



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
FACULTAD DE CIENCIAS



DOCTORADO EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

**CONTAMINACIÓN LUMÍNICA EN BAJA CALIFORNIA: FUENTES,
ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS Y PERCEPCIÓN CIUDADANA**

TESIS

Que para obtener el grado de

Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo

Presenta

ELVIS EVELYN PURO COA

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, agosto de 2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

FACULTAD DE CIENCIAS

DOCTORADO EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

**CONTAMINACIÓN LUMÍNICA EN BAJA CALIFORNIA: FUENTES,
ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS Y PERCEPCIÓN CIUDADANA**

TESIS

Que para obtener el grado de

Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo

Presenta

ELVIS EVELYN PURO COA

Aprobada por:

Dr. Georges Seingier
Codirector de Tesis

Dr. Alejandro Sánchez de Miguel
Codirector de Tesis

Dr. Héctor Antonio Solano Lamphar
Sinodal

Dra. Juana Claudia Leyva Aguilera
Sinodal

Dra. Nelly Calderón de la Barca Guerrero
Sinodal

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por brindarme la oportunidad de formar parte de este programa de doctorado.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti), por la beca de manutención otorgada durante la realización de este doctorado.

Al Dr. Georges Seingier, por aceptar la codirección del proyecto y ser su principal asesor con aporte de paciencia, tiempo y experiencia en enseñanzas, fundamentales para la construcción conjunta de este objeto de estudio interdisciplinario.

Al Dr. Alejandro Sánchez de Miguel por aceptar la codirección de mi tesis y aportar sus orientaciones, experiencias e inquietudes en la investigación de este tema.

A mi comité sinodal: al Dr. Héctor Solano Lamphar y a la Dra. Juana Claudia Leiva, por sus aportes, comentarios y experiencias que contribuyeron al mejor desarrollo y resultados de esta investigación. A la Dra. Nelly Calderón de la Barca por su guía teórico- metodológico en el diseño cualitativo de la investigación.

A las personas participantes en mi trabajo de campo que me compartieron sus experiencias y vínculos con el paisaje.

Al M.C. Fernando Ávila de la Oficina de la Ley del Cielo de la UNAM, por compartir sus experiencias en el estudio de la contaminación lumínica.

Al Dr. Oscar Jiménez por sus oportunas sugerencias para que pudiese realizar mi trabajo de campo sin tantos sustos.

A mis amigos la Dra. Fabiola Hernández y Dr. Elvis Lacruz por su apoyo, acompañamiento y alegrías durante en mi estancia en España.

A mis amigas Transi, Claudia, Vanesa, Mayra, Paula y Antonella con quienes compartí gratos momentos de estudio y recreación. Con ustedes celebro la alegría de haber alcanzado juntas esta meta que nos propusimos. A mis compañeros de cubos con los que compartí el café de Aaron.

A la Dra. Concepción Arredondo, por compartir su amistad y saberes.

Al personal del IIO en especial a Yolanda por su disposición a guiarme en los trámites necesarios durante mis estudios.

A la profesora Rebeca Pérez de la Universidad de los Andes por su tiempo, paciencia y dedicación en las discusiones teóricas sobre los estudios geográficos.

A mis maestros que compartieron sus experiencias y conocimiento en esta temática de estudio: Dr. César Briceño, Dra. Kathy Vivas, Dr. Franco Della Prugna y el Sr. Luis Plaza

Dedicatoria

A mis padres, por su firme creencia en la educación como motor de crecimiento y nos impulsaron a perseguirla con convicción y pasión.

Recuerdo tus palabras: "Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente, no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo a dondequiera que vayas".

Josué 1:9

A mi familia que compartió este largo camino. Jesús tu permanente apoyo, cariño y esfuerzo es invaluable. Valeree, trajiste alegría y compañía a este viaje.

Resumen

La contaminación lumínica es una problemática ambiental emergente con impacto en los ecosistemas, salud humana y pérdida del cielo estrellado como patrimonio natural y cultural.

Sin embargo, los primeros estudios la vincularon al brillo artificial del cielo nocturno por la iluminación artificial que afecta la observación astronómica, sesgo reflejado en muchas normativas y zonificaciones en la que Baja California no es la excepción. Esta investigación aborda la contaminación lumínica desde diferentes enfoques que incluye una perspectiva geográfica e interdisciplinaria, considerando la importancia del entorno nocturno libre de contaminación para el cumplimiento del ciclo circadiano de las especies y los valores culturales de las poblaciones. Ello facilita la gestión de la problemática de forma integral para el desarrollo de las actividades con la menor afectación al paisaje nocturno.

Esta investigación analiza la distribución espacio temporal de las fuentes de radiancia nocturna en Baja California, los aportes de la contaminación lumínica a los parques nacionales Sierra San Pedro Mártir y Constitución de 1857 y la percepción social en tres asentamientos del Valle de Guadalupe (Francisco Zarco, Villa de Juárez y El Porvenir). Se integró una metodología mixta que incluyó análisis de imágenes satelitales, observaciones de campo y cuestionarios a la población local.

El procesamiento de imágenes satelitales nocturnas del sensor VIIRS/DNB se realizó con Google Earth Engine, QGIS y la aplicación <https://lightpollutionmap.info> para calcular el promedio de radiancia y estimar la intensidad luminosa a nivel municipal y a escala de los asentamientos urbanos. La primera por ser el ámbito territorial donde se aplica la legislación y la segunda por considerarse las principales fuentes de emisión de radiancia, y por ende los que generan más contribución a la contaminación lumínica de los dos parques nacionales estudiados en el periodo 2012-2021. Se vincularon los cambios a los procesos de urbanización y expansión económica. Por otro lado, se desarrolló un análisis de percepción mediante cuestionarios y recorridos de observación, lo cual permitió recabar percepciones ciudadanas sobre la iluminación, vinculación al cielo nocturno, seguridad y el conocimiento de las normativas de protección del cielo nocturno.

Los resultados evidencian un incremento sostenido de la radiancia nocturna en Baja California durante la última década con especial concentración en las áreas urbanas y zona de desarrollo agrícola, turístico y vitivinícola. Los municipios que aportan el 88% de toda la radiancia al zenit del estado de Baja California para el periodo 2012 -2021 son Tijuana con un 61%, Playas de Rosarito 17% y Mexicali el 10%. Los municipios con un menor aporte son Tecate 5%, Ensenada 3%, San Quintín 2% y San Felipe 2%. Este orden se ha mantenido en el tiempo a pesar de que se destaca un incremento de 22% y 10% de la radiancia de los municipios de Tijuana y Playas de Rosarito a partir del año 2017, hasta alcanzar valores máximos en el 2021. Esta tendencia podría estar asociada al nuevo desarrollo urbano, el crecimiento de la infraestructura y el uso de tecnología de iluminación sin apantallamiento y de alta intensidad. Sin embargo, la aparente estabilidad de algunos municipios puede estar vinculada a cambios en tecnologías de iluminación como LED a las cuales el satélite no es sensible.

Las fuentes de contaminación lumínica (FCL) en Baja California se agrupan en cinco zonas: FCL#1: Tijuana-Tecate-Playas de Rosarito-Primo Tapia; FCL#2: Mexicali; FCL#3: El Sauzal-Ensenada-Maneadero-El Zorrillo; FCL#4: Camalú-Emiliano Zapata-Vicente Guerrero- San Quintín-Lázaro Cárdenas- Ejido Papalote; FCL#5: San Felipe.

En el área de 200 km alrededor del OAN y el Parque Nacional SSPM los municipios que aportan la mayor contribución del 45.3% corresponde a los nuevos municipios San Quintín y San Felipe, que no poseen reglamentación para el control de la contaminación lumínica. Por otro lado, el 38% corresponde a Ensenada y Mexicali aunque son pioneros en Baja California y México en el establecimiento de normativas para la protección contra la

contaminación lumínica. En general, el país con mayor porcentaje de contribución a la contaminación lumínica es México con 94% y los EE. UU. en un 6% debido a su distancia fronteriza.

En el área de 200 km alrededor del Parque Nacional Constitución de 1857 la contribución de radiancia cenital al área protegida estudiada es 75 % de México y 25 % de EE. UU. para el año 2021, la intensidad radiante total emitida es 62 % de Estados Unidos y 38 % de México. Por lo tanto la tendencia de crecimiento demográfico es más significativa en la frontera con México y está más cerca del Parque Nacional.

En el Valle de Guadalupe los habitantes reconocen la importancia de la iluminación para la seguridad y las actividades económicas, pero al mismo tiempo expresan preocupación por la pérdida del cielo nocturno.

Se concluye que la contaminación lumínica en Baja California es un fenómeno en expansión que amerita acciones de gestión integral. Esta investigación aporta evidencia científica y social que respalda la necesidad de políticas públicas específicas orientadas a la regulación del alumbrado exterior, la protección de las áreas naturales y la incorporación de la valoración social del paisaje en la toma de decisiones.

Palabras claves: contaminación lumínica, Baja California, frontera Estados Unidos-México, cielo nocturno, áreas protegidas, brillo del cielo, radiancia nocturna, intensidad lumínica, resplandor cenital, VIIRS, Parque Nacional Constitución 1857, San Pedro Mártir, observatorio astronómico nacional, percepción social, Valle de Guadalupe.

Abstract

Light pollution is an emerging environmental issue with impacts on ecosystems, human health, and the loss of the starry sky as a natural and cultural heritage. However, early studies linked it to the artificial brightness of the night sky caused by artificial lighting, which affects astronomical observations. This bias is reflected in many regulations and zoning laws, and Baja California is no exception. The characteristics of environmental and cultural diversity warrant other approaches. This research addresses light pollution from a geographical and interdisciplinary perspective, considering the importance of a pollution-free nighttime environment for the fulfillment of species' circadian cycles and the cultural values of populations. This facilitates comprehensive management of the problem for the development of activities with the least impact on the nightscape.

This research analyzes the spatiotemporal distribution of nighttime radiation sources in Baja California, the contributions of light pollution to the Sierra San Pedro Mártir and Constitución de 1857 National Parks, and social perceptions in three settlements in the Valle de Guadalupe (Francisco Zarco, Villa de Juárez, and El Porvenir). A mixed methodology was used, including satellite image analysis, field observations, and questionnaires administered to the local population.

Nighttime satellite images from the VIIRS/DNB sensor were processed using Google Earth Engine, QGIS, and the <https://lightpollutionmap.info> application to calculate average radiance and estimate light intensity at the municipal and urban settlement levels. The former because this is the territorial area where the legislation applies, and the latter because these are considered the main sources of radiance emissions and, therefore, the largest contributors to light pollution in the two national parks studied between 2012 and 2021. Changes were linked to urbanization and economic expansion. A perception analysis was conducted using questionnaires and observation tours, which allowed for the collection of citizen perceptions about lighting, their connection to the night sky, safety, and knowledge of night sky protection regulations.

The results show a sustained increase in nighttime radiance in Baja California over the last decade, with a particular concentration in urban areas and areas of tourism and winemaking development. The municipalities that contribute 88% of all radiance to the zenith of the state of Baja California for the period 2012-2021 are Tijuana with 61%, Playas de Rosarito with 17%, and Mexicali with 10%. The municipalities with the lowest contributions are Tecate with 5%, Ensenada with 3%, San Quintín with 2%, and San Felipe with 2%. This order has been maintained over time despite a notable increase of 22% and 10% in radiance in the municipalities of Tijuana and Playas de Rosarito starting in 2017, reaching maximum values in 2021. This trend could be associated with new urban development, infrastructure growth, and the use of high-intensity, unshielded lighting technology. However, the apparent stability of some municipalities may be linked to changes in lighting technologies such as LEDs, to which the satellite is not sensitive.

Light pollution sources (LPS) in Baja California are grouped into five zones: LPS #1: Tijuana-Tecate-Playas de Rosarito-Primo Tapia; LPS #2: Mexicali; LPS #3: El Sauzal-Ensenada-Maneadero-El Zorrillo; LPS #4: Camalú-Emiliano Zapata-Vicente Guerrero-San Quintín-Lázaro Cárdenas-Ejido Papalote; LPS #5: San Felipe.

In the 200 km area surrounding the OAN and the SSPM National Park, the municipalities with the largest contribution, 45.3%, are the new municipalities of San Quintín and San Felipe, which do not have regulations for controlling light pollution. On the other hand, Ensenada, and Mexicali account for 38%, despite being pioneers in Baja California and Mexico in establishing regulations for protection against light pollution. Overall, the country with the highest percentage of light pollution is Mexico, at 94%, and the US, at 6%. In the 200 km area around the Constitución de 1857 National Park, the contribution of zenithal radiance to the protected area studied is 75% from Mexico and 25% from the United States, and for the year 2021, the total radiant intensity emitted is 62% from the United States and 38% from Mexico. Therefore, the population growth trend is more significant along the border with Mexico and is closer to the National Park.

In the Guadalupe Valley, residents recognize the importance of lighting for safety and economic activities, but at the same time express concern about the loss of the night sky.

The conclusion is that light pollution in Baja California is a growing phenomenon that warrants comprehensive management actions. This research provides scientific and social evidence that supports the need for specific public policies aimed at regulating outdoor lighting, protecting natural areas, and incorporating the social value of the landscape into decision-making.

Keywords: light pollution, Baja California, United States-Mexico border, night sky, protected areas, sky brightness, nighttime radiance, light intensity, skyglow, VIIRS, Constitución 1857 National Park, San Pedro Martir, national astronomical observatory, social perception, Guadalupe valley.

Índice

Agradecimientos	3
Dedicatoria	4
Resumen	5
Índice	8
Índice de tablas	10
Índice de figuras	11
Capítulo I: Introducción general	13
1.1 Aspectos generales	13
1.2 Antecedentes de los estudios de la contaminación lumínica en Baja California	17
1.3 Justificación	19
1.4 Preguntas de investigación	20
1.5 Objetivos.....	21
1.6 Marco Metodológico.....	21
1.7 Referencias.....	24
Capítulo II: Caracterización de las fuentes de contaminación lumínica en Baja California	27
2.1 Introducción	27
2.2 Cuantificación de la Contaminación lumínica	32
2.3 Delimitación del área de estudio	36
2.3.1 Área de estudio: estado de Baja California	36
2.3.2 Caracterización geográfica	36
2.4 Metodología utilizada para la cuantificación de la contaminación lumínica en Baja California	40
2.4.1 Limitaciones del estudio.....	43
2.5 Resultados y discusión	43
2.5.1 Evolución y tendencias de la contaminación lumínica por municipios del estado de Baja California	44
2.5.2 Intensidad radiante	49
2.5.3 Intensidad lumínica en las localidades urbanas de Baja California	51
2.6 Referencias.....	64
Capítulo III: Estimación de los niveles de contribución municipal a la contaminación lumínica del cenit de los Parques Nacionales Sierra San Pedro Mártir y Constitución de 1857	68
3.1. Generalidades del sistema de áreas protegidas	68

3.1.1 Marco legal y conceptual de las áreas protegidas en México.....	68
3.2. Estimación de la contribución a la contaminación lumínica al cenit del Parque Nacional Sierra San Pedro Mártir y Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir, Baja California, México.	70
3.2.1 Introducción	70
3.2.2 Delimitación del área de estudio	79
3.2.3 Metodología.....	80
3.2.4 Resultados y discusión	81
3.2.5 Referencias.....	89
3.3 Estimación de los niveles de contribución municipal a la contaminación lumínica del zenit del Parque Nacional Constitución de 1857, Baja California	93
Resumen	93
Notas destacadas	94
Artículo publicado: Estimating municipal contributions to cross-border light pollution using VIIRS satellite data: A case study of a national park in Northwest Mexico.	95
Capítulo IV: La percepción del cielo nocturno y contaminación lumínica en los asentamientos: Francisco Zarco, El Porvenir (Guadalupe) y Villa de Juárez (San Antonio de las Minas), Valle de Guadalupe, Ensenada, Baja California	107
4.1 Introducción	107
4.1.1 Percepción y el cielo nocturno	108
4.1.2 Percepción y apego al cielo nocturno.....	108
4.1.3 Contexto del área de estudio: Valle de Guadalupe	110
4.1.4 Normativa de iluminación	112
4.1.5 Condiciones del servicio de alumbrado público.....	114
4.2 Área de estudio.....	116
4.3 Metodología	117
4.3.1 Componente cualitativo.....	117
4.3.2 Componente cuantitativo	118
4.4 Resultados y Discusión.....	118
4.4.1 Percepción del cielo nocturno	119
4.4.2 Monitoreo de la radiancia con imágenes VIIRS: asentamiento urbano Francisco Zarco (Valle de Guadalupe).....	132
4.5 Conclusiones sobre la percepción de la contaminación lumínica	135
4.6 Referencias.....	136
4.7 Anexos.....	139
Capítulo V: Conclusiones generales	147

Índice de tablas

Tabla II-1. Comparación del brillo del cielo de observatorios astronómicos.....	28
Tabla II-2. Características de los satélites nocturnos.	34
Tabla II-3. Promedio de radiancia al cenit ($nW\ cm^{-2}\ sr^{-1}$) de los municipios del estado de Baja California 2012 -202.	44
Tabla II-4. Intensidad radiante en los municipios de BC, 2012-2021.	49
Tabla II-5. Promedio de radiancia de los asentamientos urbanos por municipios de BC, 2012-2021.....	52
Tabla II-6. Promedio de intensidad radiante de los centros urbanos por municipios del estado de Baja California 2012 -2021.	54
Tabla II-7-a. Fichas resumen de las fuentes de contaminación lumínica del municipio de Tijuana.....	57
Tabla II-7b. Fichas resumen de las fuentes de contaminación lumínica del municipio de Playas de Rosarito.	58
Tabla II-7c. Ficha resumen de las fuentes de contaminación lumínica del municipio de Tecate.....	59
Tabla II-7d. Ficha resumen de las fuentes de contaminación lumínica del municipio de Mexicali.....	60
Tabla II-7e. Ficha resumen de las fuentes de contaminación lumínica del municipio de Ensenada.....	61
Tabla II-7f. Fichas resumen de las fuentes de contaminación lumínica del municipio de San Quintín.	62
Tabla II-7g. Ficha resumen de las fuentes de contaminación lumínica del municipio de San Felipe.....	63
Tabla III-1. Comparación de luminarias censadas y sustituidas en el municipio de Ensenada.....	75
Tabla III-2. Evaluación del cumplimiento del reglamento en la política de Modernización del Alumbrado Público del municipio de Ensenada del año 2016.....	75
Tabla III-3. Comparación del brillo del cielo de observatorios astronómicos	76
Tabla III-4. Distancia al parque nacional y población total urbana para cada municipio/condado, o porción de municipio/condado	82
Tabla III-5. Porcentaje del promedio contribución de la radiancia cenital municipal al PN SSPM - OAN SPM durante el periodo 2012-2021.....	83
Tabla III-6. Promedio de radiancia cenital municipal al PN SSPM - OAN SPM para el periodo	

2012-2021.....	86
Tabla IV-1. Actividades económicas en el Valle de Guadalupe (1 de septiembre a 20 de noviembre de 2023)	112
Tabla IV-2. Características sociodemográficas.....	120
Tabla IV-4. Radiancia e intensidad anual en Francisco Zarco (2012-2021).....	133

Índice de figuras

Figura I-1. Los efectos de la contaminación lumínica en los cielos oscuros.....	13
Figura I-2. Incremento de la contaminación lumínica con el crecimiento de la ciudad de Los Ángeles (USA), visto desde el Monte Wilson para los años 1908, 1988 y 2002.	14
Figura I-3. Atlas mundial del impacto visual del brillo artificial del cielo nocturno (World map of artificial night sky brightness).	15
Figura I-4. Vista de la contaminación lumínica desde el OAN.	17
Figura I-5. Reglamentaciones aprobadas para la prevención de la contaminación lumínica en Baja California	18
Figura I-6. Diagrama del marco metodológico.....	23
Figura II-1: A) Comparación del rango espectral de fuentes de iluminación natural y artificial, B) Comparación del rango espectral de lámparas con emisiones con vapor de sodio de alta presión (HPS) y LED.	30
Figura II-2. Comportamiento de la luz en la atmósfera originando contaminación lumínica y resplandor.....	31
Figura II-3: Métodos para la cuantificación de la luz nocturna.....	33
Figura II-4: Métodos para la cuantificación de la contaminación lumínica.	33
Figura II-5. Respuesta espectral de los sensores y fuentes de iluminación.	35
Figura II-6. Ubicación del área de estudio: estado de Baja California y sus municipios.	37
Figura II- 7. Procedimiento para el estudio de la contaminación lumínica con imágenes satelitales en BC.	41
Figura II-8. Promedio de radiancia al cenit de los municipios del estado de Baja California para el periodo 2012 – 2021.....	45
Figura II-9. A) Porcentaje del promedio de radiancia por municipios BC, 2021; B) Porcentaje de intensidad radiante por municipios BC, 2021.	46 - 47
Figura II-10. Clasificación de los niveles de contaminación lumínica por municipio, 2021.....	48

