de efectos negativos. La calidad de vida de los seres vivos sólo es posible si viven en un espacio iluminado adecuadamente. Una iluminación inadecuada provoca que un entorno sea inhabitable para los usuarios, ya sea que se trate de una carencia de luz, como de un exceso; con el tiempo, una luz artificial mal implementada genera una serie de problemas y consecuencias que trastocan la calidad de vida y salud de sus habitantes. Del mismo modo, una luminaria con las especificaciones que no se adecúan al contexto que se va a iluminar, provoca una falla de visibilidad debido a la insuficiencia de luz como al alto brillo de las lámparas; ya que la diferencia de contrastes en un entorno oscuro provoca que la percepción visual sea deficiente, esto genera incomodidad y reduce la capacidad de ver detalles y objetos (CIE. ILV, 2020). Así mismo, otro parámetro que se debe de considerar es el exceso de las lámparas, ya que, además de generar deslumbramiento, también ocasiona una repercusión en el rendimiento visual (Bozorg, C. Maksimainen, M. 2016), por lo que esto tiene un impacto directo en la salud y en el bienestar de los usuarios. Una iluminación urbana sustentable puede referirse a implementar un alumbrado con los niveles adecuados de luz que no afecte negativamente a los usuarios ni al medio ambiente, esto se logra por medio de la implementación de un alumbrado que mantenga los niveles de iluminación y espectro de luz apropiado en las calles y edificios.

## 3. Crecimiento de las ciudades

La iluminación en ciudades sostenibles equilibra diversas necesidades de iluminación de los seres humanos con el entorno natural, teniendo en cuenta las previsiones de globalización y de aumento de la población mundial. Para 2050, hasta el 68% de la población mundial vivirá en

aglomeraciones urbanas, lo que aumentará significativamente los focos de contaminación, incluyendo la luminosidad, y contribuirá al continuo deterioro del medio ambiente global, esto significa que estos problemas deben abordarse de la manera más estratégicamente posible, para que las ciudades nocturnas puedan satisfacer mejor las necesidades de sus habitantes, de ecosistemas urbanos enteros y del planeta (Zielinska y Bobkowska, 2022). Como mencionan Zielinska y Bobkowska (2022, p. 3), el aumento del alumbrado público debe tener un crecimiento racional, de forma ordenada y adaptándose a las necesidades ambientales y de los habitantes. Hoy en día las ciudades son protagonistas en el desarrollo de la humanidad, pero es necesario que esto suceda bajo un enfoque sustentable, ya que a nivel mundial, las ciudades son responsables del 80 % del producto interno bruto mundial, pero consumen el 60% de la energía producida, emiten el 70% del dióxido de carbono y producen el 70% de los desechos mundiales (Bruni y Doldan, 2019). El futuro de los países se encuentra en los entornos urbanos sostenibles y que brinden los servicios y requerimientos necesarios que permitan a los habitantes tener una buena calidad de vida. Por lo tanto, el desarrollo de una ciudad debe guiarse en un enfoque donde la arquitectura genere condiciones adecuadas de habitabilidad tanto de día como de noche. La tendencia de crecimiento de la población urbana en México permite afirmar que el tamaño de las ciudades presenta un crecimiento constante, y que es necesario que las ciudades tengan un crecimiento ordenado donde la iluminación juega un papel crucial para el desarrollo sostenible de las ciudades.

#### 4. Agenda 2030 para el desarrollo sustentable de las ciudades

Los Objetivos de Diseño Sostenible (ODS), incluidos en la Agenda 2030, representan un acuerdo suscrito por numerosos países para la reducción de contaminantes y preservar así un planeta saludable para las generaciones futuras. Estos ODS establecen una serie de metas, donde la iluminación representa un potencial para alcanzarlas. En este contexto, la iluminación urbana no representa solo un tema de apreciación estética, energía o seguridad, sino que tiene que ver con el confort visual, la salud, el bienestar y el cuidado del medio ambiente natural (Tavares, 2021). De las diecisiete directrices de los ODS, el objetivo número tres busca garantizar una vida sana y promover el bienestar, esto quiere decir que la iluminación desempeña un papel clave para proporcionar bienestar, pero dentro de este objetivo se encuentran dos sub objetivos que se enfocan en el tema del alumbrado de las ciudades que son: el *ODS 3.4* que está asociado a los efectos psicológicos y percepción visual, y el *ODS 3.6* que aborda los aspectos de seguridad del alumbrado, ofreciendo apoyo al tráfico y mejoramiento de la accesibilidad. Tavares (2021) también menciona que la iluminación exterior es una poderosa herramienta para apoyar los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Con un diseño profesional basado en conocimiento, se puede tener un impacto positivo en varios aspectos de la vida humana, así como en la calidad del medio ambiente y los niveles de eficiencia energética. Los sistemas de iluminación brindan la oportunidad de establecer un equilibrio razonable entre las necesidades de iluminación de los seres humanos y la sostenibilidad ambiental y la eficiencia energética (Tavares, 2021, p. 20).

Por otro lado, la vista es el principal sentido de los seres humanos para percibir e interactuar con el entorno visible (Gerrig, 2013, p. 85). Ahora, la tendencia de la dinámica urbana depende esencialmente de la percepción visual de los usuarios que habitan una ciudad para llevar a cabo sus actividades diarias (W.H.O., 2019, p. 9). En este sentido, se puede afirmar que el manejo de la luz artificial es responsable de la expansión de zonas iluminadas en una ciudad a un ritmo de 2.2 % anual (Kyba, 2017). La modificación de un entorno urbano a través de la cantidad y del espectro de la luz, también genera una serie de perturbaciones para los seres humanos y otros seres vivos (Tavares, 2021, p. 1). Estas perturbaciones por el exceso de iluminación están asociadas a problemas visuales y también se relacionan con enfermedades metabólicas.

#### 5. Contaminación Lumínica

La contaminación lumínica es la dispersión excesiva de luz proveniente de fuentes artificiales de iluminación, especialmente cuando la energía lumínica se radia y dispersa en la atmósfera durante la noche astronómica. Sin embargo, algunos autores mexicanos refieren este término a la luz artificial en el medio ambiente. Yáñez (2019) dice que la CL es el exceso de energía luminosa que emiten fuentes lumínicas artificiales durante el periodo nocturno, lo cual tiene repercusiones en aspectos físicos biológicos, humanos, económicos y sociales (Yáñez, 2019, p. 26). Mientras tanto, Muñoz (2020) define CL como la luz artificial que genera impactos negativos por malas prácticas de iluminación (Muñoz, 2020, p. 13).

Ahora bien, Karpinska (2020) diferencia la CL de otros tipos de contaminación de los ecosistemas, pero a diferencia de otro tipo de contaminantes, la luz es el factor principal que se le atribuye a los efectos negativos de las actividades humanas. La energía lumínica puede considerarse como un recurso bueno que ayuda a realizar actividades, pero se olvida que el exceso de iluminación con un espectro de longitudes cortas tiene impactos negativos en la salud, ya que puede ser un factor que cause trastornos hormonales, metabólicos, deficiencias de melatonina que deterioran la calidad del sueño. Más aún, tiene consecuencias negativas para el desarrollo de la flora y la fauna (Karpinska, 2020, p. 2).

Rozman (2021) menciona que la luz reflejada por las superficies iluminadas provoca el brillo del cielo y altera las condiciones naturales, lo que afecta a la fauna por ejemplo a insectos y pájaros, ya que estos se sienten atraídos por la luz artificial, lo que altera sus patrones de comportamiento, rutas migratorias y horarios reproductivos. Además, la luz nocturna propicia la depredación entre especies. En cuanto a las plantas, si están expuestas a luz artificial con espectro e intensidad, y dirección inadecuada durante periodos prolongados en la noche, aceleran su ciclo de crecimiento, lo que provoca una germinación y un crecimiento más rápido, altera la maduración y reduce el tiempo de vida de las plantas. En los seres humanos, la exposición inadecuada a la luz durante la noche puede estar asociada con un mayor riesgo de cáncer de mama y enfermedades gastrointestinales y cardiovasculares (Rozman, 2021, p.2).

Cetto (2021) menciona que la contaminación lumínica es toda la luz irradiada al hemisferio superior, y además

representa un gasto completamente inútil de energía (Cetto, 2021, p. 55). Para Solano (2020) “la contaminación lumínica debe entenderse como la diferencia entre la iluminación que se emite, con respecto a la cantidad real que se requiere. En una ciudad, la cantidad de contaminación lumínica generada depende de las acciones de los individuos socializados dentro de la comunidad y de todas las características que influyen en la sociedad, como las actividades económicas y culturales, los hábitos de consumo, y la estructura urbana” (Solano, 2020, p. 157). Dicho de otro modo, la contaminación lumínica es el efecto causado por el desarrollo y crecimiento de las ciudades.

También, se puede llamar contaminación lumínica a la alteración excesiva de luz artificial que modifica las condiciones normales de la bóveda celeste, es decir, cuando se genera un resplandor luminoso durante la noche. Se puede decir también que es la emisión del flujo luminoso de fuentes artificiales en intensidades, direcciones, horarios o rangos espectrales innecesarios para la realización de las actividades nocturnas previstas en la zona en la que se instalan las luces.

Crawford (2016) menciona que la iluminación nocturna exterior de mala calidad tiene varios problemas, por lo que clasifica la CL en: *luz intrusa*, *deslumbramiento*, *luz desordenada* y *resplandor luminoso nocturno* (Crawford, 2016, p.7).

- La *luz intrusa* se refiere a la derrama exterior que molesta al momento de incidir dentro de un espacio. La invasión de la luz es un problema especialmente grave para el público en general porque arruina la adaptación a la oscuridad para los observadores (Crawford, 2016, p.7).
- El *deslumbramiento* es el resplandor que no tiene utilidad. A menudo es un componente de los accidentes nocturnos (Crawford, 2016, p.8). Este tipo de CL es cuando el ojo queda totalmente aturdido por un exceso de luz con alta intensidad luminosa dentro del ángulo de observación de la vista. Genera una sensación de mancha blanca en el ojo que impide ver las diferencias de contraste causando molestia o irritación.
- La *luz desordenada* se caracteriza por ser de mala calidad, ya que congestiona un ambiente nocturno de las ciudades y en los campos. Puede causar confusión, en lugar de orientación. También se le considera a este tipo de luz como basura visual que perturba el ambiente nocturno por la mala implementación de luz artificial (Crawford, 2016, p.8). Al implementar desordenadamente fuentes de iluminación, causa sensación de desorientación al impedir observar claramente los objetos iluminados.
- Yañez (2019) menciona que la capa luminosa nocturna también se denomina *Sky Glow* o *resplandor luminoso nocturno*. Se caracteriza por ser un brillo artificial de tonalidad amarilla, naranja o blanca que resulta de la iluminación efectuada con lámparas y luminarias que permiten el escape o emisión multidireccional de la energía luminosa hacia el cielo.

## 6. Estudio e implicaciones de la Contaminación Lumínica

El fenómeno de la contaminación lumínica comenzó a atraer la atención de los investigadores a partir de la década de 70's, aunque ya existían antecedentes de la preocupación de los astrónomos por la interferencia de la luz artificial que dificultaba la observación del cielo (Meléndez, 2015, p. 47). De igual modo, especialistas de diversas áreas del conocimiento se han dado la tarea de estudiar el fenómeno debido al aumento significativo que la iluminación nocturna artificial ha tenido a causa de la expansión de las ciudades y las problemáticas relacionadas con este tipo de contaminación (González-Madrigal et al., 2020).