Figura II-11. A) Superficie de los municipios (km ² y %); B) Población total por municipios de Baja California.	49 - 50
Figura II-12. Promedio de la radiancia de los asentamientos urbanos por municipios del estado de Baja California 2012 -2021.	53
Figura II-13. Los municipios y sus fuentes de contaminación lumínica en el estado de Baja California, 2021.	56
Figura III-1. Historia OAN y el PN SSPM.....	71
Figura III-2. Vista de la contaminación lumínica desde el OAN.	72
Tabla III-3. Comparación del brillo del cielo de observatorios astronómicos (expresada en mag/arcsec ²).....	74
Figura III-4. Mapa de ubicación y polígono del PN SSPM y el OAN-SPM.....	79
Figura III-5. Municipios y condados dentro del área de estudio binacional.....	80
Figura III-6. Distribución espacial de la población municipal de México (azul) y condados de USA (rojo) en relación con la distancia promedio al PN SSPM - OAN SPM.....	82
Figura III-7. Porcentaje del promedio contribución de la radiancia cenital municipal al PN SSPM - OAN SPM durante el periodo 2012-2021.....	84
Figura III-8. Porcentaje del promedio de radiancia cenital municipal al PN SSPM - OAN SPM para 2021 en el área de estudio de radio 200 km.....	86
Figura III-9. Porcentaje del promedio de intensidad radiante para 2021.....	87
Figura IV-1. Medio físico natural del Valle de Guadalupe.....	110
Figura IV-2. Principales cultivos agrícolas en el Valle de Guadalupe.	111
Figura IV-3. Actividades Tradicionales turísticas del Valle de Guadalupe.	112
Figura IV-4. Valle de Guadalupe y principales asentamientos.	117
Figura IV-5. Percepción de la iluminación pública.	122
Figura IV-6. Preferencia por observar en cielo nocturno.	126
Figura IV-7. Elementos del cielo nocturno observables por la población.	126
Figura IV-8. Sensaciones y emociones que genera la observación del cielo nocturno.....	127
Figura IV-9. Asentamiento urbano Francisco Zarco en el Valle de Guadalupe.	133
Figura IV-10. Cambios en la radiancia 2012-2021.....	134

Capítulo I: Introducción general

1.1 Aspectos generales

El cielo nocturno se caracteriza por su oscuridad que permite observar a simple vista las miles de estrellas brillando en el cielo y que han sido fuente de inspiración a pueblos originarios, científicos, artistas, agricultores y religiosos en la búsqueda de conocimiento, inspiración, orientación espacial y temporal. La oscuridad natural es parte fundamental del medio ambiente por regular los ritmos circadianos y por ende las actividades biológicas, funciones y procesos ecológicos (Gaston & Sánchez de Miguel, 2022).

Adicionalmente, esta oscuridad natural se pierde por el aumento de los niveles de brillo, limitando la observación a simple vista de los astros menos luminosos y alterando los seres vivos incluyendo a los seres humanos (Gaston *et al.*, 2017; Grubisic *et al.*, 2019; Figura I-1).

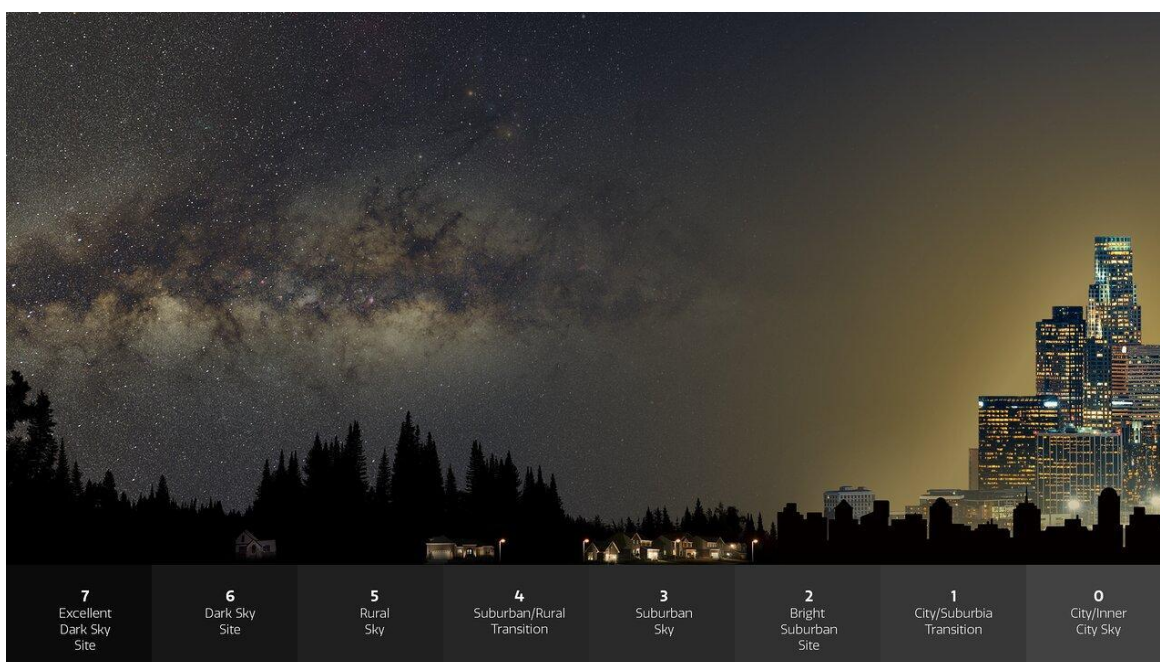


Figura I-1. Los efectos de la contaminación lumínica en los cielos oscuros. En la parte inferior la escala de Bortle de calidad de los cielos. Fuente: NOIRLab/NSF/AURA, P. Marenfeld.

En las áreas urbanas, la luz artificial se propaga en todas direcciones interactuando con las moléculas y partículas en la atmósfera, lo que genera un brillo (resplandor) en el cielo nocturno que, en algunos casos, es visible a kilómetros de distancia del lugar de origen y afectado el entorno (Bará & Lima, 2018; Falchi & Bará, 2021). Este brillo, conocido como contaminación lumínica, se origina por los múltiples flujos luminosos de fuentes artificiales nocturnas, en diferentes intensidades, direcciones o rangos espectrales, que a menudo exceden la cantidad necesaria para su función principal: permitir la realización de

actividades. Diversas definiciones consideran esta contaminación como la suma de todos los efectos adversos de la iluminación (Comisión Internacional de Iluminación -CIE-, 2022; <https://www.iau.org>) o como la alteración antrópica de los niveles naturales de iluminación exterior (DarkSky International -DSI-). Sin embargo, dado su carácter dinámico al interactuar con partículas en la atmósfera, algunos autores consideran más acertado el planteamiento de las United Nations (1979) como la introducción antrópica, directa o indirecta, de sustancias o energía a la atmósfera y cuyos efectos nocivos ponen en peligro la salud humana, los seres vivos y perjudican o interfieren con los usos y servicios legítimos del medio ambiente (Bará *et al.*, 2022).

Por lo tanto, esto nos plantea una problemática con la existencia de sistemas de iluminación exterior ineficientes, que se constituyen en fuentes de contaminación lumínica (IAU, 1976; Shaflik, 2007). Adicionalmente existen factores ambientales que contribuyen a amplificar la contaminación lumínica, haciéndola observable a la distancia e incluso desde el espacio, sobre los cielos de las grandes ciudades, carreteras, centros deportivos, minas, entre otras y evidenciando el carácter global y transfronterizo de esta problemática ambiental (United Nations, 1979; Falchi *et al.*, 2016; Bará & Lima, 2018, Cox *et al.*, 2020; Figura I-2 y Figura I-3).



Figura I-2. Incremento de la contaminación lumínica con el crecimiento de la ciudad de Los Ángeles (USA), visto desde el Monte Wilson para los años 1908, 1988 y 2002. Fuente: McDonnell *et al.* (2009).

Las consecuencias de este incremento del brillo del cielo nocturno inicialmente fueron estudiadas por la pérdida de la visión de los objetos celestes menos brillantes y por lo tanto, la interferencia en la observación astronómica y la amenaza a la viabilidad de los observatorios existentes y potenciales (IAU 1976, 1976b; McDonnell *et al.*, 2009; García *et al.*, 2012). En la década de los años 90, esta preocupación se extendió a organismos gubernamentales, asociaciones civiles, organizaciones ambientales locales e internacionales como la Comisión Eléctrica Internacional (CIE), la UNESCO, la Oficina de Espacio Ultraterrestre de la ONU, el Consejo Internacional de Asociaciones Científicas - ICSU-, el Comité de Investigación del Espacio -COSPAR-, la OMT, el PNUMA-CMS, el Programa sobre el Hombre y la Biósfera de la UNESCO (MAB) y la Convención Ramsar entre otros.

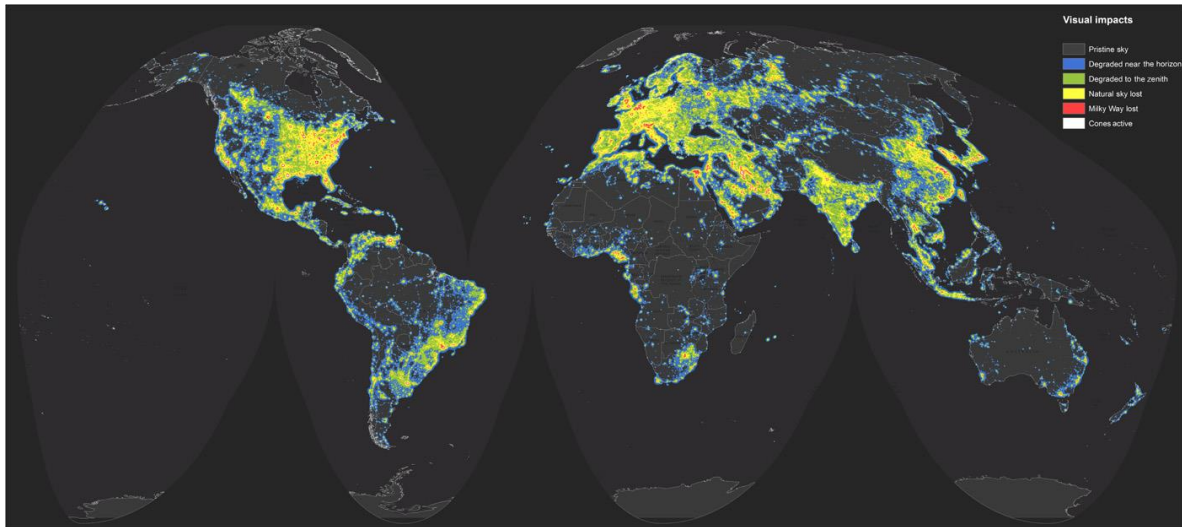


Figura I-3. Atlas mundial del impacto visual del brillo artificial del cielo nocturno (World map of artificial night sky brightness). Fuente: Falchi *et al.* (2016).

Se evidenció la influencia de los ciclos terrestres en el ritmo circadiano (día/noche) de los seres vivos y de cómo afecta el funcionamiento de los sistemas biológicos y por ende los sistemas ecológicos. La influencia de la contaminación lumínica en la alteración de estos procesos naturales afecta la fauna en su capacidad de orientación y movilidad por el medio ambiente nocturno y los procesos de actividad/descanso generando alteraciones en la salud humana, patrones migratorios de las aves, desorientación de las tortugas en la búsqueda de áreas de desove, nacimiento y retorno al mar, aumento de la presencia de insectos, requerimientos de altos niveles de energía y por ende en el calentamiento global, pérdida del valor cultural del cielo, entre otros (Falchi *et al.*, 2011; Gaston *et al.*, 2013; González *et al.*, 2014; Cao *et al.*, 2023; Karska *et al.*, 2024).

Estas preocupaciones por los impactos ambientales y la calidad de vida impulsan iniciativas como la “Declaración sobre la Reducción de los Impactos Ambientales Adversos a la Astronomía” (1992), la “Declaración sobre la Defensa del Cielo Nocturno y el Derecho a la Luz de las Estrellas” (2007) y la Conferencia Dark and Quiet Skies for Science and Society (2021) que resaltan el valor social, cultural, ambiental y astronómico de los cielos oscuros y su importancia como patrimonio para la humanidad. Asimismo, exhortan a la implementación de medidas para informar y sensibilizar a los actores responsables de la protección del medio ambiente nocturno; promuevan la aprobación de normativas para combatir y reducir la contaminación lumínica y fomenten el estudio de esta temática en el ámbito de ahorro energético y el desarrollo de tecnologías de iluminación más eficientes.

También se han impulsado normas y regulaciones desde la CIE y los observatorios astronómicos, como ejemplo la “Ley del Cielo” en España (BOE, 1988) que promueve la regulación de los alumbrados exteriores y contaminantes atmosféricos en las áreas

adyacentes a los Observatorio en Canarias. Posteriormente, fue ampliada para proponer el establecimiento de zonificaciones con diferentes niveles de iluminación exterior (BOE, 2001). Otras normativas para la protección de los cielos oscuros con fines astronómicos destacan en el monte Palomar (California, USA), las islas Canarias (España), Tucson (Arizona, USA), Kona (Hawái), LLano del Hato (Venezuela) y el norte de Chile (Narisada & Schreuder, 2004 Diario Oficial de la República de Chile, 2013; Ávila, 2016; Puro y Hernández, 2016; Puro *et al.*, 2016; Puro, 2019).

Organizaciones como la DSI, la fundación StarLight y la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) fomentan el conocimiento astronómico, la apropiación del cielo nocturno como parte del derecho a disfrutar de las estrellas y formulan criterios para categorizar áreas de protección de los cielos oscuros (<https://fundacionstarlight.org>; <https://darkskyparks.org/dark-skies-and-nature-conservation> <https://darksky.org>). Por otro lado, el servicio de parques nacionales de los EUA realiza estudios para conocer y promocionar los cielos oscuros como parte del patrimonio natural. En el norte de Chile se procura incrementar la oferta turística implementando corredores turísticos con la oferta de observación de las estrellas.

En la actualidad, la contaminación lumínica es estudiada desde diferentes disciplinas por sus implicaciones en la salud humana, la alteración de los ecosistemas, los cambios en los patrones migratorios de aves y fauna, la seguridad, el gasto energético y el desperdicio lumínico. A pesar de estos avances, aún prevalece un amplio desconocimiento sobre esta problemática, lo que genera la necesidad de abordajes interdisciplinarios no sólo como campo de estudio en los centros educativos, sino también con investigaciones y propuestas que aborden el problema desde múltiples dimensiones, disciplinas científicas, políticas públicas, percepción de los habitantes de las áreas afectadas y potenciales a protección, las particularidades locales y la gestión del territorio (Hölker *et al.*, 2010; Pérez Vega, 2021).

Para el año 2016 se estimaba que el 83% del mundo vivía en un ambiente contaminado lumínicamente (donde las luces del cielo exceden 14 cd/m) y debido a esto, un tercio de la población ya no podía observar la Vía Láctea (Falchi *et al.*, 2016). Esta contaminación lumínica nocturna, que no es natural, tiene efectos sobre los seres vivos, alterando el equilibrio de los ecosistemas al modificar los patrones circadianos (Newport *et al.*, 2014). En el ámbito de las áreas protegidas, un estudio global para el periodo 1992 - 2010 reveló que más del 42% experimentaron un aumento significativo en la iluminación nocturna, con un pequeño porcentaje de áreas protegidas en Europa (24%) y América del Norte (17%) exhibiendo niveles elevados de iluminación en todos los años (Gaston *et al.*, 2015).

1.2 Antecedentes de los estudios de la contaminación lumínica en Baja California

En México la preocupación por la contaminación lumínica está directamente vinculada a los orígenes del Observatorio Astronómico Nacional (OAN) de San Pedro Mártir (SPM), en Baja California. Este observatorio ha experimentado sucesivas reubicaciones desde 1910 debido al incremento de la iluminación en sus adyacencias (Moreno -Corral *et al.*, 1994).

El OAN es de gran relevancia para la investigación científica nacional e internacional, por su impacto en el conocimiento astronómico y su valor como patrimonio natural y cultural de la nación. Este observatorio ya reporta contaminación lumínica procedente de las ciudades ubicadas a 60 y 200 km de distancia. Desde el OAN se visualiza hacia el horizonte -en dirección noreste-, el resplandor de las áreas urbanas en la frontera México-USA y la costa del Golfo de California. Estas ciudades incluyen poblaciones de los municipios de Ensenada (Ensenada, San Vicente, L. Cárdenas); Mexicali (Mexicali), San Felipe (San Felipe), Tijuana (Tijuana) y San Diego, USA (Gagik *et al.*, 2016; Ávila, 2016; Figura I-4).



Figura I-4. Vista de la contaminación lumínica desde el OAN. Fuente: Ávila (2013).

En el OAN SPM, se han realizado mediciones puntuales de contaminación lumínica utilizando monitores fijos de calidad del cielo (SQM) y el fotómetro TESS los cuales evidencian sus excelentes valores de oscuridad al zenit (22.11 magnitudes de arco por segundo al cuadrado). Este interés astronómico motivó e impulsó la creación de un marco legal para su protección en Baja California, a través de la promulgación de reglamentos para prevenir, reducir y evitar la contaminación lumínica en los municipios de Ensenada (2006), Mexicali (2011) y Tijuana (2019) publicados en el Periódico Oficial del Estado de Baja California (2006, 2011, 2019a). Con ello el municipio Ensenada se convierte en

pionera en esta protección de los cielos oscuros en Baja California y México (Ávila, 2019; Figura I-5).

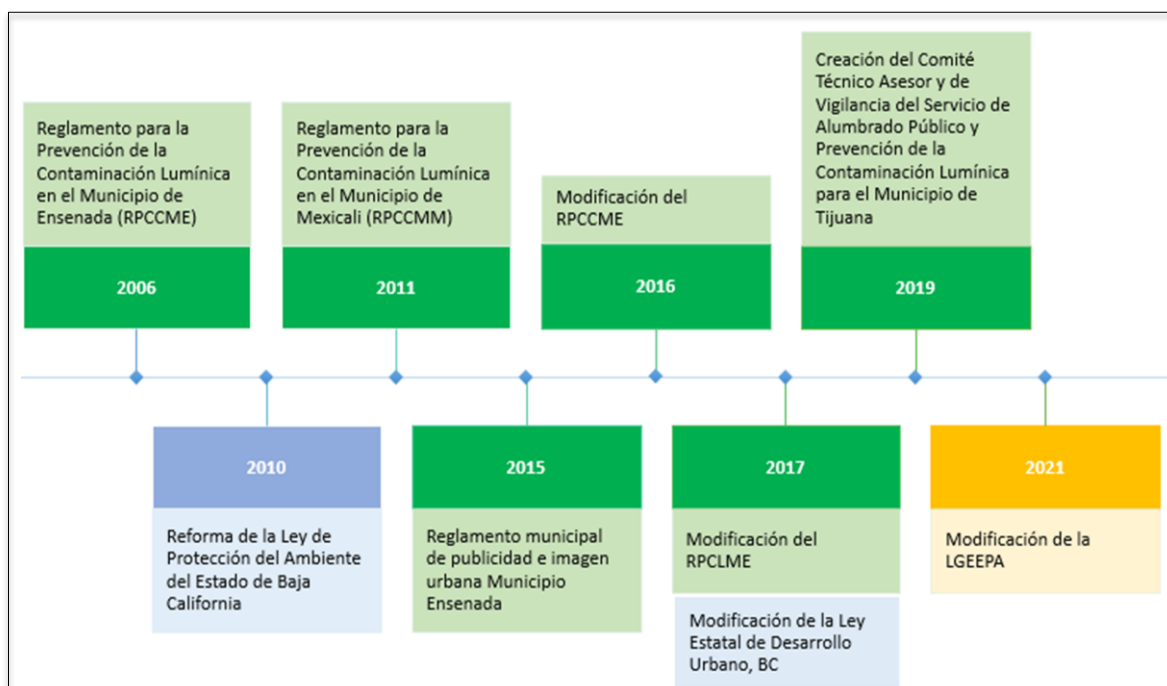


Figura I-5. Reglamentaciones aprobadas para la prevención de la contaminación lumínica en Baja California. Los distintos colores en la imagen indican el nivel de jurisdicción: amarillo para regulaciones federales, azul para estatales y verde para municipales. Fuente: Elaboración propia.

Se destaca en el reglamento del municipio de Ensenada la definición de una zona de máxima protección (ZMP) con un radio de 100 kilómetros desde el OAN, en donde se incluyen localidades urbanas del municipio de Ensenada. En el caso del Municipio Mexicali se reconoce la importancia del OAN (Periódico Oficial del Estado de Baja California 2006, 2011, 2016, 2017; Puro, 2019). Sin embargo, la reciente creación de los municipios San Quintín y San Felipe amerita la actualización de normativas para incorporar estas nuevas decisiones administrativas dentro de la ZMP.

Díaz (2016) llevó a cabo investigaciones en zonas urbanas de Ensenada para proponer una guía de métricas estandarizadas para evaluar el alumbrado público y la publicidad luminosa. Sus resultados destacan que la mayor parte de las lámparas instaladas en el área de estudio no cumplen las características necesarias para prevenir la contaminación lumínica por utilizar modelos de luminarias estilo Cut off y lámparas instaladas de manera inapropiada. En el caso de las pantallas publicitarias existe un ineficiente reglamento que hace difícil el control de la proliferación de publicidad en la ciudad razón por la cual debe adecuarse el sistema normativo en la zona urbana de Ensenada.

Puro (2019) evaluó la gestión legal de la contaminación lumínica en el municipio de Ensenada, destacando el incumplimiento de la normativa en el proyecto de sustitución del

alumbrado público en 2016.

En cuanto a los estudios cartográficos, destaca la información del Atlas Mundial de la Contaminación Lumínica del año 2016 (Falchi *et al.*, 2016) como un mapeo de grandes territorios del brillo artificial del cielo nocturno. Constituye una referencia importante para realizar estudios espaciales y temporales a gran escala para comparar los cambios en la contaminación lumínica.

En el caso de Baja California no existen estudios acerca de la caracterización del cielo nocturno y fuentes de emisión lumínica desde los asentamientos urbanos. Ello puede lograrse desde la superficie terrestre y utilizando imágenes satelitales.

1.3 Justificación

La cuantificación y análisis de la contaminación lumínica en el estado de Baja California particularmente relevante en el contexto actual, dada la evidente expansión del resplandor urbano y la pérdida progresiva de los cielos nocturnos, debido a los efectos adversos de la iluminación artificial. Por lo tanto, es importante avanzar en estudios que permitan caracterizar tanto los patrones espaciales como la percepción social de los impactos que generan en la visión del cielo nocturno natural.

Tradicionalmente, los estudios de contaminación lumínica han estado asociados principalmente a la actividad astronómica y a los observatorios. Incluir otras disciplinas nos permite lograr una mejor comprensión de la complejidad de la problemática, para una mejor gestión de esta. Se hace necesario un nuevo enfoque de estudio que permita reconocer sus elementos, interacciones, impactos y percepción social sobre las formas de iluminación.

Los costos de no comprender la complejidad de esta problemática en todas sus dimensiones son de carácter social, económico, cultural y ambiental e incluyen impactos en:

- ✓ El gasto económico y energético, tanto en la producción de energía como en instalación, mantenimiento y control del alumbrado público;
- ✓ El abrigantamiento del cielo nocturno que limita el disfrute de la visión de las estrellas en los cielos nocturnos;
- ✓ Los hábitos nocturnos de la fauna; y
- ✓ La calidad de vida de los ciudadanos en dos aspectos:

- a. el incremento de las zonas mal iluminadas y su incidencia en la seguridad urbana, el tráfico vial, y
- b. la alteración de los patrones de sueño por la alteración de la producción de melatonina y otras enfermedades.

En esta investigación se propone una perspectiva interdisciplinaria con un enfoque ambiental-geográfico que considera la incidencia de la iluminación hasta las áreas más distantes y de paisajes oscuros como las áreas protegidas (Bará & Lima, 2018). Así mismo consideramos los cielos oscuros y el paisaje nocturno como un servicio que nos brinda la naturaleza a la sociedad que debemos preservar como parte de la calidad de vida.

La utilidad de este marco referencial radica en que permitirá identificar y esquematizar el modelo de funcionamiento de las relaciones ser humano - medio ambiente y cómo el atributo cielo oscuro de Baja California es afectado por la contaminación lumínica. Asimismo, el reconocimiento de los actores y su percepción social de la problemática podrá vincularse a las características del entorno ambiental, económico y político en el cual está inmerso para una comprensión de sus interacciones y evaluación que permitan reducir sus impactos.

Estará estructurado en cuatro capítulos donde se desarrollarán los objetivos particulares de la investigación que respondan a las preguntas formuladas.

1.4 Preguntas de investigación

1. ¿Cuáles son los niveles de contaminación lumínica en Baja California?
2. ¿Cuál es la percepción social ante la problemática de la contaminación lumínica?

De estas preguntas generales se desprenden otras preguntas específicas que se formulan a continuación:

1. ¿Existe contaminación lumínica en Baja California?
2. ¿Cuál es la percepción social de la problemática de la contaminación lumínica?
3. ¿Existe relación entre la contaminación lumínica y la percepción de la seguridad en los habitantes del VG?
4. ¿Cuáles son las políticas públicas que se están implementando para controlar/mitigar la contaminación lumínica?

Este estudio aportará información de utilidad para caracterizar la problemática de la contaminación lumínica en el estado de Baja California y generará información de interés

para la gestión de esta problemática en los municipios actuales y la propuesta de nuevos municipios, ubicados en la zona de máxima protección del OAN – SPM. Asimismo, aportará información de utilidad para la Oficina de la Ley del Cielo del OAN ya que incluye las emisiones de luz que se ubican a más de 100 km de distancia del OAN y que se dispersan en la atmósfera creando un efecto de adición lumínica que abriga el cielo.

1.5 Objetivos

Objetivo General

Evaluar la contribución de los municipios de Baja California como fuentes de contaminación lumínica, su relación con áreas naturales protegidas y la percepción social del fenómeno.

Objetivos particulares

1. Caracterizar las fuentes de contaminación lumínica en el estado de Baja California.
2. Estimar la contribución de cada municipio a la contaminación lumínica de los parques nacionales San Pedro Mártir y Constitución de 1857.
3. Identificar la percepción social acerca de los cielos oscuros y la contaminación lumínica en los asentamientos Francisco Zarco, El Porvenir (Guadalupe) y Villa de Juárez (San Antonio de las Minas) en el Valle de Guadalupe, BC.

1.6 Marco Metodológico

Para el logro de los objetivos planteados se siguió una metodología mixta que combina estudios cuantitativos y cualitativos, descritos a continuación y representados en la Figura I-6. Cada paso de las metodologías está descrito con más detalle en su capítulo respectivo.

La caracterización de las fuentes de contaminación lumínica en Baja California y la evaluación de las fuentes espaciales de contaminación lumínica se realizaron mediante un diagnóstico de la radiancia emitida al zenit por los municipios del estado de Baja California mediante el análisis de imágenes satelitales para el periodo 2012 - 2022. Para ello, se emplearon métodos cartográficos para el procesamiento de imágenes satelitales utilizando los programas QGIS y Google Earth Engine, con el fin de realizar un análisis geográfico y síntesis de las imágenes de los satélites Suomi (VIIRS). Este enfoque permitió obtener imágenes a diferentes escalas y resoluciones, contribuyendo a la caracterización de las fuentes de contaminación lumínica de Baja California, incluyendo las áreas protegidas.

La estimación de los niveles de contribución municipal a la contaminación lumínica del zenit de los Parque Nacionales San Pedro Mártir y Parque Nacional Constitución de 1857 se

realizó para identificar los que generan mayores impactos lumínicos para el periodo 2012 - 2022 mediante el análisis de imágenes VIIRS y el uso de la aplicación <https://www.lightpollutionmap.info> y la metodología propuesta por Bará y Lima (2018) para la identificación y cálculo de los aportes municipales a la contaminación lumínica al cenit de los Parque Nacionales.

Para el estudio de la percepción social en tres asentamientos del Valle de Guadalupe, se utilizó un enfoque metodológico mixto que combinó componentes cualitativos y cuantitativos con el fin de obtener una visión integral sobre la vinculación de los habitantes con el cielo nocturno, las características del alumbrado público, percepción de seguridad y el conocimiento de la normativa de protección de los cielos oscuros. Este estudio se centró en tres asentamientos del valle de Guadalupe: Francisco Zarco, El Porvenir (Guadalupe) y Villa de Juárez (San Antonio de las Minas).

Para identificar los factores que inciden en su percepción de la contaminación lumínica se utilizó un método no paramétrico apoyado en diversas herramientas de recolección de datos, que incluyeron observación no participante, encuestas estructuradas, formularios de Google form, entrevistas semi estructuradas y análisis de información geográfica y documental. Asimismo, la información fue contrastada y validada con imágenes satelitales de VIIRS, para evaluar cómo esta relación influye en la percepción de la contaminación lumínica, y a su vez en el entendimiento de la problemática de la región (marco legal, problemáticas de inseguridad y zonificación de la iluminación pública).

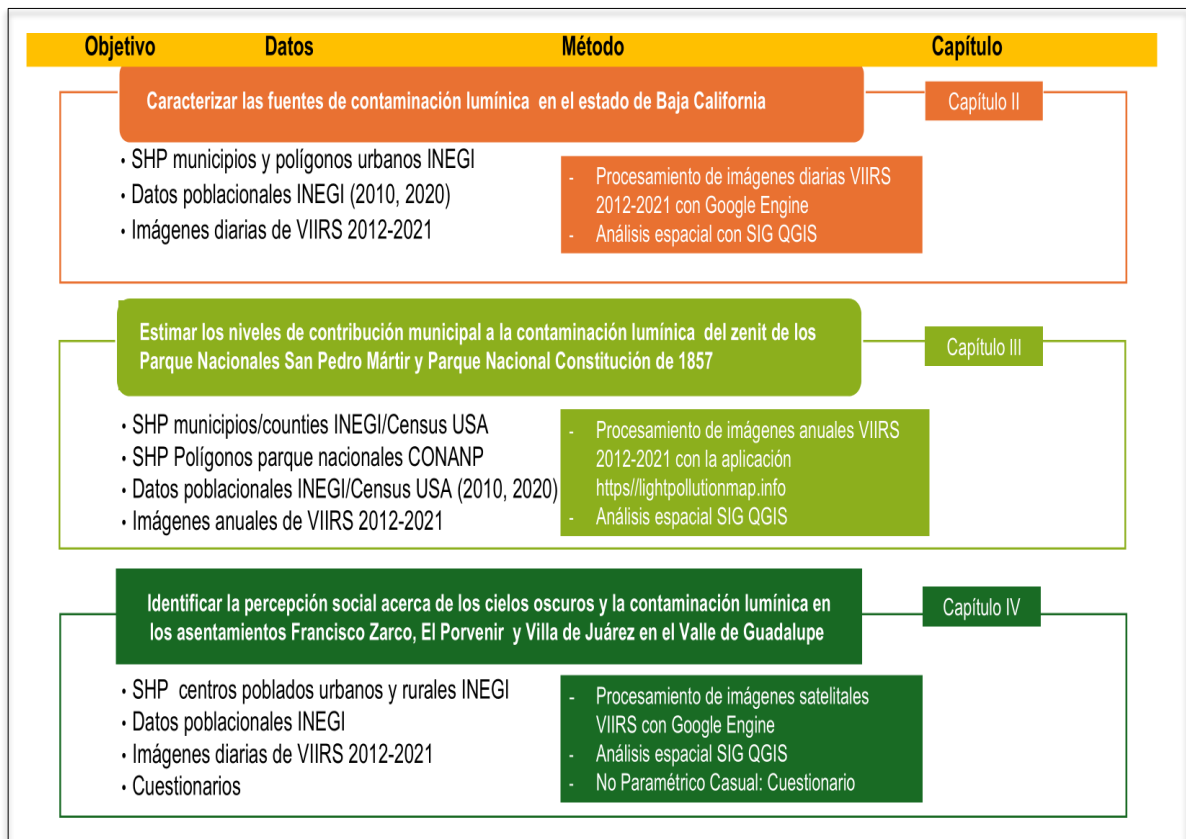


Figura I-6. Diagrama del marco metodológico

La tesis se encuentra estructurada conforme a los objetivos específicos planteados. En el Capítulo II se aborda la caracterización de la contaminación lumínica en Baja California, estableciendo un diagnóstico de la distribución espacial de los municipios y centros poblacionales con mayor emisión de luz artificial. El Capítulo III analiza la contribución de los municipios a la contaminación lumínica de los parques nacionales San Pedro Mártir y Constitución de 1857, considerando un radio de 200 km alrededor de cada parque e incorporando el impacto de los condados de EE. UU. cercanos. Finalmente, el Capítulo IV examina la percepción social de la problemática de la contaminación lumínica en el Valle de Guadalupe, ubicado en el municipio de Ensenada, con el objetivo de comprender las actitudes de la población en relación con la iluminación urbana, la seguridad y preservación de los cielos oscuros.

1.7 Referencias

- Ávila, F. (2016). La Ley del Cielo. En UNESCO Oficina en México. *The Right to Dark Skies/ El Derecho a los cielos oscuros* (pp. 123-134). Ciudad de México, México: UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000246131>
- Bará, S., & Lima, R. (2018). Photons without borders: Quantifying light pollution transfer between territories. *International Journal of Sustainable Lighting*, 20(2), 51-61. <https://doi.org/10.26607/ijsl.v20i2.87>.
- Bará, S., Bao-Varela, C., & Falchi, F. (2022). Light pollution and the concentration of anthropogenic photons in the terrestrial atmosphere. *Atmospheric Pollution Research*, 13(9), 101541. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101541>
- Boletín Oficial del Estado -BOE-(1988). Ley 31/1988, de 31 de octubre, sobre Protección de la Calidad Astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias. Publicada en el BOE el 3 de noviembre de 1988. <https://www.boe.es/eli/es/l/1988/10/31/31>
- Boletín Oficial del Estado -BOE-(2001). Ley 6/2001, de 31 de mayo, de Ordenación Ambiental del Alumbrado para la Protección del Medio Nocturno, Comunidad Autónoma de Cataluña. Publicada en el BOE el 22 de junio de 2001. <https://www.boe.es/eli/es-ct/l/2001/05/31/6>
- Cao, M., Xu, T., & Yin, D. (2023). Understanding light pollution: Recent advances on its health threats and regulations. *Journal of Environmental Sciences*, 127, 589-602. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.06.020>
- Comisión Internacional de Iluminación -CIE-(2022). CIE. e-ILV entry 17-29-177 light pollution. <https://cie.co.at/eilvterm/17-29-177>.
- Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C. & Baugh, K. (2000). The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 318, 641–657. <https://www.researchgate.net/publication/227537884>
- Cox, D., Sánchez de Miguel, A., Dzurjak, S., Bennie, J. & Gaston, K. (2020). National Scale Spatial Variation in Artificial Light at Night. *Remote Sensing*, 12, 1591. 10.3390/rs12101591.
- DarkSky International -DSI-. <https://darksky.org/>.
- Diario Oficial de la República de Chile (2013). Decreto 43: Establece Norma de Emisión para la Regulación de la Contaminación Lumínica, elaborada a partir de la revisión del Decreto Supremo 686/1998 MINECON. Publicado en el Diario Oficial el 03 de mayo de 2013. <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1050704>
- Díaz, J. (2016). *Análisis de los factores normativos y meteorológicos que intervienen en la contaminación lumínica de una zona urbana* (Tesis de Ingeniero industrial). Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Ensenada, México. <http://catalogocimarron.uabc.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=217769>
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C., Elvidge, C., Baugh, K., Portnov, B., Rybnikova, N. y Furgoni, R. (2016). *The new world atlas of artificial night sky brightness*. <http://advances.sciencemag.org/content/2/6/e1600377>.
- Falchi, F. & Bará, S. (2021). Computing light pollution indicators for environmental assessment. *Natural Sciences*. 1:e10019. <https://doi.org/10.1002/ntls.10019>

- García, M. (editor), San Martín, R., Solano, H. y Francia Payàs, P. (2012). *Contaminación lumínica. Una visión desde el foco contaminante: el alumbrado artificial*. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España.
- Gagik et al. (2016). Astroclimatic characterization of Vallecitos: A candidate site for CTA at <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316-022745> San Pedro Mártir, Astronomical Society of the Pacific.
- Gaston, K. J., Duffy, J. P., & Bennie, J. (2015). Quantifying the erosion of natural darkness in the global protected area system. *Conservation Biology*, 29(4), 1132-1141. <https://doi.org/10.1111/cobi.12462>
- Gaston, K. J., Davies, T. W., Nedelec, S. L., & Holt, L. A. (2017). Impacts of Artificial Light at Night on Biological Timings. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48(1), 49-68. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316-022745>
- Gaston, K. J., & Sánchez De Miguel, A. (2022). Environmental Impacts of Artificial Light at Night. *Annual Review of Environment and Resources*, 47(1), 373-398. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112420-014438>
- González-Madrigal, J., Solano-Lamphar, H. Y Ramírez, M. -Navea, K. y Muñoz, M. (2020). La contaminación lumínica como aproximación a la planeación urbana de ciudades mexicanas. *Eure*. 46(138), pp. 155-174.
- González, S. A., Yáñez-Navea, K. y Muñoz, M. (2014). Effect of coastal urbanization on Sandy beach coleoptera *Phaleria maculate* (Kulzer, 1959) in northern Chile. *Marine Pollution Bulletin*.
- Grubisic, M., Haim, A., Bhusal, P., Dominoni, D. M., Gabriel, K. M. A., Jechow, A., Kupprat, F., Lerner, A., Marchant, P., Riley, W., Stebelova, K., Van Grunsven, R. H. A., Zeman, M., Zubidat, A. E., & Hölker, F. (2019). Light Pollution, Circadian Photoreception, and Melatonin in Vertebrates. *Sustainability*, 11(22), 6400. <https://doi.org/10.3390/su11226400>
- Hölker, F., Moss, T., Griefahn, B., Kloas, W., Voigt, C. C., Henckel, D., Hänel, A., Kappeler, P. M., Völker, S., Schwöpe, A., Franke, S., Uhrlandt, D., Fischer, J., Klenke, R., Wolter, C., & Tockner, K. (2010). The Dark Side of Light: A Transdisciplinary Research Agenda for Light Pollution Policy. *Ecology and Society*, 15(4), art13. <https://doi.org/10.5751/ES-03685-150413>
- International Astronomical Union -IAU- (1976). Guía para minimizar el brillo del cielo en zonas urbanas en cercanía de observatorios astronómicos. http://www.iau.org/public/themes/light_pollution/
- International Astronomical Union -IAU- (1976b). Reporte y recomendaciones de la comisión 50 de la Unión Astronómica Internacional. Identificación y protección de sitios de observatorios existentes y potenciales. https://www.inaoep.mx/~alberto/iaucom50_rec.html
- Karska, J., Kowalski, S., Gładka, A. et al. (2024). Artificial light and neurodegeneration: does light pollution impact the development of Alzheimer's disease?. *GeroScience* 46, 87–97. <https://doi.org/10.1007/s11357-023-00932-0>
- Kyba, C. C. M., Pritchard, S. B., Ekirch, A. R., Eldridge, A., Jechow, A., Preiser, C., Kunz, D., Henckel, D., Hölker, F., Barentine, J., Berge, J., Meier, J., Gwiazdzinski, L., Spitschan, M., Milan, M., Bach, S., Schroer, S., & Straw, W. (2020). Night Matters—Why the Interdisciplinary Field of “Night Studies” Is Needed. *J*, 3(1), 1-6. <https://doi.org/10.3390/j3010001>
- NOIRLab/NSF/AURA, P. Marenfeld (s/f). Infographic Illustrating the Impact of Light Pollution on Our Ability to See Stars and Other Objects in the Night Sky. <https://noirlab.edu/public/es/images/noirlab2302a/?nocache=true>