Existen diversos modelos matemáticos para cuantificar la contaminación lumínica que se apoyan de la observación, así como de registros satelitales o de campo. Sin embargo, se pueden utilizar técnicas de medición fotométrica y cálculo en un sitio determinado, lo que permite entender el comportamiento físico de la luz artificial dentro y fuera de un espacio arquitectónico, así como en un entorno urbano. Aunque el análisis y comprensión de este fenómeno pueden ser complejos, una aproximación mediante el estudio del entorno iluminado puede ofrecer elementos suficientes para entenderlo. Al mismo tiempo, varias investigaciones recalcan la necesidad de hacer estudios para abordar el problema de la contaminación lumínica desde un enfoque transdisciplinario. Díaz-Infante et al. (2022) destacan que en la actualidad son escasos los estudios teóricos y experimentales que analizan las fuentes de contaminación, debido a la falta de dispositivos de medición especializados y a la carencia de datos estadísticos sobre la cantidad de iluminación público-privada de las ciudades. Por lo que resulta necesario realizar estudios fotométricos para caracterizar el entorno urbano iluminado, y con ello identificar las posibles causas que provocan la contaminación.

### 6.1. Implicaciones de la CL enfocados a la salud del ser humano

Los sistemas visual y circadiano se ven afectados por la intensidad y reproducción espectral de las fuentes de iluminación. Aunque ambos sistemas comparten la característica de utilizar el ojo como órgano fotosensible que transmite información al cerebro, y la luz como fuente de esa información (Lira-Oliver, 2006, p. 32), las propiedades físicas de una fuente luminosa, más allá de su intensidad, influyen de manera diferente en cada sistema. Por tanto, el diseño adecuado de la iluminación debe considerar el funcionamiento de ambos sistemas. Aunque la tecnología de la iluminación urbana ha mejorado enormemente para proporcionar eficiencia y claridad visual, sigue aún pendiente el diseño adecuado para contemplar las implicaciones de los sistemas visual circadiano a partir de las propiedades espectrales de los luminarios.

#### 6.1.1. Afectación al Sistema Circadiano

El sistema circadiano interpreta la información de la luz visible para regular funciones biológicas como el sueño y la

vigilia, la temperatura corporal, la secreción hormonal y otros parámetros fisiológicos, incluida la función cognitiva y las respuestas inmunitarias. El sistema circadiano también está relacionado con funciones psicofísicas como el estado de ánimo, el rendimiento y el estado de alerta (Lira-Oliver, 2006, p. 32).

El impacto que tiene la luz en el sistema circadiano está asociado con la producción de melatonina (Brown, 1994; Lockley, 2009), la cual se produce durante la noche (Lucas, 2013), e influye en funciones importantes para nuestro organismo, como la calidad del sueño, el estrés, y actividades antiinflamatorias y antioxidantes (Houser y Esposito, 2021). En cuanto a la intensidad de la luz, la iluminancia mínima necesaria para interrumpir la producción de melatonina durante la noche en humanos es de 0.1 lux (Grubisic, 2019).

### 6.1.2. Afectación al Sistema Visual

Los sistemas visuales interpretan la información de la luz visible para construir una representación del mundo que rodea el cuerpo y reconstruye un mundo tridimensional a partir de una proyección bidimensional de ese mundo (Lira, 2006, p. 32).

El contraste y la agudeza visual están directamente implicadas en la mejora de las condiciones visuales. Por ejemplo, un estudio muestra que la mejora del rendimiento visual se logra, aumentando el contraste en escenarios viales, al conciliar el nivel de iluminación de las luminarias de la calle y de los faros de los automóviles (Bozorg, 2016). El rendimiento visual también depende del espectro de luz: a niveles de iluminación bajos (visión mesópica), las longitudes de onda cortas tienen más eficacia lumínica que las longitudes de onda largas del espectro visible (Elohoma, 2006). Por ejemplo, en caso de utilizar lámparas con el espectro y potencia incorrectas en avenidas y edificios, genera distracción en el observador, esto provoca accidentes vehiculares, ya que puede deslumbrar a los conductores por diferencia de contraste. Incluso, un ambiente oscuro con resaltos de puntos de luz de alta potencia puede provocar una ceguera temporal. Además, una iluminación inadecuada puede ocasionar dolores de cabeza y migrañas e incluso daños en la visión.

## 7. Posturas y herramientas de medición de la CL

Para medir el fenómeno de la CL, y posteriormente generar propuestas de solución al problema, existen diferentes posturas y herramientas para evaluar el fenómeno. Tavares (2021) menciona que se pueden utilizar los mapas de iluminación con datos adquiridos a través de la detección remota de la emisión de luz mediante mediciones terrestres en combinación con sistemas aéreos no tripulados y satélites para cuantificar la contaminación lumínica. Las mediciones en tierra incluyen equipos como cámaras multispectrales y espectrómetros para medir la radiación incidente y reflejada en las superficies. Los Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) se han popularizado con los drones. Pueden equiparse con equipos radiométricos para adquirir datos de iluminación aérea. El uso de drones promueve no solo mapas de iluminación aérea de alta resolución, sino también la detección de luminancia desde diferentes ángulos de visión. Además, el UAV también se puede aplicar como un *Drone-Gonio-Photometer* (DGPM) para construir diagramas polares fotométricos de distribución

de intensidad de iluminación para cuantificar el brillo del cielo de áreas grandes (Tavares, 2021, p. 12).

Otra herramienta frecuentemente utilizada para medir la CL es un dispositivo electrónico que se llama *Sky Quality Meter* (SQM). “Este aparato ofrece medidas fotométricas en unidad de medida mag/arcsec<sup>2</sup>, la ventaja de este dispositivo radica en su portabilidad” (Yáñez, 2019, p. 51). La unidad de medida arsec<sup>2</sup> sirve para medir el brillo del cielo en un campo visual de 20 grados de anchura centrado en el cénit y proporcionan resultados expresados en unidades de magnitudes por segundo de arco al cuadrado. Además, tiene una relación de la cantidad de estrellas que se pueden ver en cielo, en función a la mancha de brillo (luminancia) generada por la CL.

La iluminación urbana en calles es la iluminancia que aporta principalmente al fenómeno del brillo del cielo nocturno y de los otros tres diferentes tipos de CL. Yao (2018) menciona que en la actualidad, los principales enfoques para medir la iluminación vial son los medidores de iluminancia/luminancia y los fotómetros de imágenes. La medición del alumbrado público es logísticamente difícil. La CIE 115:2010 requiere que se registren aproximadamente 30 mediciones en posiciones equiespaciadas entre luminarias, lo cual es una tarea importante (Yao, 2018, p.1). Las mediciones de iluminancia vial permiten estimar los flujos luminosos reflejados en las superficies, como pavimentos y fachadas, proporcionando una evaluación cuantitativa de la cantidad de luz que existe en un entorno urbano. Los datos que se obtienen son esenciales para determinar si las condiciones lumínicas son adecuadas, comparándolos con las normativas de alumbrado público vigentes. Por ejemplo, la normativa chilena CVE 2391423, actualizada en 2023, y la Ley 6/2001 de Cataluña establecen un rango adecuado de iluminancia entre los 10 y 20 lux, lo que asegura una correcta iluminación en vías públicas en este rango. Se debe agregar también que Yao (2018) menciona que algunas normas recomiendan que la iluminación vial tenga valores de iluminancia horizontal-vertical promedio de 15 y 5 lux. En México, el rango de iluminancia mínima promedio es de 17 lux para vías principales y ejes viales (Secretaría de Energía [SE], 2013, p. 5).

## 8. Metodología

Al analizar los conceptos anteriores, es necesario mencionar que el problema de estudio es la capa luminosa que se genera en la tropósfera durante la noche. Este fenómeno se genera a través de la emisión directa de la luz artificial de las ciudades, es así como dicha emisión ocasiona la alteración de las condiciones normales de la bóveda celeste ya que el exceso de luz radiada de las superficies urbanas se refleja hacia el cielo.

El desarrollo metodológico que se empleó para estimar la cantidad de luz en una avenida en específico que conforma el polígono del Centro Histórico de la Ciudad de México tiene un carácter de ruta cuantitativa. Cabe señalar que las investigaciones de ruta cuantitativas son las ideales para estimar magnitudes y ocurrencias de los fenómenos, y al mismo tiempo, probar las hipótesis. También los estudios que se plantean con este tipo de ruta pueden dirigirse a varios propósitos, pero siempre existe la intención de estimar magnitudes o cantidades para probar una hipótesis y teoría (Hernández, 2018, p. 40). La estimación será por medio de la

medición de la iluminancia con instrumentos especializados de medición del rango visible del espectro electromagnético.

Las mediciones que se obtuvieron en este trabajo experimental fueron continuas en un horario determinado de una sola noche. Sin embargo, sobre las mediciones que se realizaron, se estimó la distribución lumínica sobre un plano de trabajo a nivel del toldo de un vehículo.

Este análisis lumínico se llevó a cabo en el Eje Central Lázaro Cárdenas, Colonia Centro Histórico, Alcaldía Cuauhtémoc, Ciudad de México, en el perímetro oeste. Además, las mediciones de iluminancia en un eje vial ayudan a determinar la cantidad de luz producida por la arquitectura y el alumbrado público. Este estudio pertenece a la primera etapa experimental de mediciones, en la que se determinó la cantidad de iluminancia (lux) mediante mediciones fotométricas con el fin de medir la luz reflejada que contribuye a la contaminación lumínica del cielo nocturno.

Posteriormente, se analizaron los resultados obtenidos y se empataron los datos con las ubicaciones recabadas de un geolocalizador, esto ayudó a saber la ubicación exacta de acuerdo con la hora en que se realizó la medición de iluminancia y con ello, se identificó la posición con coordenadas geográficas para ubicar los cruces de las entre calles sobre el Eje Central Lázaro Cárdenas. Como marco de referencia para la realización de este trabajo experimental, se encuentra la NOM-013-ENER-2013 que marca el rango de iluminancia mínima promedio y la relación de uniformidad promedio para variables con pavimento tipo R1 y R2 (Superficie de asfalto). Para este caso particular el mínimo valor de referencia de iluminancia es de 17 lux. Ver Tabla 1.

Tabla 1. Iluminancia mínima promedio de la NOM-013-ENER-2013.

Clasificación de Vialidad	Iluminancia Mínima Promedio [lx]	Relación de Uniformidad promedio máxima $E_{prom}/E_{min}$
Autopistas y carreteras	6	3 a 1
Vías de acceso controlado y vías rápidas	14	3 a 1
Vías principales y ejes viales	17	3 a 1
Vías primarias y colectoras	12	4 a 1

El problema que se identificó es la contaminación lumínica generada por la iluminación urbana reflejada en la superficie de las calles y edificaciones. Por lo tanto, el objetivo fue estimar los niveles de iluminancia (lux) provenientes de fuentes de iluminación urbana que hay sobre un eje vial. Se formuló una hipótesis nula y, posteriormente, se planteó una hipótesis alterna de trabajo, la cual se presenta a continuación:

Hipótesis nula: Iluminancia (REAL) es igual a la iluminancia (NOM).

$$H_0 = Er = En \quad (1)$$

En donde,

- $H_0 = \text{Hipótesis nula.}$
- $Er = \text{Iluminancia Real.}$

- $En = \text{Iluminancia [NOM-013-ENER-2013; 17 (lux)].}$

Hipótesis alterna: Iluminancia (REAL) es mayor a la iluminancia (NOM).