- McDonnell, M. (Editor), Hahs, A. & Breuste, J. (2009). Ecology of Cities and Towns: A Comparative Approach. Cambridge University Press, p. 243-263. http://assets.cambridge.org/97805216/78339/frontmatter/9780521678339_frontmatter.pdf
- Moreno-Corral, M., Costero R., and Schuster, W. (1994). High Atop the Baja, The National Observatory of Mexico. *Astronomical Society of the Pacific*, (January-February 1994).
- Pérez Vega, C., Zielinska-Dabkowska, K. M., & Hölker, F. (2021). Urban Lighting Research Transdisciplinary Framework—A Collaborative Process with Lighting Professionals. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(2), 624. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020624>
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2006). Reglamento para la prevención de la contaminación lumínica en el Municipio de Ensenada, Baja California. Publicado en el Periódico Oficial del Estado de Baja California el 29 de septiembre de 2006.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2011). Reglamento para la Prevención de la Contaminación Lumínica en el Municipio de Mexicali, Baja California. Publicado en el Periódico Oficial del Estado de Baja California el 08 de julio de 2011.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2016). Reglamento para la Prevención de la Contaminación Lumínica en el Municipio de Ensenada, Baja California. Publicado en el Periódico Oficial del Estado de Baja California el 09 de mayo de 2016.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2017). Reglamento para la Prevención de la Contaminación Lumínica en el Municipio de Ensenada, Baja California. Publicado en el Periódico Oficial del Estado de Baja California el 19 de mayo de 2017.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2019a). XXII Ayuntamiento de Tijuana: Acuerdo de Creación del Comité Técnico Asesor y de Vigilancia del Servicio de Alumbrado Público y Prevención de la Contaminación Lumínica para el Municipio de Tijuana, Baja California. Publicado en el Periódico Oficial del Estado de Baja California N° 3, sección IV, tomo CXXVI el 11 de enero de 2019.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2019b). XXII Ayuntamiento de Tijuana: Reglamento Interno del Comité Técnico Asesor y de Vigilancia del Servicio de Alumbrado Público y Prevención de Contaminación Lumínica para el Municipio de Tijuana, Baja California. Publicado en el Periódico Oficial del Estado de Baja California N° 3, sección IV, tomo CXXVI el 11 de enero de 2019.
- Puro, E. y Hernández, J. (noviembre 2016). Marco legal del área de protección lumínica del Observatorio Astronómico Nacional de Llano del Hato, Mérida -Venezuela. En Galeguillos, P., Memorias XIII Congreso Panamericano de Iluminación LUXAMERICA 2016. La Serena, Chile del 23 al 25 de noviembre de 2016.
- Puro Coa, E., Della Prugna, F., & Barroeta, G. (2016). *Programa de Protección del Observatorio Astronómico Nacional de Llano del Hato, Mérida—Venezuela*. XIII Congreso Panamericano de Iluminación LUXAMERICA 2016, La Serena, Chile.
- Puro, E. (2019). *Análisis de la gestión de la contaminación lumínica en las adyacencias del Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir, municipio de Ensenada, B.C., México* (Tesis de la Especialidad en Gestión Ambiental). Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México.
- Shaflik, C. (2007). Light pollution. Environmental effects of roadway lighting. Technical paper prepared for CIVL 582- Transportation Engineering.
- United Nations (1979). Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/1979%20CLRTAP.e.pdf>

Capítulo II: Caracterización de las fuentes de contaminación lumínica en Baja California

2.1 Introducción

La contaminación lumínica es un tipo de contaminación ambiental que recientemente ha sido regulada en México a nivel federal. Sin embargo, su impacto ha sido objeto de interés para la comunidad internacional debido a sus efectos en la salud de los seres vivos, la alteración de los ecosistemas, la pérdida del paisaje nocturno, la observación astronómica y el esparcimiento humano.

Diversas definiciones han sido propuestas para describir este fenómeno. La Comisión Internacional de Iluminación (CIE, 2022) la considera como el conjunto de efectos adversos de la luz artificial. Por otro lado, la legislación mexicana y española, específicamente la Ley General de Equilibrio ecológico y la Protección Ambiental (LGEEPA, 2021) y la Ley de prevención de la contaminación lumínica y de fomento del ahorro y eficiencia energéticos derivados de instalaciones de iluminación (BOE, 2010) la definen desde una perspectiva físico ambiental: como el resplandor luminoso en ambientes nocturnos o brillo producido por la difusión y reflexión de la luz en los aerosoles y partículas en suspensión en la atmósfera, que altera las condiciones naturales de luminosidad en horas nocturnas y dificultan las observaciones astronómicas de los objetos celestes, debido a la luz intrusa, debiendo distinguirse el brillo natural, atribuible a la radiación de fuentes u objetos celestes y a la luminiscencia de las capas altas de la atmósfera.

En cuanto a las fuentes de iluminación artificial y sus características incluidas en una de las primeras definiciones de la contaminación lumínica como el brillo del cielo originado por los flujos luminosos de fuentes artificiales nocturnas en intensidades, direcciones o rangos espectrales innecesarios para la realización de las actividades previstas (BOE, 2001).

Las definiciones ponen en relevancia aspectos importantes a considerar en el estudio de la contaminación lumínica de los cuales se distinguen los siguientes: las condiciones naturales de oscuridad del cielo, la generación de la luz intrusa, el mecanismo de brillo del cielo y las formas de contaminación lumínica.

El cielo nocturno posee cualidades de oscuridad natural con valores que oscilan entre 21 y 22 magnitudes por segundo de arco ($\text{mag}/\text{arcsec}^2$) en la escala de medición fotométrica utilizada en astronomía (Tabla II-1). También se puede evaluar mediante la escala visual del Bottle, que clasifica la oscuridad en niveles del 1 al 9, siendo 1 la oscuridad óptima y 9 la mayor con contaminación en centros urbanos (Figura I-1).

Tabla II-1. Comparación del brillo del cielo de observatorios astronómicos (expresada en mag/arcsec²)

Mauna Kea (Hawái) (a)	Paranal (Chile) (a)	La Silla (Chile) (a)	Tololo (Chile) (b)	San Pedro Mártir (México) (b)	Roque de los Muchachos (Canarias, España) (a)	El Teide (Tenerife, España) (a)
22.05	21.7	21.7	21.8	21.84	21.9	21.4

Fuente: a) Hanel *et al.* (2018), b) <https://www.iac.es/es/observatorios-de-canarias/calidad-del-cielo/parametros-de-calidad-del-cielo/brillo-de-cielo-nocturno>

Los observatorios astronómicos suelen contar con sensores fotométricos fijos que permiten medir estos valores de manera precisa y continua. No obstante el brillo del cielo puede alterarse tanto por fuentes naturales como artificiales. Entre las fuentes naturales de iluminación nocturna se encuentran la radiación de los cuerpos celestes como las estrellas, la luna, la Vía Láctea, las auroras y la luminiscencia de las capas altas de la atmósfera.

Por otro lado, la contaminación lumínica representa una alteración de origen antrópico, generada por las fuentes de iluminación artificial, cuya energía emitida puede ser detectada y cuantificada mediante sensores terrestres y satelitales.

Para una mejor comprensión de los análisis a presentar en este capítulo es importante definir las principales unidades radiométricas que utilizaremos: radiancia, flujo e intensidad radiantes. Estas unidades permiten describir la cantidad y dirección de la energía emitida por las fuentes de iluminación artificial, así como interpretar los flujos radiantes obtenidos de los satélites para analizar su distribución y variabilidad espacial y temporal.

Flujo radiante: es la cantidad total de energía radiante emitida, reflejada, transmitida o recibida por unidad de tiempo. Se mide en vatios (W). También es conocida como potencia total de la radiación.

Intensidad radiante: es el flujo radiante emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección específica. Se mide en vatios por estereorradián (W/sr ó $W \cdot sr^{-1}$) y se utiliza para describir cuánta energía se emite en una dirección concreta.

Radiancia: describe la cantidad de flujo radiante emitido, reflejado, transmitido o recibido por unidad de superficie (área) y por ángulo sólido. Es útil para interpretar la energía detectada por cada píxel de una imagen satelital. En este estudio el producto satelital la mide en nanovatios por centímetro cuadrado por estereorradián ($W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$).

Un indicador clave para cuantificar la luz emitida desde la superficie terrestre y captada por los satélites es la radiancia al cenit, definida como la cantidad de luz que se dirige directamente hacia el cielo en un ángulo perpendicular a la superficie terrestre.

Las fuentes de iluminación artificial no solo varían en intensidad y distribución espacial sino también en la naturaleza espectral de la luz que emiten. Esto significa que cada tipo de fuente luminosa emite energía en distintas longitudes de onda (wavelength en nanómetro *nm*) dentro del espectro electromagnético, lo cual está relacionado con su tecnología y composición química. Puede estar anotado en grados Kelvin (K). Entre las fuentes de emisión más utilizadas destacan las lámparas de sodio, halogenuros metálicos, fluorescentes y diodos emisores de luz -LED (Figura II-1A).

Lámparas de vapor de sodio de alta presión (HPS): emiten predominantemente en el rango del naranja amarillo. Presentan una alta reproducción cromática. El espectro posee un pico pronunciado de emisión en la región amarillo naranja (580-600 nm) y bajas emisiones en las regiones azul y verde de espectro. Son comunes en el alumbrado público antiguo.

Lámparas de vapor de sodio de baja presión (SBP): fueron recomendadas en las zonas adyacentes a los observatorios astronómicos por su poca interferencia espectral en las imágenes adquiridas. Poseen una baja reproducción cromática.

Lámpara de halogenuros metálicos: presentan una emisión más amplia en el espectro visible con componentes en el azul, verde y rojo. Son comunes en estadios y áreas comerciales.

Fluorescentes: Su espectro está compuesto por líneas discretas superpuesta a una banda continua como generada por la excitación de gases y recubrimiento de fósforo. Son utilizadas en interiores y espacios comerciales

Diodos emisores de luz (LEDs): emiten en el rango espectral controlado dependiendo del tipo de fósforo y diseño. Los LEDs blancos fríos, tienen un componente fuerte en el azul y en parte del verde. El espectro posee dos picos pronunciados de emisión, en la región del azul (alrededor de 450 nm) y amarillo-naranja-rojo (alrededor de 600nm), por lo tanto emite en una gama más amplia del espectro electromagnético. Tienen un amplio uso debido a su bajo consumo energético que ha facilitado su uso masificado en la iluminación pública (Figura II-1B).

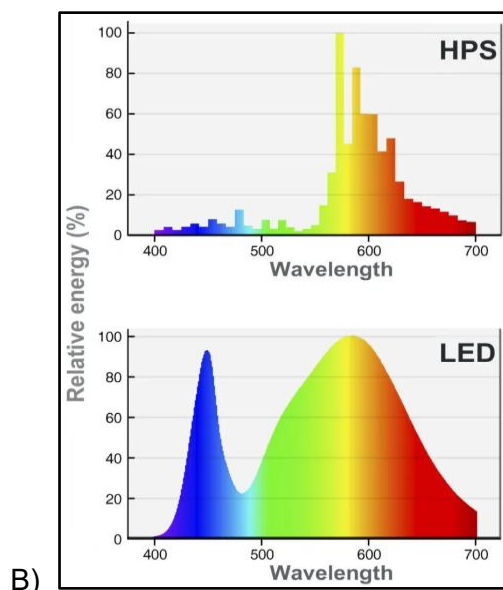
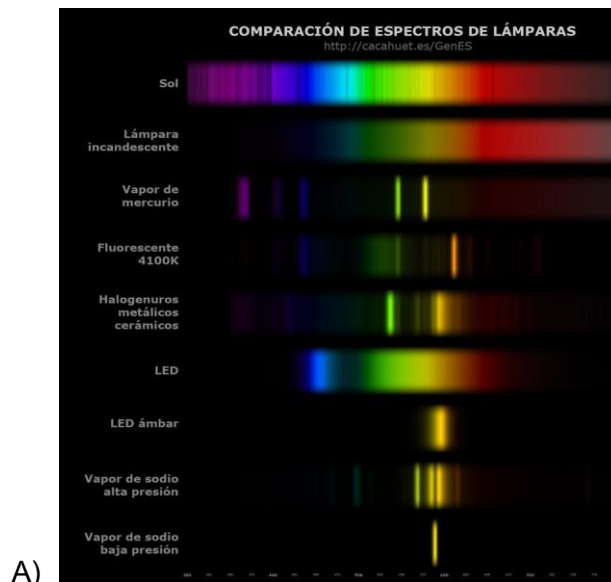


Figura II-1. A) Comparación del rango espectral de fuentes de iluminación natural y artificial, B) Comparación del rango espectral de lámparas con emisiones con vapor de sodio de alta presión (HPS) y LED. El eje horizontal representa la longitud de onda (nm), el eje vertical representa la energía emitida (%), en ambas puede observarse los picos de emisión en el amarillo con HPS y en el azul de las LED -450 nm- Fuente: <http://cacauiet.es/GenES>, <https://es.rclite.com/blog>

Una consecuencia de los acelerados cambios de las tecnologías de iluminación y la masificación de los LED con emisiones en el espectro del azul ha llevado a la revisión de los efectos dañinos que presentan estas tecnologías para todos los seres vivos y en general un impacto al medio ambiente. Entre sus impactos destacan la alteración en la salud humana, mortalidad y cambio de hábitos de insectos, desorientación de tortugas y anfibios, alteración del ritmo circadiano, relación presa-predador (Shibuya *et al.*, 2018; Davies *et al.*, 2013; Garret *et al.*, 2020; Sanders *et al.*, 2021; Gaston and Sánchez de Miguel, 2022; MacMahon *et al.*, 2022). Esto no solo ocurre en el entorno urbano sino en áreas distantes

de las ciudades como por ejemplo en zonas protegidas (Kyba et al., 2017; Bará & Lima, 2018; Cox et al., 2020; Garret et al., 2020).

La importancia de estudiar la diversidad de la emisión espectral radica en: a) permite comprender y enfocar las medidas de mitigación de la contaminación lumínica sugiriendo luminarias con diseños y emisiones menos perjudiciales a sus distintas sensibilidades espectrales y no afecten los ritmos circadianos de los seres vivos y la calidad del cielo para observar el paisaje nocturno; b) los sensores satelitales como el VIIRS/DNB capturan principalmente la luz visible y no discriminan entre diferentes longitudes de onda; c) su incidencia en los mecanismos de propagación de la luz en la atmósfera.

Como muestra la Figura II-2 para comprender la problemática de la contaminación lumínica es necesario considerar la naturaleza de la luz y su mecanismo de propagación en la atmósfera. En la primera, se incluye la emisión o liberación al ambiente de energía en forma espectral (visible o no) dependiendo de las tecnologías de iluminación utilizadas espectral de las tecnologías de iluminación utilizadas. Otro aspecto relevante es la influencia del medio ambiente en la dispersión de la luz, en ello se incluyen el tipo (polvo, vapor de agua), cantidad de partículas suspendidas y la humedad en la atmósfera tendrán diferentes comportamientos (mecanismos de Rie y Raleigh).

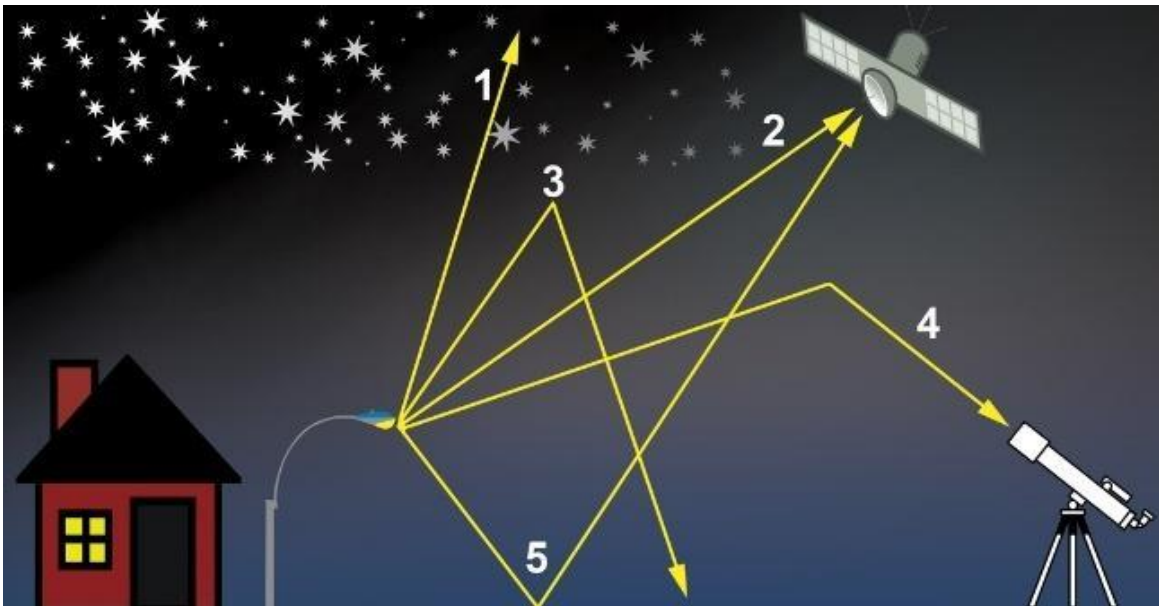


Figura II-2. Comportamiento de la luz en la atmósfera originando contaminación lumínica y resplandor. (1) y (2) La luz emitida de las fuentes de iluminación en todas direcciones incluyendo el cielo nocturno y una porción es capturada por los sensores satelitales y alcanza grandes distancias afectando los observatorios (4). (3) Una porción de la luz es reflejada nuevamente al suelo por las partículas de la atmósfera formando resplandor. Fuente: Barentine, J. <https://www.johncbarentine.com/skyglow.html>

Esta figura es un ejemplo de cómo los factores ambientales contribuyen a magnificar la contaminación lumínica dependiendo del tipo de partícula y la longitud de onda, por ejemplo las longitudes de onda más cortas, como el azul, tienden a dispersarse más en la atmósfera (dispersión de Rayleigh) lo que aumenta el brillo del cielo nocturno (el resplandor, skyglow) a grandes distancias de la fuente (Kyba *et al.*, 2011; Cinzano & Falchi, 2012; Kocifaj, 2018).

Se origina por las fuentes luz artificial que viaja en todas las direcciones y al interactuar con las partículas en el aire y dispersarse genera un resplandor o domo de luz (skyglow) sobre los centros urbanos que es visible desde el espacio y por lo tanto capturado a través de sensores en los satélites (Falchi *et al.*, 2016; Cinzano *et al.*, 2001).

En resumen, esta problemática ambiental está relacionada con fuentes de iluminación nocturna no sólo con deficiente orientación, sino también con sus características espectral y de intensidad de las emisiones. Adicionalmente, la topografía, las nubes, la nieve y el tipo de partículas suspendidas en la atmósfera (Cinzano & Falchi, 2012; Aube *et al.*, 2016, Jechow & Hölker, 2019; Ściężor & Czaplicka, 2020).

2.2 Cuantificación de la Contaminación lumínica

Para cuantificar la contaminación lumínica sobre alguna localización en la superficie terrestre se utilizan diferentes métodos y herramientas computacionales basadas en modelos que consideran los factores que inciden en su propagación, por ejemplo, tamaño, forma, distribución espacial, patrones radiativos, características espectrales de las fuentes de iluminación, la atmósfera y la orografía adyacente (Kocifaj, 2011).