En donde,

- $Ha = Er > En.$
- $Ha = \text{Hipótesis alterna.}$
- $Er = \text{Iluminancia real.}$
- $En = \text{Iluminancia [NOM-013-ENER-2013; 17 (lux)].}$

Este trabajo tiene el propósito de demostrar que no es cierta la igualdad de la iluminancia medida (1) en campo, con la iluminancia mínima de referencia de la NOM-013, que en este caso es igual a 17 (lux). El equipo que se empleó para registrar los valores de iluminancia (lux) exterior a nivel de vialidad fueron dos fotómetros de iluminancia HOBBO-Pendant MX Temp (MX2201) y posteriormente, un medidor de iluminancia SEKONIC SPECTROMETER C-800. El parámetro que se estimó fue la iluminancia, que se define como el flujo luminoso por unidad de área. La unidad de medición es en lux (lx), que se refiere a la iluminancia producida por un lumen (lm) incidente en un m<sup>2</sup> (Szokolay, 2008, p. 143). En ocasiones se utiliza el término de niveles de iluminación como sinónimo de iluminancia (IESNA, 2000).

Se instaló el equipo de medición fotométrico en un objeto móvil controlado, que en este caso fue un automóvil. *El plano de trabajo* es de una altura de 1.46 m. Se colocaron los sensores a dicha altura ya que, si se midiera a ras de suelo (0 m), los autos arrojarían sombras sobre el equipo de medición, de forma que la precisión de los datos que se obtuvieran se vería comprometido. Se colocaron dos dataloggers marca HOBBO MX 22001 a 1.46 m del piso al toldo de un vehículo. Se pusieron de manera horizontal con la cara del sensor hacia arriba apuntando al cenit. Los dataloggers se pusieron en la parte central del automóvil. Se requirió de dos HOBOS ya que el primero hizo la medición y el segundo fue de respaldo. Ver figura 1.



Figura 1: Posición de sensores en toldo de vehículo.

Se fijaron adecuadamente los dos sensores a la estructura de montaje con cinta azul, a una distancia entre sí de dos

centímetros. Se utilizó un nivel para asegurar que los dos HOBO estuvieran en una posición horizontal de  $0^\circ$ . Se utilizó la misma cinta azul para cortar dos trozos que se pegaron en los dos extremos del hobo para nivelarlo. Ver Figura 2.

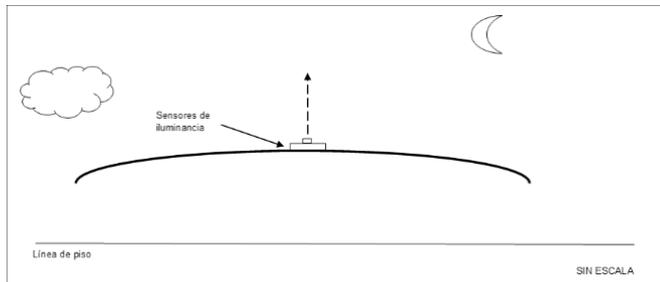


Figura 2: Diagrama de colocación de sensores.

Los sensores quedaron bien adheridos al toldo del vehículo, pues se verificó que estuvieran fijos y no tuvieran movimiento. Ver figura 1. 7

En caso de que las pilas se quedaran sin energía, se previó despegar el sensor del toldo y hacer recambio de pilas. Se realizó una prueba con el vehículo estático para comprobar que los equipos funcionaran correctamente.

Se utilizó la aplicación de HOBObconnect, y se verificó que el parámetro de medición fuera iluminancia (lux). Se verificó que la conectividad inalámbrica del sensor y el recolector de datos en el teléfono móvil funcionara. Se verificó la hora de encendido de los sensores que fue en un horario de 7:00 pm y el apagado a las 9:30 pm.

Se descargó la aplicación Geotracker en el teléfono móvil con sistema operativo Android. Se verificó que el recolector de datos tuviera la carga suficiente de batería. Se verificó que el geolocalizador funcionara adecuadamente con los datos móviles.

Se hizo una prueba con el vehículo estático para comprobar que los equipos funcionaran correctamente con la aplicación del geolocalizador y de los sensores.

Después, se programó y verificó las coordenadas de los equipos. El inicio de captura de datos de geolocalización comenzó a las 9:21 pm y terminó de recolectar datos de geolocalización a las 10:54 pm.

Después, se delimitó un cuadrante de estudio en el que se pudieran realizar mediciones de iluminancias a nivel de calle en vías automovilísticas.

De acuerdo con el Plan Integral de Manejo del Centro Histórico, la zona se limita como se muestra en la Figura 3. Este proyecto plantea 25 mediciones, un número cercano a lo que propone la CIE 115:2010 que son 30 mediciones en un cuadrante urbano, pero para este experimento inicial, se realizó solo una medición lineal sobre una calle, que en este caso fue el eje Central Lázaro Cárdenas.

Se estableció el inicio del recorrido con los sensores encendidos y el Geotracker en funcionamiento a partir de que el vehículo se encontrara en movimiento en eje Central Lázaro Cárdenas.

La distancia de la medición fue de 640 m. Ver vector morado de la Figura 3.



Figura 3: Trayecto de medición en el área de estudio.

La medición del tramo seleccionado se realizó el día 07/02/2022, en horario de 22:20:06 a 22:21:50 pm, de la sección de medición del Eje Central Lázaro Cárdenas, del tramo de República de Uruguay a Donceles ya que es la parte intermedia de la avenida en donde se encuentran los cuadrantes intermedios como Madero y Sector Financiero; Sur de Alameda y Alameda San Hipólito, y en dichos cuadrantes hay un mayor flujo de transeúntes, y además, se encuentran hitos arquitectónicos que destacan en este tramo como: el edificio La Nacional, la Torre Latino Americana, el Edificio Guardiola, y el Palacio de Correos, por lo que a simple vista existe una percepción de mayor iluminación en este tramo, por esto surgió el interés de medir en esta parte de la avenida. La medición se realizó en zona exterior a nivel vialidad con una dirección de sur a norte. La época del año en que se hizo esta medición fue en tiempo de invierno con cielos despejados en un 90% - 100% (Jáuregui, 2000), es importante mencionar este punto, ya que la luz reflejada del tipo de cielo tiene injerencia en la medición porque el medidor es sensible a la luz reflejada en su foco de captura. La medición se realizó de noche y en horario no concurrido de tráfico sobre el carril central de la calle para que los HOBOS midieran la iluminancia de ambos lados de la calle. El trayecto que se realizó fue de una distancia de 640 m (medido en Google Earth) en 1 minuto con 51 segundos. Se mantuvo una velocidad constante de 30-40 km/h, y además, se determinó realizar esta medición en este horario porque la carga de tráfico vehicular es menor.