Algunas clasificaciones consideran el lugar desde donde se realiza la observación o cuantificación: espacial (satélites), terrestres y directas (Linares *et al.*, 2024; Figura II-3).

Otras clasificaciones consideran otras características y agrupan los sensores que realizan mediciones directas, terrestres y desde la atmósfera, en cuatro categorías: sensores espaciales, sensores aéreos, sensores pancromáticos en bases terrestres y sensores de imágenes en bases terrestres (Mander *et al.*, 2023; Figura II-4).

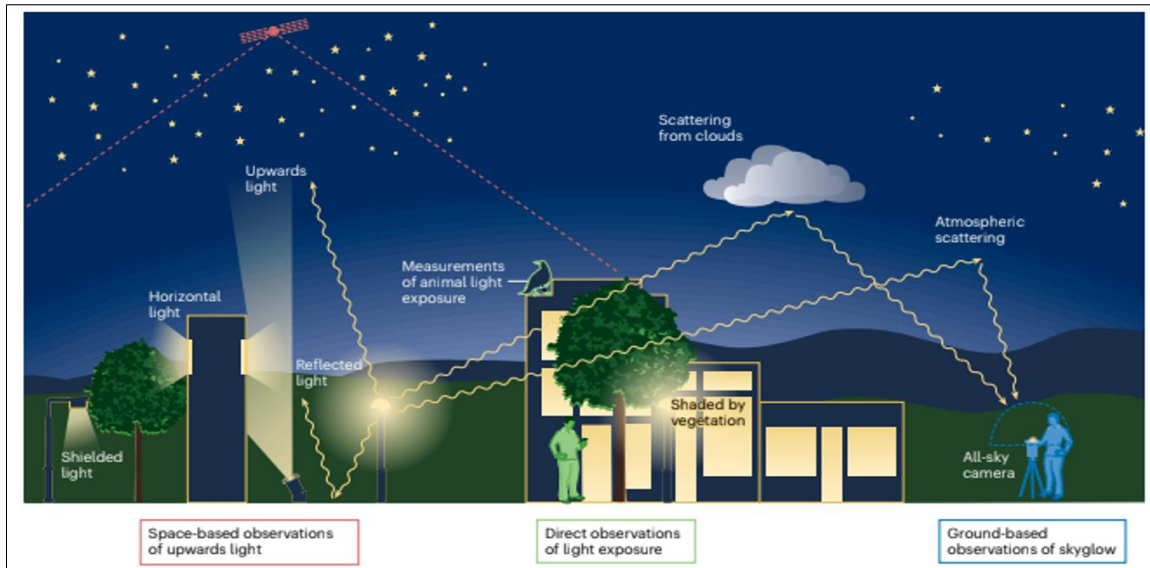


Figura II-3. Métodos para la cuantificación de la luz nocturna. Los satélites (rojo) detectan la luz directa y reflejada hacia arriba, sin embargo la vegetación puede impedir que se detecten algunas emisiones. Las observaciones terrestres (azul) incluyen cámaras de cielo completo, que miden la luz procedente de todas direcciones que ha sido dispersada hacia abajo por las nubes y la atmósfera. Las observaciones directas (verde) incluyendo mediciones con cámara o radiómetros acoplados a animales, pueden medir la luz horizontal. Fuente: Linares *et al.*, 2024.

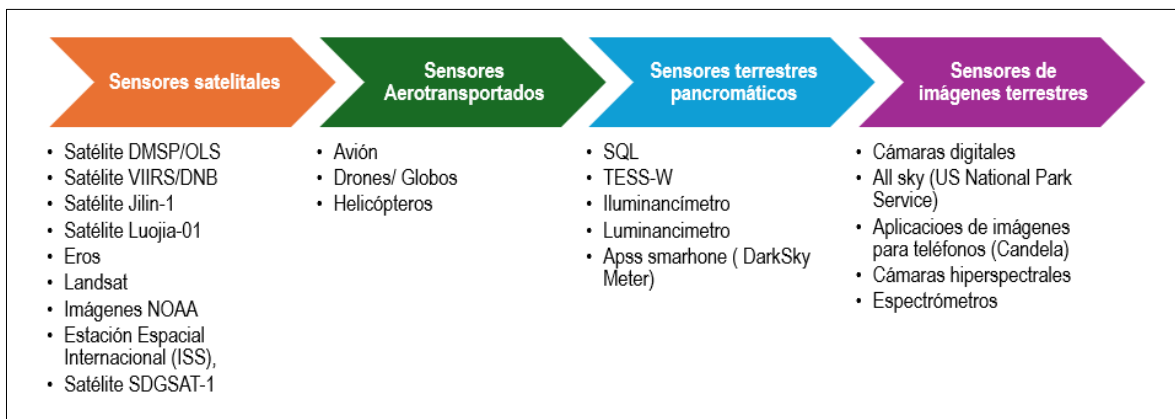


Figura II-4. Métodos para la cuantificación de la contaminación lumínica. Fuente: Modificado de Mander *et al.* (2023).

Considerando los objetivos de investigación, nos referiremos a los sensores remotos nocturnos. Inicialmente fueron diseñados para el seguimiento de algunos aspectos ambientales en especial: meteorológicos, vigilancia militar, estimación de población, monitoreo del desarrollo económico social, entre otros. Posteriormente, se descubrió su utilidad para el estudio de la contaminación lumínica con la obtención de información de la radiancia nocturna y desde la década de los años 70 se han estado utilizando y evolucionando con sensores más especializados y con mejores características. Destacan por su importancia y fecha de inicio de operaciones los siguientes satélites: DMSP/OLS,

VIIRS/DNB, las imágenes NOAA, las fotografías en el rango del visible desde la Estación Espacial Internacional (ISS), Jilin-1, Luojia-01 y SDGSAT-1, los cuales presentan diferentes características de resolución espacial, temporal, espectral y disponibilidad. Asimismo, de acuerdo con esas características, presentan una diversidad de sensibilidad ante la emisión de los diferentes espectros de luz (Tabla II-2 y Figura II-4).

Tabla II-2. Características de los satélites nocturnos. Fuente: Linares *et al.*, 2024.

Satellite	Orbit	Coverage	Overpass time (local)	Revisit period (days)	Swath (km)	Spatial resolution (m)	Spectral response (nm)	Data availability
SUOMI NPP with VIIRS DNB	Polar 830 km; Sun-synchronous orbit	Global; daily	-01h30	16	3,000	750	PAN 500-900	2012
DMSP with OLS	Polar 830 km; Sun-synchronous orbit	Global; every 14h	-20h30	-	3,000	2,700	PAN 400-1,100; low <500; >900	1992-2014
LUOJIA 1-01	Polar 645 km; Sun-synchronous orbit	Global; every 15 days	-	15	250	130	PAN 460-800	2019
JINLIN-1	Polar 480 km; Sun-synchronous orbit	-	-21h30	3.3	17	PAN 0.7; multi 3	RGB	2017
SDGSAT-1 with LLL	Polar 505 km; Sun-synchronous orbit	Global	-21h30	11	300	PAN 10; multi 40	PAN 450-900; RGB	2021
Eros-B	Polar 516 km	Global	-1h30	-	7×7; 7×250	0.7	PAN 500-900	2006
SkySat	Polar Sun-synchronous; inclined non-Sun-synchronous 53°	Global	-	6-12 per day	8	PAN 0.9; multi 2	PAN 450-900; RGB-NIR	-
ISS with Nikon D1-5	Low Earth orbit; 400 km; 51.6°	±51.6°	Any	3	40-3,000	4-740	RGB	2003
Landsat	Polar (98°); 705 km	Global	-	-	-	8	PAN 500-900	-
CE-SAT-1 with EOS5D	97.45°; 497-517 km	Global	-20h00	5	4.8×2.3	1	RGBA	2017

DMSP, Defense Meteorological Satellite Program; DNB, Day/Night Band; ISS, International Space Station; LLL, low light level; NIR, near infrared; OLS, Operational Linescan System; PAN, panchromatic band; RGB, red-green-blue bands; VIIRS, Visible Infrared Imaging Radiometer Suite.

La utilidad radica en que los sensores nocturnos permiten obtener imágenes para observar los cambios en el brillo del cielo y su incidencia en el paisaje nocturno, el control de medidas implementadas y los efectos globales de la contaminación lumínica. Asimismo, es posible combinar la información con modelos matemáticos para obtener mapas a detalle e imágenes como el primer atlas del brillo artificial del cielo nocturno (Cinzano *et al.*, 2001) y el nuevo atlas del mundo de la contaminación lumínica (Falchi *et al.*, 2016).

La información captada con estos sensores suele ser analizada con el uso de software y modelos. Asimismo, algunas plataformas permiten hacer análisis en línea utilizando las imágenes para cuantificar la contaminación lumínica, como es el caso del mapa de contaminación lumínica de Jurij Stare (<https://lightpollutionmap.info>). Adicionalmente, en la actualidad el procesamiento de las imágenes satelitales y otros productos es posible gracias a los avances en el desarrollo de herramientas que permiten el procesamiento de

gran cantidad de datos cómo Google Earth Engine (GEE) y la disponibilidad de algunos datos para ser utilizados directamente por esa plataforma.

Esta investigación plantea caracterizar por primera vez las fuentes municipales de contaminación lumínica del estado de Baja California para el periodo 2012-2021 utilizando imágenes del satélite meteorológico Suomi National Polar-Orbiting Partnership (Suomi NPP) y el instrumento Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), con el sensor Day-Night Band (DNB) que diariamente mide las emisiones de luz nocturna en el visible y en el infrarrojo cercano. El instrumento VIIRS toma imágenes nocturnas (1:30) y muestra la superficie y atmósfera terrestre captando la información de las fuentes de iluminación de los centros poblados, llamas de gas quemándose, auroras e incendios, entre otras. También han sido ampliamente utilizadas para estudios de caracterización de la contaminación lumínica en áreas urbanas y naturales y las relaciones con el uso de energía entre otras (Kyba *et al.*, 2015; Román *et. al.*, 2018). Las imágenes se caracterizan por su escala de degradación de grises (pancromática) y produce datos expresados en $nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$.

El sensor VIIRS/DNB opera en el rango espectral de 500 nm a 900 nm, por lo tanto, no es sensible al espectro en el rango del azul (Kyba *et al.*, 2015), lo cual es una dificultad para medir los efectos de las fuentes en tecnología LED cuyas emisiones estén dentro del rango que no es detectado (Figura II-5).

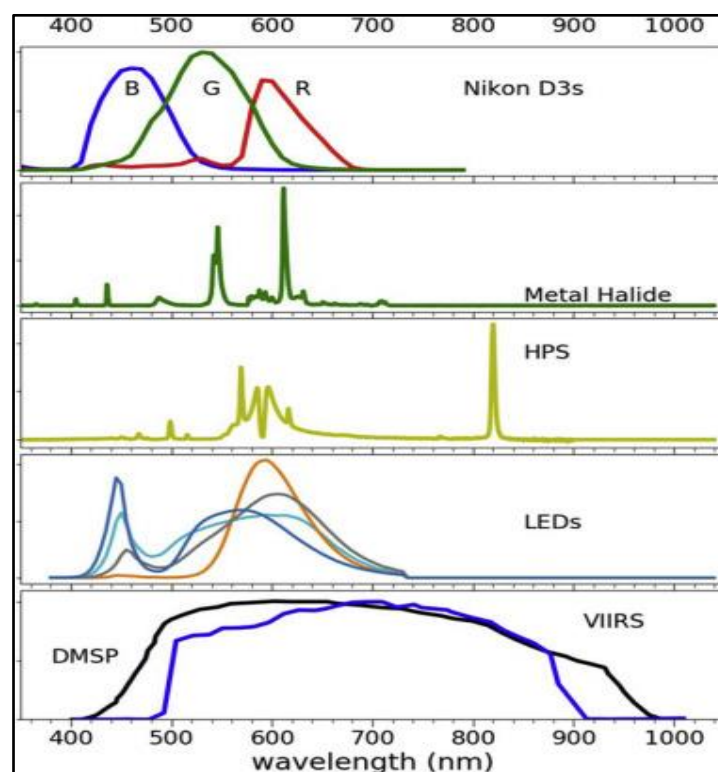


Figura II-5. Respuesta espectral de los sensores y fuentes de iluminación. Fuente: Levin *et al.* (2020).

La importancia de espacializar los niveles de radiancia consiste en que permite generar información útil para el diseño de las estrategias de mitigación con énfasis en los principales emisores. En este estudio, se seleccionaron los municipios como unidades emisoras de contaminación lumínica en el estado de Baja California. Esta selección se fundamenta en el marco legal mexicano, ya que, en concordancia con la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, los municipios son responsable de la supervisión e instalación del alumbrado público (Bará & Lima, 2018; Linares Arroyo *et al.*, 2020; Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos).

2.3 Delimitación del área de estudio

2.3.1 Área de estudio: estado de Baja California

El estado de Baja California se ubica entre los meridianos 112° 48' y 117° 08' de longitud oeste y entre los paralelos 28° 00' y 32° 43' de latitud norte, al noroeste de la República Mexicana, en la parte norte de la península de Baja California.

Limita al norte con los estados de California y Arizona (EE. UU.) con el que comparte 265 km de frontera internacional. Al este con el estado de Sonora y el Mar de Cortés (Golfo de California), al sur con el estado Baja California Sur y al oeste con el océano Pacífico. Se divide geopolíticamente en siete municipios: Mexicali, Tijuana, Ensenada, Tecate, Playas de Rosarito, San Quintín y San Felipe(Figura II-6).

Este estado posee una superficie de 71,450 km² distribuidos en un territorio insular, costeros, montañosos y desérticos en los cuales se asientan importantes centros de población urbana donde se ubican 3,510,076 habitantes para el año 2020 (INEGI, 2021).

2.3.2 Caracterización geográfica

El ambiente costero dominado por el mar de Cortés y el océano Pacífico, confiere al estado tres unidades fisiográficas: la costa, la sierra y el desierto. Esta diversidad geográfica y climática abarca desde zonas áridas y semiáridas hasta ecosistemas costeros y montañosos.

La región central está dominada por dos sierras, la Sierra de Juárez y la Sierra de San Pedro Mártir, que inciden directamente en las características climáticas lo que genera niebla y humedad en las costas occidentales, condiciones templadas en las montañas y calor extremo en los desiertos orientales. La región costera experimenta un clima mediterráneo templado, seco y semiseco, con inviernos suaves y húmedos y veranos calurosos y secos, mientras que las zonas montañosas tienen un clima templado

subhúmedo y semifrío. En contraste, las regiones desérticas del este exhiben condiciones áridas a extremadamente secas (INEGI, 2021).

Las precipitaciones son muy escasas, con un promedio anual de aproximadamente 200 mm, siendo más abundantes en zonas costeras y montañosas. Las principales especies vegetales predominantes son los matorrales, los bosques de pino y el chaparral de montaña, presentes en zonas de humedales.

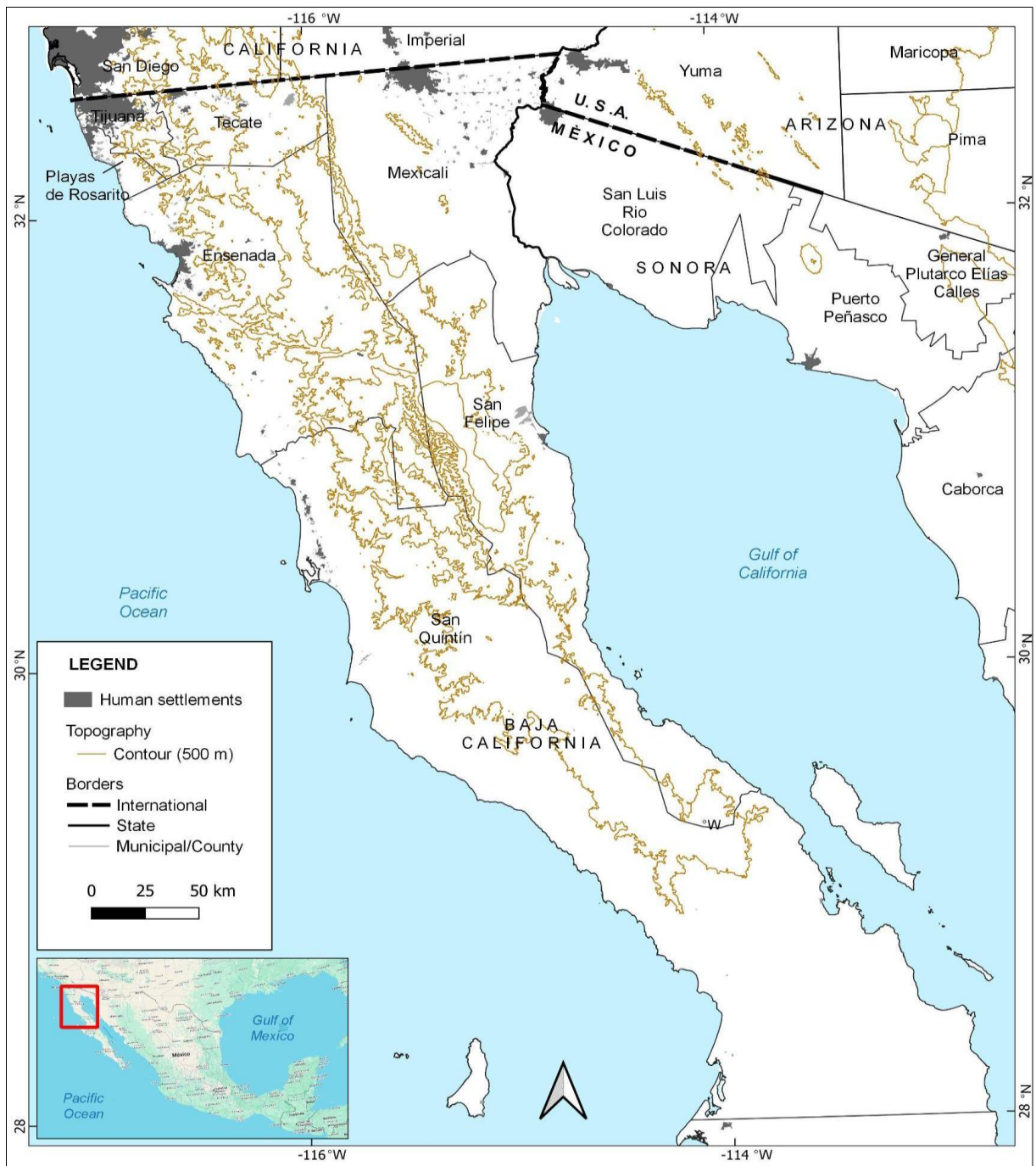


Figura II-6. Ubicación del área de estudio: estado de Baja California y sus municipios. Fuente: INEGI, 2020b.

El régimen de vientos está influenciado por la ubicación geográfica del estado, lo que le otorga características particulares de patrón de circulación:

- Vientos del oeste, provenientes de la costa del Pacífico.
- Vientos de Santa Ana, procedentes del este y caracterizados por ser cálidos, secos y cargados de partículas.
- Vientos fríos, procedentes del mar de Cortés.

El impacto se refleja en la presencia de vapor de agua en las zonas costeras, la dispersión de partículas de polvo en el valle de Mexicali procedentes del desierto Sonorense, y las brisas moderadas, que favorecen la viticultura en el valle de Guadalupe. Asimismo, se presentan fuertes vientos en San Quintín y La Rumorosa -con instalación de aerogeneradores- (Zamora-Machado *et al.*, 2023).

En algunas zonas, la presencia de partículas suspendidas con desplazamientos transfronterizos afecta la calidad de vida de los centros urbanos a ambos lados de la frontera con EE. UU. Las partículas se originan tanto en las regiones áridas del estado como en la erosión eólica (tormentas de polvo). Se presentan de manera intensa y ha sido ampliamente reportado en estudios sobre la ciudad y el valle de Mexicali (Chow *et al.*, 2000; Trasviña-Castro *et al.*, 2003; Álvarez, 2017; Morales-Acuña, 2019).