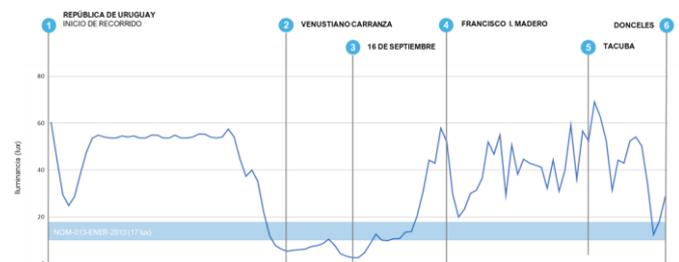


Figura 4: Resultados de iluminancias (lux) en tramo Av. Lázaro Cárdenas.

Con respecto a la utilización de los dos HOBO para este caso en particular, se requirió la utilización de la aplicación Geotracker GPS en conjunto con la aplicación de HOBObconnect para estimar los niveles de iluminancia a cada  $\frac{1}{2}$  metro. Los datos obtenidos se trasladaron a un archivo *xlxs*.

Posteriormente, se graficaron los resultados obtenidos con el medidor. Ver Figura 4. En una segunda etapa de recorridos para medir los niveles de iluminancia en la fecha 28/03/2024, se utilizó como apoyo complementario un medidor SEKONIC SPECTROMETER C-800. Se debe mencionar también que esta herramienta es útil para medir luz en superficies planas, por lo tanto, se midió simultáneamente con este espectrómetro la parte interna del automóvil (cerca del parabrisas), para recabar datos de iluminancia a cada entrecalle.



Figura 5: Medición (E) Eje Central Lázaro Cárdenas (Uruguay-Donceles).

En la Figura 5 se muestra la obtención de datos de Iluminancia (E) con el Medidor de Iluminancia SEKONIC SPECTROMETER C-800 desde el interior del automóvil. El dato se capturó en el Eje C. Lázaro Cárdenas. Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes:

- CCT (Temperatura de color): 4404 Kelvin.
- Lux (Flujo luminoso): 36.1 lux (Por arriba del rango mínimo de 17 lux de la NOM-013).

Para este trabajo de investigación se está considerando la postura de Yao (2018) con el propósito de realizar una evaluación de la contaminación lumínica en una calle que conforma un entorno urbano. Se tomaron las mediciones con ayuda de medidores de iluminancia para medir intensidades lumínicas reflejadas en las superficies de pavimentos y en fachadas. Se estimó la iluminancia del eje vial, lo que ayudó a saber cuantitativamente cuánta luz hay, y esto permitió saber si efectivamente las condiciones luz nocturna de un entorno urbano son adecuadas a la vista de los datos y según la NOM-013-ENER-2013, que establece que el rango mínimo adecuado de iluminancia es de 17 lux. Ver línea achurada azul de la Figura 4.

## 9. Discusión de datos

Tras realizar las mediciones y graficar los resultados obtenidos durante el periodo de análisis, se identificaron los puntos que generan variaciones en la iluminancia, y también se observó que los niveles de luz en las vialidades superan el

rango de luminancia mínima promedio de 17 lux establecido por la NOM-013-ENER-2013.



Figura 6: Eje Central Lázaro Cárdenas.

Al iniciar el recorrido se obtuvo como medición inicial 60 lux. Luego, al circular la calle con dirección al norte en el carril central del Eje Central Lázaro Cárdenas, disminuyó el nivel de iluminancia, pero al avanzar unos cuantos metros, el índice volvió a subir manteniéndose en una constante de 55-57 lux. Al acercarse al tramo del cruce con la calle de Venustiano Carranza, el nivel de iluminancia disminuyó considerablemente, incluso por debajo del rango de los 17 lux que marca la norma. Se debe aclarar que estas disminuciones de luz se deben a los follajes de las copas de los árboles que tapan la luz, además de que algunos edificios tenían apagadas las luces en las plantas altas. Siguiendo la ruta hacia el norte sobre la avenida vehicular, del tramo de Venustiano Carranza al cruce con la calle 16 de septiembre, vuelve a disminuir los niveles de iluminancia, con mediciones de entre 5 y 10 lux. Al acercarse al cruce de la calle de Francisco I Madero, este es un nodo donde se encuentran tres hitos arquitectónicos que son: la Torre Latinoamericana, el edificio La Nacional y el Palacio de Bellas Artes. En este tramo la iluminancia sobre la vialidad vuelve a incrementar hasta llegar al nivel de los 55 lux. Ver Figura 4 y 6. Al seguir el eje de la ruta, vuelve a haber una disminución en el nivel de iluminancia manteniéndose entre los 40 y 60 lux con algunos altibajos. Del tramo de Tacuba hacia el cruce con la calle de Donceles, la iluminancia comienza a disminuir considerablemente hasta el rango de 10-20 lux. Al llegar a este punto, se giró a la derecha con dirección este sobre la calle de Donceles, donde termina esta primera medición. En un diagnóstico general, se determinó que la Avenida Lázaro Cárdenas presenta un índice de seguridad medio para los peatones. Durante el día, es una zona concurrida con puestos ambulantes, mientras que por la noche se convierte en una calle solitaria, lo que aumenta el riesgo debido a su cercanía con calles donde hay bodegas y locales de comercios cerrados. A medida que avanza la noche, disminuye el tránsito de personas, lo que ha llevado a que esta avenida esté sobreiluminada. La iluminación en este vector de análisis se encuentra por encima del rango de los 17 lux, ya que existen puntos de medición que sobrepasan y están por debajo de los 50 lux como sucede en el cruce con Madero y Tacuba. Otro dato para considerar es que la temperatura de color que se

estimó en la segunda etapa de mediciones con el espectrómetro SEKONIC rondaba en los 4000 Kelvin, lo cual es una luz fría que contiene espectralmente más azules, por lo que afecta al sistema circadiano, ya que es una luz molesta que suprime la melatonina y perjudica a transeúntes y automovilistas.