En el estado de Baja California se presenta un clima árido, donde predomina el clima muy seco (69%) y el clima seco (24%). En la zona de las sierras Juárez y San Pedro Mártir se presenta un clima templado subhúmedo y semifrío (7%). La temperatura media anual es de 18 a 19 °C, con temperaturas máximas que superan los 30 °C de mayo a septiembre y temperaturas mínimas que rondan los 5 °C en enero. En el clima semifrío de la Sierra de San Pedro Mártir, el factor altitudinal juega un papel importante, permitiendo bajas temperaturas y nevadas ocasionales en el invierno (Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2014).

La diversidad de ambientes naturales, que incluye ecosistemas terrestres, costeros y marinos, ha promovido el establecimiento de áreas naturales protegidas bajo diferentes categorías, tales como parques nacionales, monumentos naturales, reservas de biósfera y sitios Ramsar, entre otras. Asimismo, la iniciativa DarkSky International (DSI) promueve la creación de una reserva en San Pedro Mártir para la preservación de los cielos oscuros, con el objetivo de conservar sus valores paisajísticos, biológicos, culturales y científicos. La oscuridad natural es fundamental para la observación astronómica y la protección de especies nocturnas.

Entre las áreas protegidas más destacadas se encuentran el Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir y Parque Nacional Constitución de 1857. Además, diversas zonas costeras e islas revisten gran importancia para la conservación de aves migratorias, marinas y costeras; sin embargo, aún carecen de estudios especializados sobre el potencial impacto de la contaminación lumínica.

A nivel económico el estado posee una importancia geopolítica y económica significativa debido a su proximidad a los EE. UU y su integración a cadenas productivas binacionales. Esto se ha impulsado por acuerdos como el T-MEC (Tratado entre México, EE. UU. y Canadá que fortalece la manufactura orientada a la exportación) y el programa de industrialización fronteriza (1965), origen del modelo maquilador.

Adicionalmente, otros acuerdos bilaterales para la facilitación comercial incluyen el programa de aduanas seguras; tratados sanitarios para la inspección rápida para berries; los convenios de pesca y el tratado de aguas, entre otros.

Ello ha originado que la actividad económica con mayor peso corresponda al sector secundario, destacando la manufactura (maquiladora) y la producción tecnológica para el abastecimiento principalmente para el mercado estadounidense. Entre los sectores estratégicos se encuentran: el sector aeroespacial, los electrónicos, electrodomésticos, productos médicos, la biotecnología, las tecnologías de la información y la comunicación, los servicios médicos, el transporte y el sector vitivinícola.

Asimismo, se ha construido una infraestructura productiva que incluye dos importantes parques industriales y/o tecnológicos (Misión de Rosarito y Rosarito); ocho puertos -cinco comerciales, dos pesqueros y un petrolero- y cuatro aeropuertos (Secretaría de Economía, 2016).

Adicionalmente, los sectores primarios -agricultura y pesca- desempeñan un papel importante. Los valles agrícolas presentan una alta productividad debido al uso de sistemas de riego e invernaderos, con cultivos como moras, fresas y arándanos. Esta dinámica genera un flujo constante de productos agrícolas hacia la frontera norte, consolidando la integración económica regional.

El uso del suelo en el estado se caracteriza por la presencia de zonas urbanas, agrícolas, pecuarias y áreas naturales protegidas. Se destaca la concentración de las poblaciones urbanas en pequeñas porciones del territorio, mientras que mayor parte permanece despoblada en algunos municipios.

La presencia de recursos naturales y las actividades económicas que se desarrollan en el estado inciden en el patrón de distribución de los asentamientos urbanos y suburbanos, en las adyacencias de las zonas costeras, donde se ubican Tijuana, Ensenada, Tecate, Playas

de Rosarito y San Quintín en la costa del Pacífico y San Felipe, en el Mar de Cortés. En el interior del estado, Mexicali -la capital estatal- se localiza en el fértil valle del río Colorado adyacente al desierto de Sonora.

El uso agrícola se concentra en los valles irrigados, destacando el Valle de Mexicali, uno de los distritos de riego más importantes del país y los Valle de San Quintín y Guadalupe. Las actividades pecuarias por su parte se desarrollan principalmente en la zona de matorral y pastizal del centro y sur del estado. Cabe destacar que el estado de Baja California alberga numerosas áreas naturales protegidas que cubren aproximadamente el 25% de su territorio.

Esta diversidad natural motiva la preocupación por la prevención de los impactos de la contaminación lumínica en los mismos centros urbanos donde se genera y otras áreas distantes incluso en áreas naturales y transfronterizas, proceso similar a la contaminación del aire (Chow *et al.*, 2000; Bará & Lima, 2018; Falchi *et al.*, 2021).

El análisis de la radiancia nocturna permitirá caracterizar su distribución y su evolución temporal, aportando información clave para la gestión y regulación ambiental por parte de las autoridades para mitigar la contaminación lumínica del estado de Baja California.

El objetivo principal de este capítulo es caracterizar las fuentes de contaminación lumínica en el estado de Baja California, considerando las aportaciones municipales y utilizando datos satelitales de SUOMI NPP (VIIRS) para el periodo 2012-2021. Específicamente: 1) Identificar los valores de radiancia e intensidad en el estado de Baja California; 2) Analizar las variaciones espaciales y temporales de los niveles de contaminación lumínica para el periodo 2012-2021; (3) Identificar los municipios que constituyen las fuentes de contaminación lumínica con mayor contribución de radiancia. Esta investigación aborda la contaminación lumínica desde una perspectiva geográfica e interdisciplinaria considerando sus implicaciones ambientales, astronómicas y sociales.

2.4 Metodología utilizada para la cuantificación de la contaminación lumínica en Baja California

En esta sección se describe la fuente de datos satelitales utilizada y el procedimiento de investigación del capítulo. Las herramientas utilizadas para el proceso general: el sistema de información geográfica (SIG) y el Google Earth Engine (Figura II- 7).



Figura II- 7. Procedimiento para el estudio de la contaminación lumínica con imágenes satelitales en BC. Fuente: Elaboración propia.

Revisión documental

Para la selección de la información satelital a utilizar, se realizó una revisión documental de los satélites que disponen de información nocturna para el área de estudio y considerando el rango temporal 2012-2021.

Selección del satélite, sensor y producto ráster

Se seleccionó el satélite NPP Suomi que incorpora el Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) y el sensor Day/Night Band (DNB), debido a su continua cobertura temporal y espacial, y a su disponibilidad en plataformas de acceso abierto, lo que facilita su integración en el entorno de análisis espacial de Google Earth Engine (GEE).

Específicamente, se utilizó el producto diario de la NASA denominado “Black Mable” producto “VNP46A2”, el cual proporciona información de la variable principal, la radiancia nocturna expresada nanovatios por centímetro cuadrado por estereorradián ($nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$) a una resolución espacial de 500 m y a resolución espectral de 500 a 900 nm. Esta imagen proporciona medidas corregidas de radiancia, eliminando reflejos lunares y otras fuentes de ruido (Román *et al.*, 2018; <https://blackmarble.gsfc.nasa.gov/#product>).

Selección de información demográfica y geográfica vectorial

Para integrar la información satelital con datos geográficos y demográficos se utilizó información censal, polígonos de delimitación oficial estatal, municipal y localidades urbanas del INEGI (formatos CSV y SHP).

Las localidades urbanas son áreas geoestadísticas básicas de tipo urbano -AGEBUR- que se definen en función de una población mayor de 2,500 habitantes o cabecera municipal.

Cada polígono representa una unidad territorial definida a partir del límite de las manzanas (INEGI, 2020b). De acuerdo con estos criterios INEGI identifica 48 asentamientos urbanos en Baja California.

Procesamiento de imágenes satelitales con Google Earth Engine (GEE)

Se empleó la herramienta de Google Earth Engine (GEE) para obtener el promedio de la radiancia al cenit expresada en $nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$.

a) Preprocesamiento

- Elaborar el Script Inicial: Se desarrolló un script en Google Earth Engine (GEE) para cargar las imágenes del producto VNP46A2 y delimitar el área de estudio utilizando los polígonos de límites estatales y municipales.
- Cálculo Estadístico: Se programó el cálculo de la media y mediana de la radiancia para el municipio de Ensenada para el año 2012, con el objetivo de identificar valores atípicos de radiancia en el municipio y ajustar el script definitivo. Estos valores representan datos anómalos que se desvían del comportamiento general del conjunto de datos y que podrían distorsionar el promedio anual.

b) Procesamiento Definitivo

Se desarrolló una versión definitiva del script en GEE para una estimación del promedio anual ajustado, basado exclusivamente en datos diarios representativos. Adicionalmente, se obtuvieron los siguientes productos:

- Superficie y número de píxeles de los municipios.
- Promedio y la mediana de la radiancia al cenit expresada en $nW \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$ por municipio y localidades urbanas para el periodo 2012-2021.
- Imagen pancromática con el promedio de la radiancia al cenit para el año 2021.

Procesamiento de la información en Microsoft Excel

Se utilizó esta herramienta para facilitar los procesos siguientes:

- Consolidación de la información obtenida: Se crearon tablas consolidadas de resultados agrupados por municipio y año, identificando además los municipios con mayor luminosidad.
- Cálculo de la intensidad radiante: La intensidad radiante se estimó multiplicando la superficie por la radiancia y expresada en nanovatios por estereorradián ($nW \cdot sr^{-1}$) con el propósito de cuantificar la energía emitida por municipio y asentamiento

urbano. Este cálculo considera cada superficie territorial, permitiendo realizar comparaciones entre diferentes municipios / localidades.

Los valores obtenidos para los asentamientos urbanos presentan magnitudes superiores a los calculados a escala municipal. Esto se debe a la metodología empleada, en la cual la radiancia municipal incorpora la totalidad de la superficie de cada municipio, incluyendo áreas rurales y naturales con menor densidad lumínica. En contraste, al delimitar exclusivamente los polígonos urbanos se obtiene una estimación más precisa de la radiancia dentro de la zona de mayor concentración de fuentes luminosas que tienen mayor impacto en la contaminación lumínica.

- Exportación de los resultados en forma de tablas y figuras.

Integración de la información con el SIG

Se integró la información sociodemográfica y las imágenes satelitales utilizando QGIS para vincularlos con los asentamientos urbanos mayores y zonas rurales.

2.4.1 Limitaciones del estudio

El uso de imágenes del satélite Suomi para la cuantificación de la contaminación lumínica conlleva ciertas limitaciones que han sido presentadas y discutidas por diferentes autores (Kyba *et al.*, 2017, Fernández-Ruiz *et al.*, 2023). Sin embargo, siguen siendo el único recurso que permite hacer análisis históricos a partir del año 2012 cuando inicia su funcionamiento.

La principal limitación se relaciona con el sensor Day/Night Band (DNB), que lo hace muy sensible a la luz en el rango de longitud de onda de 500 a 900 nm, pero prácticamente “ciego” a longitudes de onda por debajo de los 500 nm. Ello implica que VIIRS no detecta adecuadamente la luz azul, componente de las tecnologías de iluminación modernas, como los diodos emisores de luz (LED), cuyos picos de emisión se encuentran en longitudes de onda de aproximadamente 450 nm (Sánchez de Miguel, 2021).

Adicionalmente, recientes estudios plantean su escasa sensibilidad para zonas muy oscuras, lo que limita su precisión en áreas con poca contaminación lumínica y por ello se sugiere el uso combinado con fotómetros para su calibración (Fernández-Ruiz *et al.*, 2023).

2.5 Resultados y discusión

En los resultados obtenidos se han identificado de manera espacial los valores de promedio de radiancia nocturna correspondientes a las fuentes de contaminación lumínica municipal

y asentamientos urbanos en el estado de Baja California, distinguiendo los mayores emisores mediante las variables estadísticas del promedio anual de radiancia.

2.5.1 Evolución y tendencias de la contaminación lumínica por municipios del estado de Baja California

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis satelital de la contaminación lumínica en Baja California para el periodo 2012-2024 donde se han cuantificado los niveles de radiancia nocturna a escala municipal (Tabla II-3).

Tabla II-3. Promedio de radiancia al cenit ($nW\ cm^{-2}\ sr^{-1}$) de los municipios del estado de Baja California 2012 -2021. Fuente elaboración propia con datos VIIRS.

Municipio	Años										Promedio		Variación 2012-2021	
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2012-2021	Desviación estándar	Absoluta ($nW\ cm^{-2}\ sr^{-1}$)	Relativa (%)
Tijuana	10.70	9.78	9.67	9.17	9.81	11.04	11.72	12.55	12.82	13.51	11.08	1.51	2.81	25
Playas de Rosarito	2.76	2.82	2.92	2.96	2.90	3.18	3.43	3.55	3.45	3.50	3.15	0.31	0.74	23
Mexicali	1.93	1.92	1.85	1.78	1.76	1.77	1.82	1.82	1.79	1.90	1.83	0.06	-0.03	-2
Tecate	0.96	0.91	0.84	0.86	0.78	0.86	0.86	0.86	0.75	0.83	0.85	0.06	-0.12	-14
Ensenada	0.57	0.58	0.59	0.59	0.55	0.61	0.60	0.58	0.48	0.52	0.57	0.04	-0.05	-9
San Quintín	0.39	0.43	0.38	0.40	0.37	0.41	0.40	0.34	0.23	0.24	0.36	0.07	-0.15	-41
San Felipe	0.32	0.29	0.32	0.30	0.27	0.29	0.26	0.23	0.16	0.18	0.26	0.05	-0.14	-53

Los municipios que aportan el 88% de toda la radiancia al zenit del estado de Baja California para el periodo 2012 -2021 son Tijuana con un 61%, Playas de Rosarito 17% y Mexicali el 10%. Los municipios con un menor aporte son Tecate 5%, Ensenada 3%, San Quintín 2% y San Felipe 2%. Este orden se ha mantenido en el tiempo, lo cual puede sugerir un crecimiento sostenido de la iluminación de los asentamientos urbanos (Figura II-8).

Los datos muestran un incremento de 22% ($2.474\ nW.cm^{-2}.sr^{-1}$) y 10% ($0.322\ nW.cm^{-2}.sr^{-1}$) de la radiancia de los municipios de Tijuana y Playas de Rosarito a partir del año 2017, hasta alcanzar valores de $13.5124\ nW.cm^{-2}.sr^{-1}$ y $3.500\ nW.cm^{-2}.sr^{-1}$ en 2021. Estos valores podrían estar asociados al nuevo desarrollo urbano, el crecimiento de la infraestructura y el uso de tecnología de iluminación sin apantallamiento y de alta intensidad.

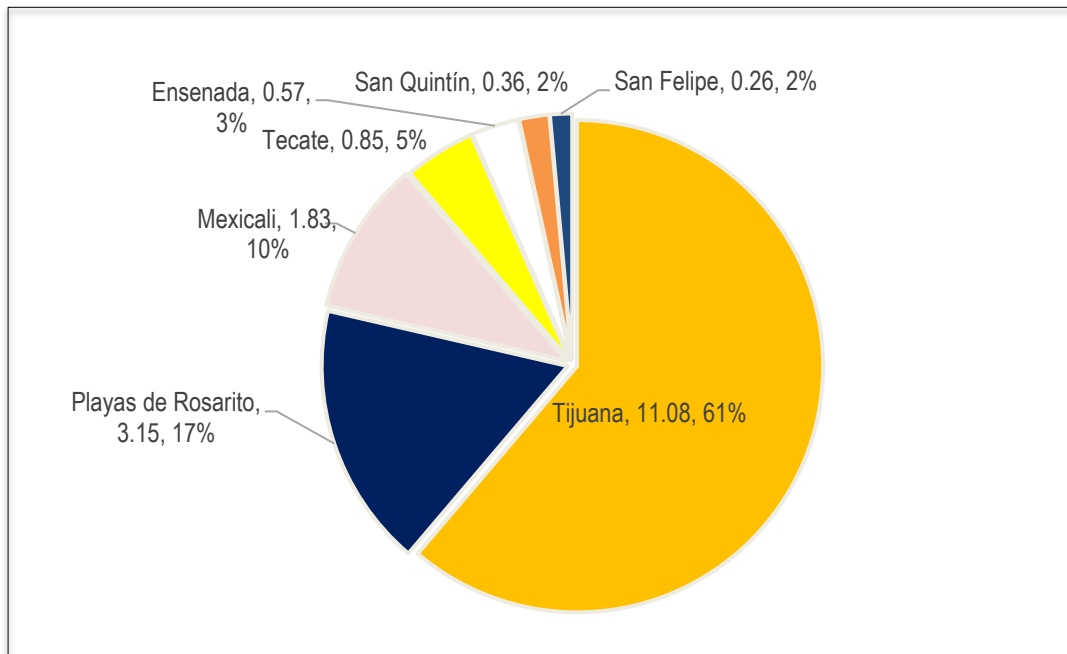


Figura II-8. Promedio de radiancia al cenit de los municipios del estado de Baja California para el periodo 2012 - 2021. Fuente: Elaboración propia con datos de imágenes VIIRS.

En contraste, algunos municipios como Mexicali, Tecate y Ensenada muestran una tendencia estable, pero con valores mucho menores que Tijuana, lo cual puede atribuirse a que no ha habido cambios drásticos en los sistemas de iluminación artificial o bien que ya están densamente urbanizadas. También contempla la posibilidad de la incorporación de luminarias LED, adoptadas en el marco de las normativas municipales para la protección del OAN-SPM (es el caso de Ensenada), incorporando nuevos diseños y sistemas de iluminación donde predominan luminarias LED, haya contribuido a que estos sensores no registren incrementos en radiancia, debido a su insensibilidad en el rango del azul.

Por otro lado, los municipios San Felipe y San Quintín muestran valores más bajos y una tendencia estable o incluso decreciente; esto podría estar relacionado con la presencia de áreas remotas, áreas protegidas o zonas con poca urbanización y pocos servicios de iluminación pública.

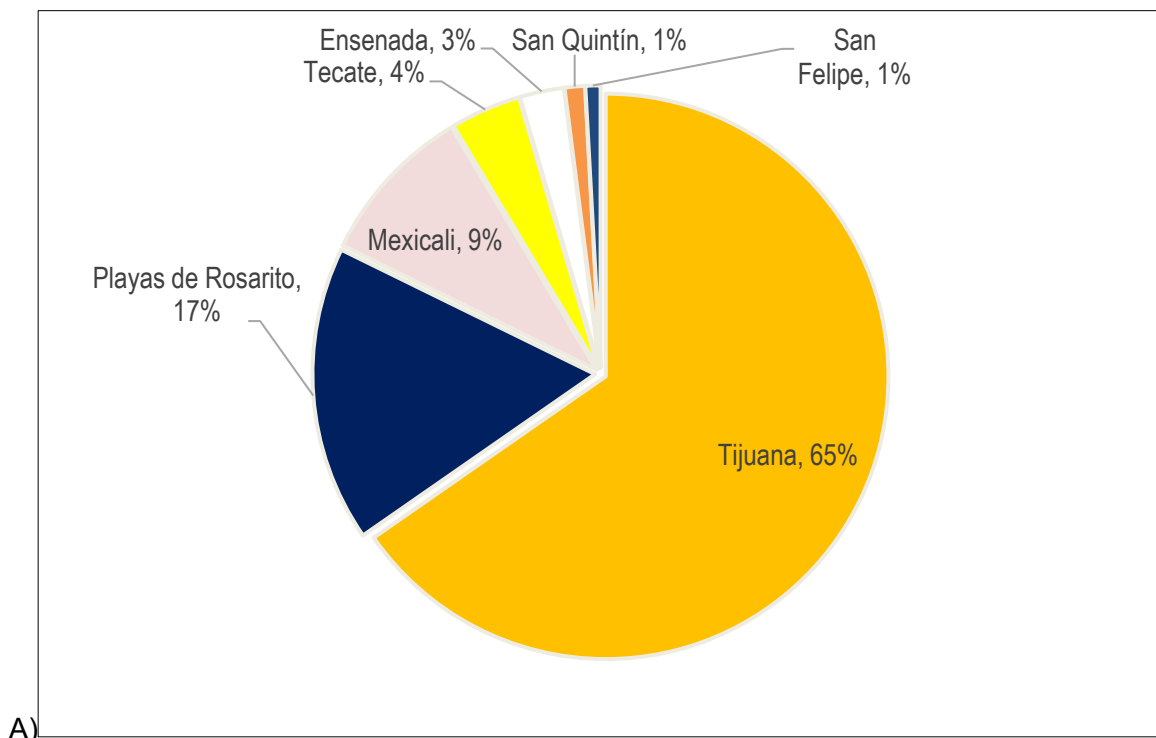
El promedio de radiancia durante el periodo evaluado sugiere una tendencia positiva de crecimiento general, destacando a los municipios Tijuana y Playas de Rosarito, que concentran los centros urbanos con mayor población y son los principales contribuyentes a la contaminación lumínica en el estado. Este comportamiento es consistente con los estudios previos que han vinculado la densidad urbana y la presencia de contaminantes ambientales, como partículas, a la amplificación de la radiancia.

En términos generales se identifican dos tendencias en el comportamiento de la radiancia:

1. Incremento general: en los municipios de Tijuana y Playas de Rosarito con 25 y 23% de incremento en la década reflejando las dinámicas urbanas.
2. Estabilidad o declinación: en el resto de los municipios, lo cual podrían indicar la existencia de factores como la sustitución de sistemas de iluminación tradicionales por iluminación LED o la ausencia de sistemas de iluminación pública.

El año 2021 se destaca por presentar una tendencia notable en el comportamiento de la contaminación lumínica es el estado de Baja California, alcanzando valores máximos en de radiancia en algunos municipios. Este incremento podría estar relacionado con la reactivación de las actividades urbanas y económicas después de las restricciones impuestas durante la pandemia del COVID-19 en el año 2020. Este comportamiento es consistente con el comportamiento de la luminosidad reportado en otras regiones del mundo como China, España y Czechia, donde se registró que las ciudades brillaron hasta un 50% menos durante la pandemia, a consecuencia de la reducción de la circulación y la disminución de la concentración de partículas atmosféricas, lo que redujo el brillo del cielo (Liu *et al.*, 2020; Bustamante-Calabria *et al.*, 2021; Pavlačka *et al.*, 2023; Figura II-9A y 9B).

Adicionalmente, la ejecución de proyectos de infraestructura de iluminación y urbanización que, en ocasiones, no cumplen completamente con las regulaciones sobre las emisiones espectrales puede explicar el incremento generalizado de la radiancia, a pesar de las limitaciones en la lectura del rango del azul del sensor DNB de VIIRS.



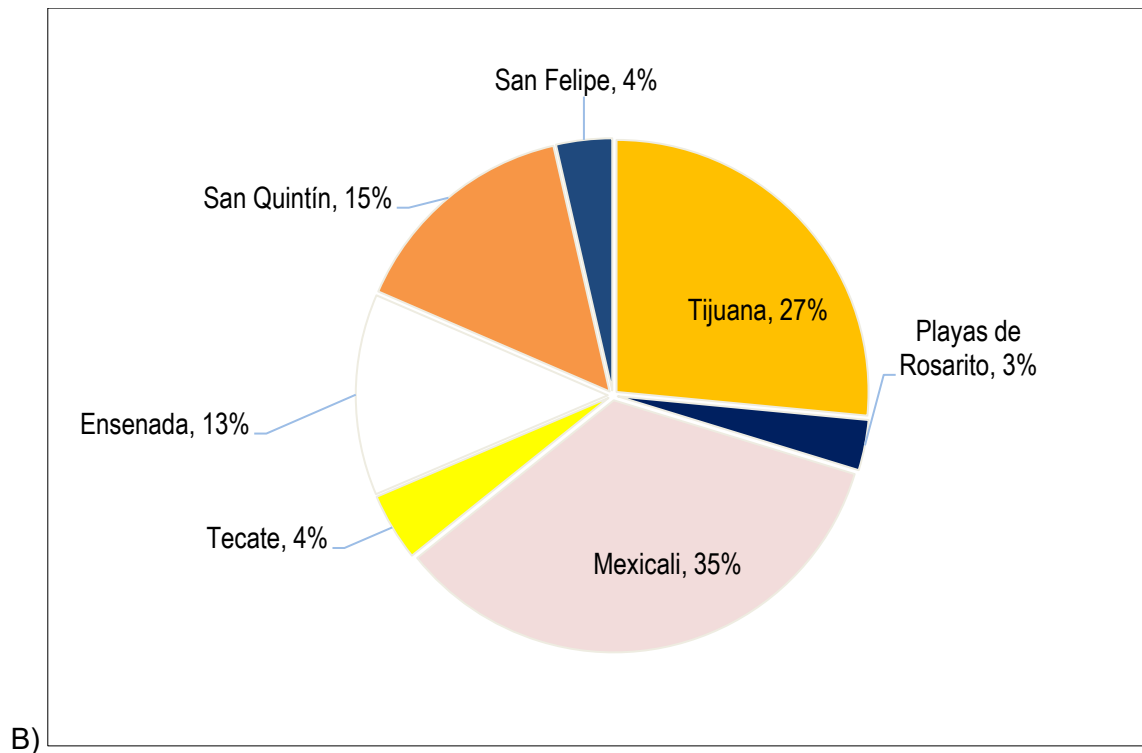


Figura II-9. A) Porcentaje del promedio de radiancia por municipios BC, 2021; B) Porcentaje de intensidad radiante por municipios BC, 2021. Fuente: Elaboración propia con datos de imágenes VIIRS.

Finalmente, de acuerdo con los promedios de radiancia por municipio para el año 2021 los mayores emisores son Mexicali, Tijuana y Playas de Rosarito con valores de 13.51 a 1.8 $\text{nW cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$. Así mismo los municipios de Ensenada, Tecate y San Quintín presentan valores de media contaminación lumínica (entre 0.8 a 0.23 $\text{nW cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$), y se registra la menor contaminación lumínica en el municipio San Felipe con 0.17 $\text{nW cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ (Figura II-10).

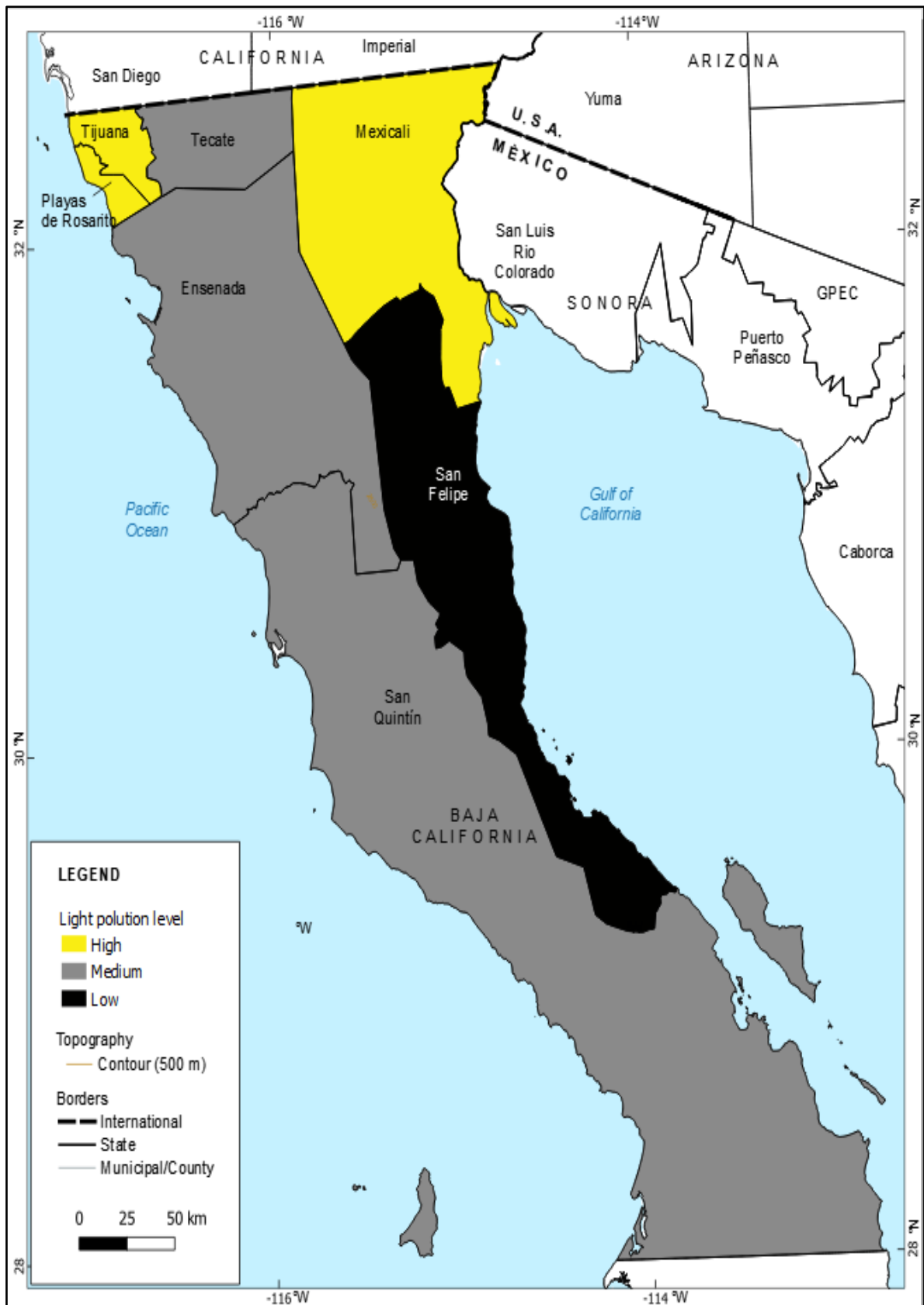


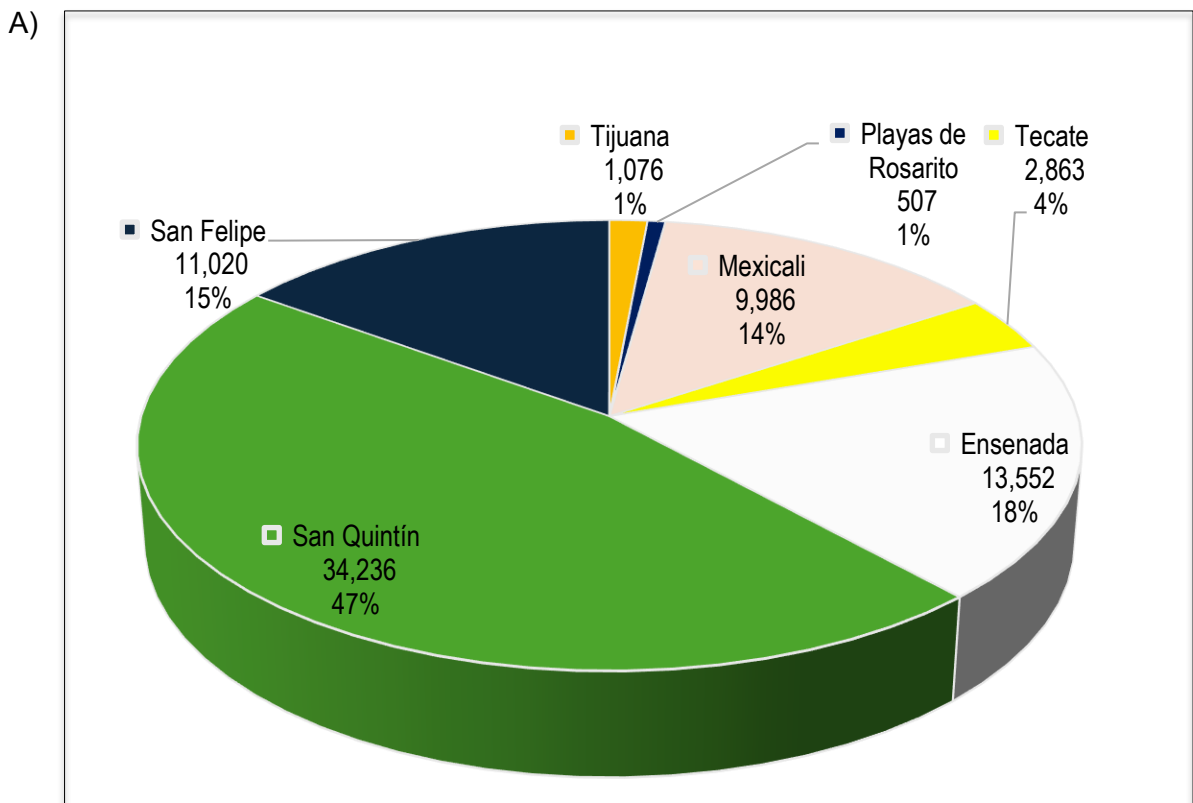
Figura II-10. Clasificación de los niveles de contaminación lumínica por municipio, 2021.

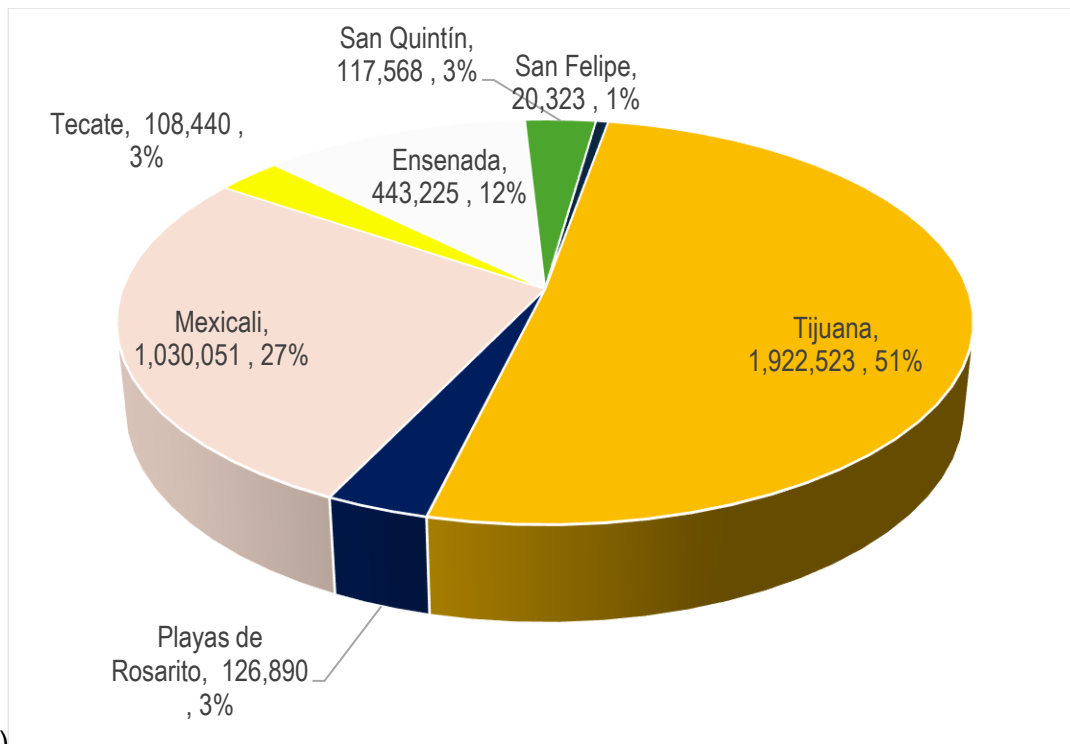
2.5.2 Intensidad radiante

En cuanto a la intensidad radiante, mide la emisión de luz con respecto a la superficie municipal. Mexicali y Tijuana son los municipios que presentan mayor brillo por unidad de superficie con 35 y 27 % respectivamente para el año 2021 (Tabla II-4 y Figura II-11).

Tabla II-4. Intensidad radiante en los municipios de BC, 2012-2021. Fuente: Elaboración propia con datos de imágenes VIIRS y datos de población del INEGI (2021).

Municipios		Población (2020)			Intensidad radiante		
Municipio	Superficie (km ²)	Total	Densidad	Nivel de densidad	Promedio 2012-2021	2021 (nW.sr ⁻¹)	2021 (%)
Tijuana	1,076.44	1,922,523	1,786	Alto	119,234.84	145,453.78	27%
Mexicali	9,985.89	1,030,051	103	Medio	183,138.91	189,401.35	35%
Ensenada	13,551.62	443,225	33	Bajo	76,717.97	70,858.61	13%
Playas de Rosarito	506.64	126,890	250	Alto	15,941.74	17,731.65	3%
San Quintín	34,235.74	117,568	3	Bajo	122,751.63	81,894.62	15%
Tecate	2,862.86	108,440	38	Bajo	24,367.43	23,842.09	4%
San Felipe	11,019.63	20,323	2	Bajo	28,902.41	19,671.66	4%





B)

Figura II-11. A) Superficie de los municipios (km² y %); B) Población total por municipios de Baja California. Fuente: Cálculos de superficie utilizando GEE; datos de INEGI (2020a).

El análisis de los datos de intensidad radiante en los municipios de Baja California evidencia diferencias significativas en la emisión de la luz nocturna al cénit, las cuales pueden estar relacionadas con la densidad poblacional y la actividad económica que se desarrolla en cada municipio.

Mexicali registra la mayor intensidad lumínica para el año 2021, con 189,401 nW.sr. A pesar de su densidad poblacional media, este valor se relaciona con sus actividades económicas, principalmente industriales, maquiladoras y agricultura intensiva, así como el uso extendido de alumbrado público en áreas rurales y urbanas, donde predomina la iluminación con vapor de sodio de alta presión.

Tijuana es el municipio con mayor concentración y población urbana y un desarrollo urbano acelerado, muestra una intensidad menor que Mexicali. Sin embargo, ha implementado programas de sustitución de alumbrado de sodio baja presión por tecnología LED, lo que podría influir en la reducción del brillo registrado por el sensor satelital.

Los municipios con baja densidad poblacional como San Quintín y Ensenada presentan patrones diferenciados de radiancia que pudiesen estar relacionados con sus sistemas de iluminación pública y actividades económicas.

El municipio de San Quintín emite 15% de la luz regional, lo cual puede atribuirse a la presencia de agricultura intensiva con iluminación en invernaderos y un sistema de iluminación pública basado en sodio a baja presión.

El municipio de Ensenada posee mayor densidad y población que San Quintín, presenta una menor intensidad a pesar de poseer dos importantes puertos de carga que son sitios con intensa iluminación. Adicionalmente, del municipio que impulsó en el año 2016 un plan masivo de sustitución de alumbrado público de sodio a baja presión por LED, instalando 25,000 LEDs blancos de 5,500 K, que podría explicar los cambios en su radiancia.

El municipio de Playas de Rosarito muestra una alta densidad de población (250 hab/km²), combinado con una intensa actividad turística y patrones de urbanización compacta influye en su patrón de iluminación.

Por otro lado, los municipios Tecate y San Felipe con las menores densidades de población presentan emisiones mínimas. No obstante, presentan diferentes tecnologías en su sistema de alumbrado público: en Tecate el 92% del alumbrado público son LEDs y en San Felipe aún predomina el vapor de sodio de alta presión.

2.5.3 Intensidad lumínica en las localidades urbanas de Baja California

El análisis de la intensidad radiante en los municipios de Baja California durante el período 2012 -2021 muestra patrones importantes de contaminación lumínica. Tomando en cuenta los datos de radiancia provenientes de los 48 asentamientos urbanos definidos en la cartografía oficial y agrupados por municipios (INEGI, 2020b). Los resultados indican que el mayor número de asentamientos urbanos se localizan en los municipios Mexicali (14), Ensenada (9), San Quintín (9) y Tijuana (9). Sin embargo, Mexicali, Tijuana y Ensenada concentran los polígonos urbanos con mayor superficie (298, 237 y 110 km², respectivamente) y población (1,893,361; 933,827 y 397,099 habitantes) (Tabla II-5).

Tabla II-5. Promedio de radiancia de los asentamientos urbanos por municipios de BC, 2012-2021. Fuente: Elaboración propia con datos de imágenes VIIRS, polígonos urbanos INEGI (2020).