## 10. Conclusiones

La contaminación lumínica es resultado de la sobreiluminación que se asocia al crecimiento urbano, es de suma relevancia estudiar este fenómeno para implementar soluciones que ayuden a disminuir su mitigación, ya que en los últimos años ha tenido un impacto negativo en el medio ambiente y en los habitantes de las ciudades. En respuesta a esta situación, es esencial desarrollar e implementar sistemas de iluminación que no solo satisfagan las necesidades humanas, sino que también promuevan la sostenibilidad para el desarrollo urbano y optimice el uso de la energía eléctrica.

Es importante mencionar que un exceso de lámparas en una calle no garantiza la seguridad, se debe de mantener los niveles de iluminación adecuados en las calles, basándose en las recomendaciones de las normas correspondientes para el alumbrado público, y así, evitar dejar espacios completamente con luz excesiva o espacios totalmente oscuros en áreas en donde se requiere iluminación para que el tránsito peatonal y vehicular sea seguro.

Aunque la tarea de iluminar correctamente las ciudades puede parecer desafiante, es factible si se aborda desde un enfoque de iluminación urbana sustentable que genere las condiciones óptimas de habitabilidad nocturna, y también, que considere la implementación ordenada y racional de tecnologías, intensidades y espectro para edificios y espacios urbanos, y así pues, disminuir los flujos de luz que se reflejan en las superficies y se dispersan hacia el cielo nocturno.

En este artículo se expuso un experimento que ayudó a comprender con mayor precisión una de las tantas vertientes que causan el fenómeno de la CL, que en este caso fue la luz que genera los luminarios exteriores. Se midió la iluminancia (lux) en un eje vial dentro del primer cuadro del Centro Histórico de la Ciudad de México. Al recabar y procesar la información, se mostró que la luz en esta vialidad en un horario vespertino rebasa y está por debajo del nivel de los 17 lux, esto ayudó a comprobar mediante una hipótesis nula que los niveles existentes de iluminación rebasan lo establecido a la norma de análisis que en este caso fue la NOM-013-ENER-2013, dicha norma establece los requisitos y medidas que deben cumplir los sistemas de iluminación y alumbrado público.

En el tramo de análisis, los niveles de iluminación presentaron diferencias importantes. En algunas partes del recorrido, los niveles de iluminancia estaban por debajo del rango mínimo que establece la norma, estos niveles rodaban

entre 5 y 10 lux, mientras que, en otros puntos de la medición, los niveles de iluminación sobrepasan los 60 lux, esto provoca que existan diferencias de contrastes en la calle de estudio y además, este nivel de iluminancia, también causa que la luz reflejada en superficie contribuya al resplandor luminoso del cielo.

Por último, es fundamental realizar mediciones fotométricas que permitan evaluar las condiciones actuales de iluminación en un entorno urbano, esto ayuda a verificar si los niveles de luz nocturna son o no los adecuados en una zona en específico. De igual forma, este tipo de estudios son de utilidad para contribuir a la información existente de otras investigaciones, y se pueden promover para generar modelos de diseño de iluminación urbana que se basen en recomendaciones que consideren la implementación, operación y mantenimiento de los sistemas de iluminación de las ciudades para disminuir el flujo de luz que se dispersa en el cielo, y con esto, se puede favorecer el desarrollo sustentable para brindar mejores condiciones de vida para los habitantes de las ciudades.

## Abreviaciones y Acrónimos

CL (Contaminación Lumínica)  
 CDMX (Ciudad de México)  
 CIE (Comisión Internacional de Iluminación)  
 DGPM (Drone-Gonio-Photometer)  
 E (Iluminancia)  
 SQM (Sky Quality Meter)  
 ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible)  
 UAV (Vehículos Aéreos No Tripulados)

## Agradecimientos

A la Dra. Cecilia Guadarrama y al Mtro. Alejandro Díaz-Infante por toda la ayuda brindada para la realización de este proyecto. Al Dr. Carlos Bigurra por la divulgación y la oportunidad de publicar este trabajo. Al CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías) por el apoyo para realizar esta investigación.

## Referencias

- Brown, G.M. (1994). Light, melatonin and the sleep-wake cycle. *J. Psychiatry Neurosci.* 19-345.
- Bozorg Chenani. (2016). The effects of dimmable road lighting: A comparison of measured and perceived visibility. *Transp. Res. Part F. Traffic Psychol. Behav.* 43, 141–156.
- Bozorg Chenani, S.; Maksimainen, M.; Tetri, E.; Kosonen, I.; Luttinen, T. (2016). The effects of dimmable road lighting: A comparison of measured and perceived visibility. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 43, 141–156.
- Bruni, L y Doldan, L. (2019, May 20). El siglo de las ciudades: los desafíos de la urbanización. *Perfil*. <https://www.perfil.com/noticias/educacion/el-siglo-de-las-ciudades-los-desafios-de-la-urbanizacion.phtml>
- Cetto A., Pérez de Célis, M. (2021). Luces sobre la ciudad. *Vol 72. Ciencia. México.*

- CIE. ILV. (2020). *International Lighting Vocabulary*, 2nd ed.; CIE S 017/E. CIE: Hong Kong, China.
- Crawford. (2016). *Light Pollution a problem for all, for us*. <https://www.cambridge.org/core/journals/international-astronomical-union-colloquium/article/light-pollution-a-problem-for-all-of-us/9889A92B1C6CE54AB7E8A4FAA3399D2F>
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía – CONUEE. (2015). *Estados y municipios Alumbrado público: definición y función*. Gobierno de México. URL <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/estados-y-municipios-alumbrado-publico>.
- CVE 2391423. (2023). *Norma de luminosidad artificial generada por alumbrados de exteriores*. Chile.
- Díaz-Infante, A., Solano, H., Guadarrama, C. (2022). *Cielos oscuros/Dark Skies*. UNAM Internacional. <https://revista.unaminternacional.unam.mx/nota/3/cielos-oscuros-su-importancia-y-la-necesidad-de-protgerlos>
- Eloholma, M. (2006). *Visual performance in night-time driving conditions*. *Ophthalmic Physiol. Opt.* 2006, 26, 254–263.
- Gerrig, R. J. (2013). *Psychology and Life*, 20th ed.; Pearson: Boston, MA, USA, 2013; p. 85.
- González-Madrugal, J., Solano-Lamphar, H., & Ramírez, M. (2020). *La contaminación lumínica como aproximación a la planeación urbana de ciudades mexicanas*. *EURE (Santiago)*, 46(138), 155–174.
- Grubisic, M. (2019). *Light Pollution, Circadian Photoreception, and Melatonin in Vertebrates*. *Sustainability*. 11, 6400.
- Guadarrama, C. (2017). *Luz natural en la arquitectura. Aportaciones científicas, tecnológicas y de diseño*, [tesis de doctorado]. UNAM. México
- Hernández, R., y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.
- Houser, K. W., y Esposito, T. (2021). *Human-Centric lighting: foundational considerations and a Five-Step design process*. *Frontiers in Neurology*, 12.
- IESNA *Lighting Handbook*. (2000). Reference and Application. 9a Edición.
- Jáuregui, O. (2000). *El clima de la Ciudad de México*. Instituto de Geografía. UNAM. México
- Karpinska, D., Kunz M. (2020). *Analysis of light pollution of the night sky in Torún (Poland)*. *SCIENDO*. DOI: 10.2478/ceer-2020-0057.
- Kormazer, E. (2018). *Study of Light Pollution in Urban Lighting in Nisantasi Example*. *Journal Of Contemporary Urban Affairs*, 2019. Volume 3, Number 2, pages 8– 15.
- Kyba, C.C.M. (2017). *Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent*. *Sci. Adv.* 3.
- Kyba, C. (2020). *Direct measurement of the contribution of street lighting to satellite observations of nighttime light emissions from urban areas*. *Light. Res. Technol.*
- Lira-Oliver, A. (2006). *Indoor Illumination for the Stimulation of the Human Circadian System*, [tesis de doctorado]. Harvard U. Estados Unidos.
- Lockley, S. (2009). *Circadian Rhythms: Influence of Light in Humans*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands; Volume 2, pp. 971–988.
- Lucas, R. (2013). *Measuring and using light in the melanopsin age*. *Trends Neurosci.* 37.
- Maimunah, Mohd Sharif (2022). *El futuro de la humanidad será urbano*. Onu Habitat. URL: <https://onuhabitat.org.mx/index.php/el-futuro-de-la-humanidad-sera-urbano>.
- Meléndez, L. (2015). *Caracterización de la intensidad luminosa responsable de la contaminación lumínica en entornos urbanos*, [tesis de doctorado]. Universitat Politècnica de Catalunya. España.
- Muñoz, J. (2020). *Estudio de la luz artificial durante la noche en la Ciudad de México*, [tesis de licenciatura]. UNAM. México
- NOM-013-ENER-2013 (2013). *Norma Oficial Mexicana NOM-013-ENER-2013, Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en vialidades*.
- ODS 18, (2018). *Calidad del cielo nocturno y acceso a la luz de las estrellas*. (2022, Septiembre 16). ODS 18 - Calidad del cielo nocturno y acceso a la luz de las estrellas. ODS 18. <https://ods18.org/>
- Ortiz, A. (2015). *Eficiencia Energética en los sistemas eléctricos de iluminación arquitectónica*, [tesis de maestría]. UNAM. México.
- PIMCHCDMX-2017-2022. (2022). *Plan Integral de Manejo del Centro Histórico de la Ciudad de México (2017-2022)*. Gobierno de la Ciudad de México. México.
- Rozman, C. (2021). *Sustainable City Lighting Impact and Evaluation Methodology of Lighting Quality from a User Perspective*. *MDPI*. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13063409>.
- Solano, H., Ramírez M. (2020). *La contaminación lumínica como aproximación a la planeación urbana de ciudades mexicanas*. Vol. 46, N° 138. *EURE*. DOI: 10.4067/S0250-71612020000200155.
- Szokolay. (2008). *Introduction to architectural Science*, 143.
- Tavares, P., Ingi D., Araújo L., Pinho P. Y Bhusal P. (2021). *Reviewing the Role of Outdoor Lighting in Achieving Sustainable Development Goals*. *MDPI*. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132212657>.
- World Health Organization. *World Report on Vision*; World Health Organization: Geneva, Switzerland. (2019); p. 160. ISBN 9789241516570. Available online: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/328717> (accessed on 10 October 2019).
- Yañez, A. (2019). *Análisis geoespacial de la contaminación lumínica en la Carretera Picacho Ajusco, Demarcación Territorial de Tlalpan*, [tesis de licenciatura]. UNAM. México.
- Yao, Q. (2018). *Illuminance Reconstruction of Road Lighting in Urban Areas for Efficient and Healthy Lighting Performance Evaluation*. *MDPI*.
- Zielinska, K, y Bobkowska, K. (2022). *Rethinking Sustainable Cities at Night: Paradigm Shifts in Urban Design and City Lighting*. *MDPI*. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14106062>. 6/2001 (2016). 6/2001, de 31 de mayo, de ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio coturno. Cataluña. España.