Asentamientos urbanos				Promedio de radiancia ($nW\ cm^{-2}\ sr^{-1}$)										
Municipios	Nº	Área (km ²)	Población total (2020)	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2021 (%)
Mexicali	14	237	933,827	293.82	289.66	272.81	265.84	272.44	264.78	272.33	273.63	278.53	285.96	36
Tijuana	9	298	1,893,361	207.53	198.98	191.12	182.17	181.04	197.62	216.21	208.01	222.57	224.62	28
Ensenada	9	114	397,099	110.23	112.59	110.97	112.35	108.57	110.81	114.75	108.50	111.98	120.63	15
San Quintín	9	28	73,663	68.21	69.90	73.91	71.53	63.27	56.59	60.58	59.65	58.16	63.58	8
Tecate	4	32	93,564	46.74	44.92	36.31	34.46	33.90	35.80	37.87	40.53	41.57	45.23	6
Playas de Rosarito	2	38	106,898	30.49	30.31	32.94	34.10	33.38	34.21	37.24	36.88	38.00	37.14	5
San Felipe	1	11	17,143	23.10	22.70	20.40	20.85	22.09	22.09	22.95	22.91	22.83	22.11	3

En términos de emisiones de radiancia los municipios con los valores más elevados para el año 2021 se ubican en los siguientes municipios:

- Mexicali (36%): Mexicali, Vicente Guerrero (Algodones), Ciudad Guadalupe Victoria, Ciudad Morelos y Ciudad Coahuila.
- Tijuana (28%): Tijuana, Villa del Campo, El Niño, Parques del Valle.
- Ensenada (15%): Ensenada

A lo largo del periodo de estudio, la radiancia en las localidades urbanas del municipio Mexicali ha sido significativamente superior (36%) a la de los demás municipios, incluso superando a Tijuana que presenta casi el doble de la población y una superficie ligeramente mayor. En consecuencia, Mexicali y sus asentamientos urbanos destacan como la principal fuente de contaminación lumínica en la región, como se observa en la Figura II-12.

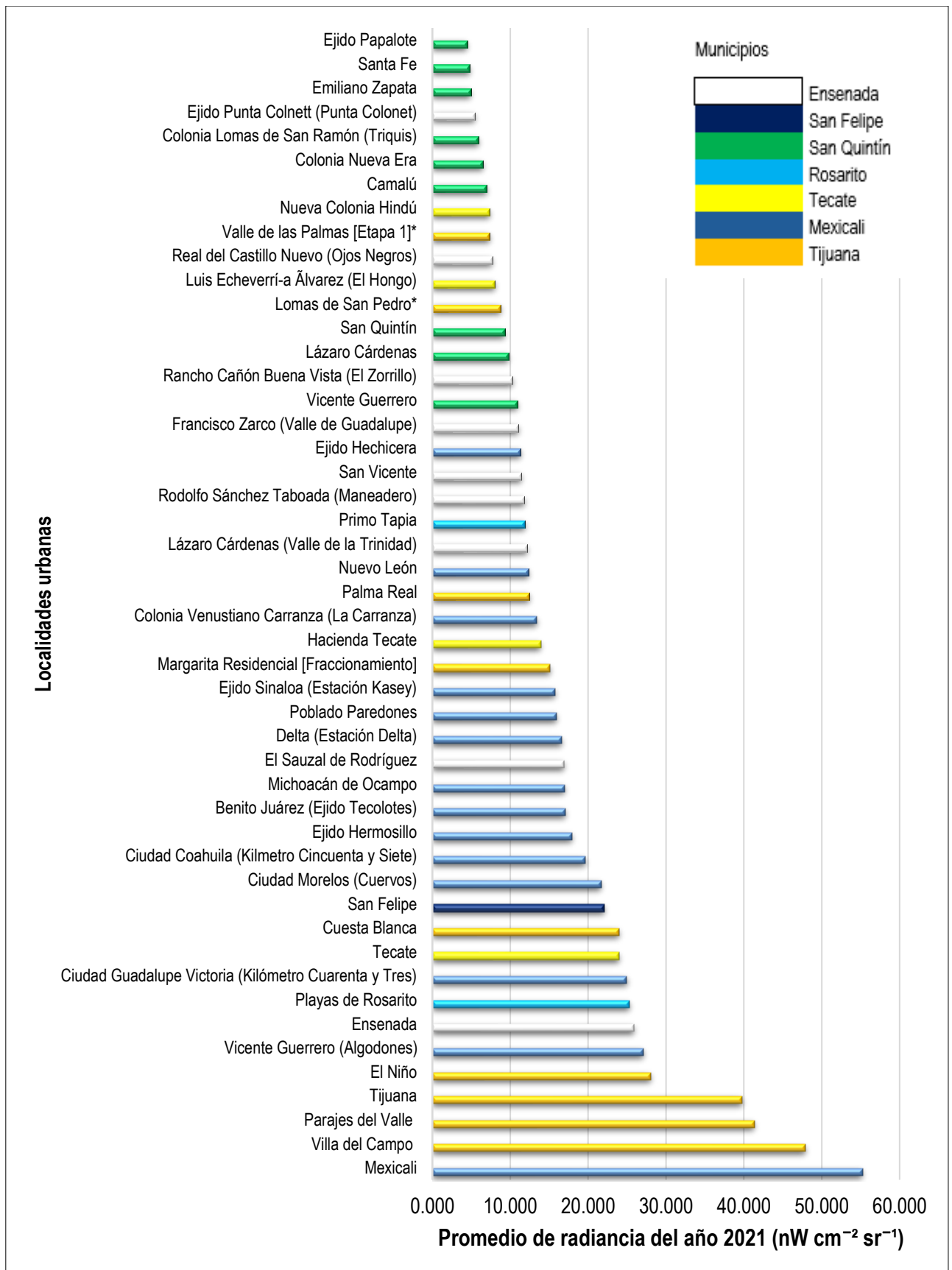


Figura II-12. Promedio de la radiancia de los asentamientos urbanos por municipios del estado de Baja California 2012-2021. Fuente: Elaboración propia con datos de imágenes VIIRS, polígonos INEGI (2020).

En cuanto a la evolución temporal de la intensidad radiante donde se incluye la superficie de cada asentamiento urbano, las tendencias temporales por municipio nos indican cierto comportamiento diferenciado que se resumen en la Tabla II-6 y a continuación:

- Mexicali: durante el año 2014 presenta una disminución alcanzando $110.88 \cdot 10^{12} \text{nW} \cdot \text{sr}^{-1}$, seguida de un incremento sostenido hasta $116.92 \cdot 10^{12} \text{nW} \cdot \text{sr}^{-1}$ en 2021.
- Tijuana: experimentó un descenso hasta $79.95 \cdot 10^{12} \text{nW} \cdot \text{sr}^{-1}$ en 2015, seguido por una recuperación de manera significativa alcanzando $117.36 \cdot 10^{12} \text{nW} \cdot \text{sr}^{-1}$ en 2021.
- Ensenada: presenta una variación menos pronunciada Tijuana. Sin embargo, registró un incremento del orden del 12 al 13%, sugiriendo cambios en la infraestructura urbana o la extensión de las áreas iluminadas.
- Playas de Rosarito: mostró un crecimiento similar al de Tijuana en términos porcentuales, lo que sugiere un aumento de la intensidad radiante debido al aumento en la densidad del desarrollo turístico o residencial.
- Tecate, San Felipe y San Quintín: estos municipios experimentaron reducciones del 8.8%, 4.3% y 8% respectivamente. La disminución en Tecate puede estar vinculada a la incorporación de alumbrado público con LED, mientras que en San Felipe y San Quintín se ha iniciado, aunque de manera lenta, la sustitución de luminarias de vapor de sodio por LED.

Tabla II-6. Promedio de intensidad radiante de los centros urbanos por municipios del estado de Baja California 2012 -2021. Fuente: Elaboración propia con datos de imágenes VIIRS.

Asentamientos urbanos				Suma de intensidad radiante de los asentamientos urbanos por municipio (* $10^{12} \text{nW} \cdot \text{sr}^{-1}$)										
Municipios	N°	Superficie (km ²)	Población (2020)	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2021 (%)
Tijuana	9	298	1,893,361	94.49	85.84	84.99	79.95	86.05	96.35	101.89	109.41	112.18	117.36	42.0
Mexicali	14	237	933,827	116.37	116.76	110.88	107.85	106.12	106.94	109.87	110.99	113.21	116.92	41.9
Ensenada	9	110	397,099	21.46	22.73	23.71	23.95	23.28	23.19	22.84	22.52	23.40	24.21	8.7
Playas de Rosarito	2	38	106,898	7.38	7.58	7.95	08.01	7.85	8.27	8.80	8.95	9.21	9.30	3.3
Tecate	4	36	93,564	7.46	7.32	5.92	5.75	5.64	5.78	6.17	6.38	6.54	6.81	2.4
San Felipe	1	11	17,143	2.55	2.51	2.25	2.30	2.44	2.44	2.54	2.53	2.52	2.44	0.9
San Quintín	9	28	73,663	2.43	2.43	2.40	2.46	2.17	1.92	02.05	2.12	02.07	2.24	0.8

Comparando las tasas de incremento de la intensidad lumínica por asentamientos urbanos obtuvimos algunas variaciones espaciales de la contaminación, entre las que destacan:

- Municipio Tijuana: los mayores incrementos se presentan en fraccionamientos o zonas residenciales como el Residencial Margarita (197%), Lomas de San Pedro (92%) y Tijuana (25%), asociados a la expansión de fraccionamientos residenciales que utilizan sistemas de iluminación posiblemente con sodio a baja presión para la iluminación de exteriores. A pesar de ello, la ciudad de Tijuana ha tenido un plan de modernización de su sistema de alumbrado público incorporando tecnología LED.
- Ensenada: destaca el incremento en Ensenada (13%), Rodolfo Sánchez Taboada - Maneadero (17%), San Vicente (12%) y Francisco Zarco (59%). Estos incrementos sugieren otras formas de iluminación distintas a las LED, ya que en el año 2016 el municipio realizó la sustitución de 25.000 luminarias de sodio a alta presión a tecnología LED. Por lo tanto se presume la coexistencia de otras fuentes de iluminación.

A esta intensidad radiante debemos sumar la presencia de extensas zonas metropolitanas, definidas por el Estado como zonas de integración funcional. Uno de los criterios utilizados para su delimitación es la proximidad geográfica entre los centros urbanos, lo cual da a lugar a grandes polígonos urbanos con continuidad espacial, desdibujando los límites entre municipios y vistos desde el satélite como una gran mancha luminosa (Ley de Zonas Metropolitanas de Baja California, 2013).

Estas zonas metropolitanas - Tijuana, Mexicali y Ensenada - presentan en una continuidad espacial transfronteriza, integrando también centros urbanos vecinos que generan intercambio lumínico perceptible, particularmente entre México y EE. UU.

En términos generales, estas fuentes de contaminación lumínica (FCL) en Baja California se agrupan en cinco zonas que incluyen los siguientes asentamientos:

- FCL#1: Tijuana-Tecate-Playas de Rosarito-Primo Tapia
- FCL#2: Mexicali
- FCL#3: El Sauzal-Ensenada-Maneadero-El Zorrillo
- FCL#4: Camalú-Emiliano Zapata-Vicente Guerrero- San Quintín-Lázaro Cárdenas-Ejido Papalote
- FCL#5: San Felipe

Uno de los principales inconvenientes de estas extensas zonas urbanas que integran varios municipios -algunos incluso con continuidad binacional-, es que, además de los requerimientos de suelo para su expansión y la consiguiente pérdida de cobertura natural,

las condiciones actuales podrían generar un impacto en zonas ecológicamente sensibles en el estado (Figura II-13 y Tablas II-7a hasta Tabla II-7g). Particular preocupación merece la posible afectación a las rutas de migración del Pacífico, donde se ubican varias áreas naturales que sirven como sitios de descanso y anidación. La expansión del brillo del cielo nocturno en áreas tan extensas puede representar un obstáculo significativo en la orientación visual de estas especies al eliminar los corredores oscuros necesarios para su navegación.

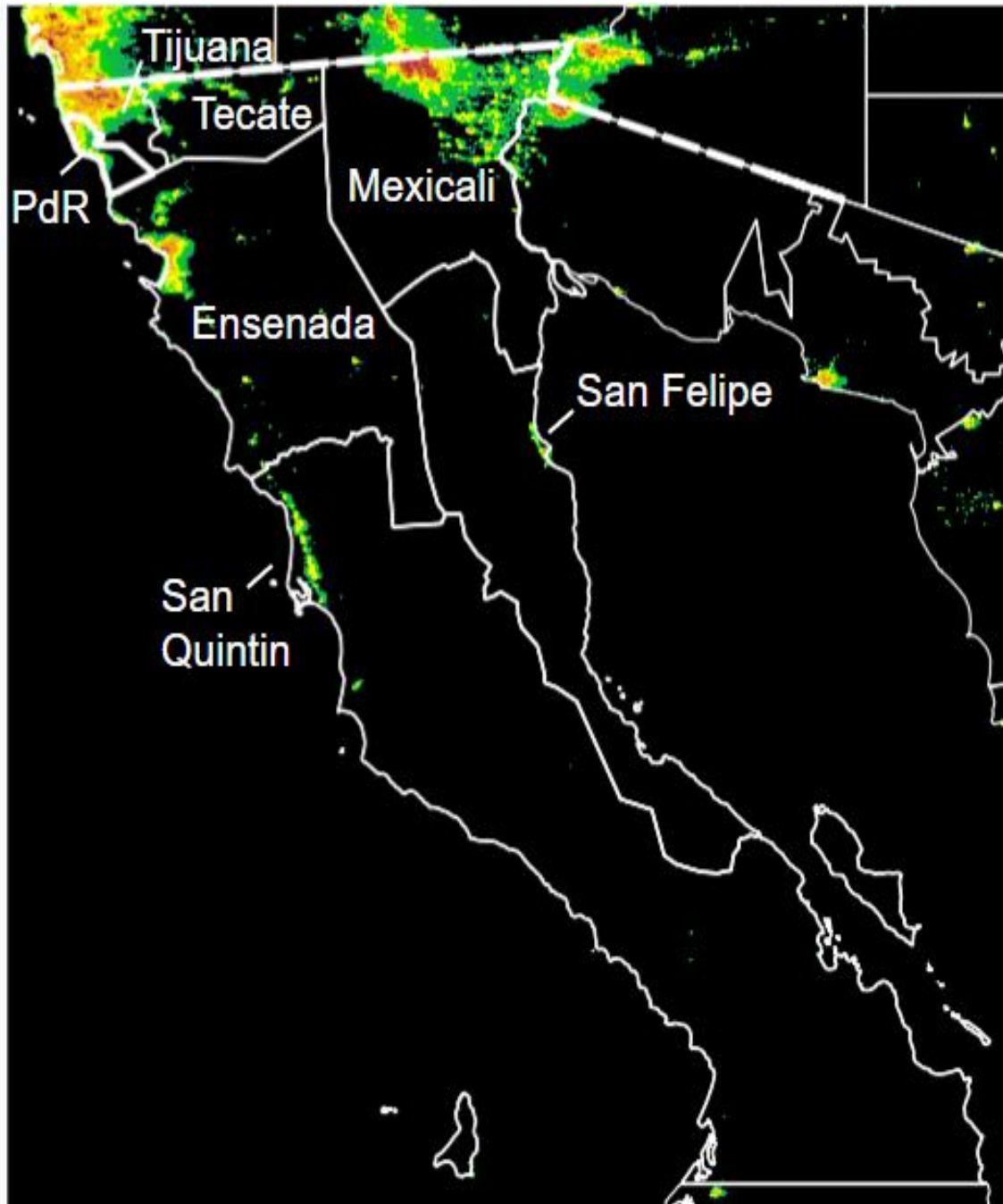
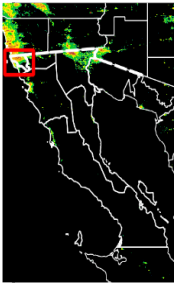


Figura II-13. Los municipios y sus fuentes de contaminación lumínica del estado de Baja California, 2021. Fuente: <Imágenes VIIRS 2021 en <https://www.lightpollutionmap.info/>

En líneas generales, el análisis de la intensidad radiante en Baja California para el periodo 2012-2021 reveló tendencias diferenciadas entre municipios, posiblemente asociadas al crecimiento urbano, el desarrollo de infraestructura y la incorporación de nuevas tecnologías de iluminación -particularmente LED-. Estas transformaciones están vinculadas a políticas de desarrollo urbano que, en muchos casos, no consideran el impacto de la iluminación sobre el paisaje nocturno regional. Si bien el uso de la tecnología LED representa una alternativa de bajo consumo energético, sus consecuencias para el entorno natural requieren medidas correctivas que aseguren un uso adecuado. El diseño de estas tecnologías permite ajustes - como la regulación de emisión espectral - que favorezcan una iluminación verdaderamente ecológica y eficiente.

Tabla II-7a. Ficha resumen de las fuentes de contaminación lumínica del municipio de Tijuana. Fuente: Imágenes VIIRS 2021 en <https://www.lightpollutionmap.info/>

Municipio TIJUANA		Densidad de población: Alta	
Población (2020)	1,922,523 hab.		
Superficie	1,076 km²		
Actividades económicas	Comercio, pesca y turismo		
Características paisajísticas	Zona costera y cerros		
Infraestructura de mayor emisión	Puerto pesquero, alumbrado público, instalaciones deportivas, industrias		
Otros aspectos ambientales	Partículas de polvo		
Radiancia municipal (2021)	61% (13.512 nW cm ⁻² sr ⁻¹)		
% intensidad radiante (2021)	65% (145,454 nW sr ⁻¹)		
Características de la FCL			
<p>El municipio contiene la mayor parte de la FCL#1, la cual se extiende a los municipios Tecate y Playas de Rosarito en México. FCL concentrada en la zona norte del municipio y continua hasta el área metropolitana trasnacional con San Diego (EE.UU.).</p>			
<p>Norma para el control de la CL Desde 2019</p>			

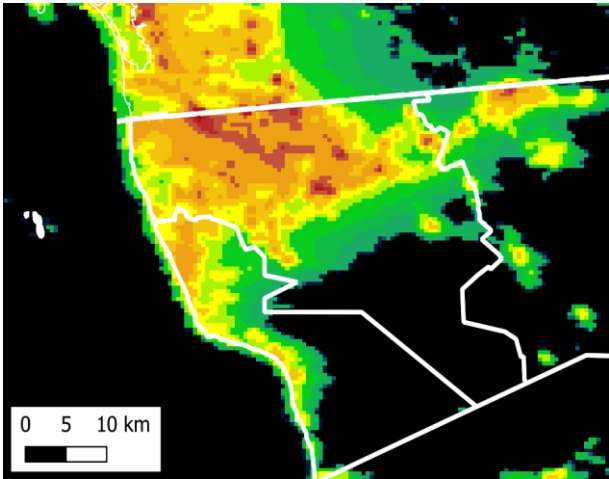
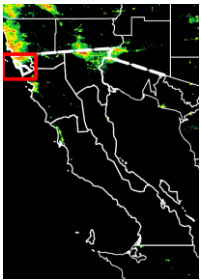


Tabla II-7b. Ficha resumen de las fuentes de contaminación lumínica del municipio de Playas de Rosarito. Fuente: imágenes VIIRS 2021 en <https://www.lightpollutionmap.info/>.

Municipio PLAYAS DE ROSARITO	
Población (2020)	126,890 hab.
Superficie	506 km²
Actividades económicas	Comercio, pesca y turismo
Características paisajísticas	Zona costera
Infraestructura de mayor emisión	Alumbrado público, instalaciones turísticas
Otros aspectos ambientales	Partículas de polvo
Radiancia municipal (2021)	17% (3,512 nW cm ⁻² sr ⁻¹)
% intensidad radiante (2021)	3% (17,731 nW sr ⁻¹)
Características de la FCL	
<p>El municipio contiene la mayor parte de la FCL#1, la cual se extiende a los municipios Tecate y Tijuana. FCL está concentrada en la zona costera, al sur oeste del municipio y continua hasta el área metropolitana de Tijuana.</p>	
Norma para el control de la CL	
No posee	

Densidad de población: **Alta**



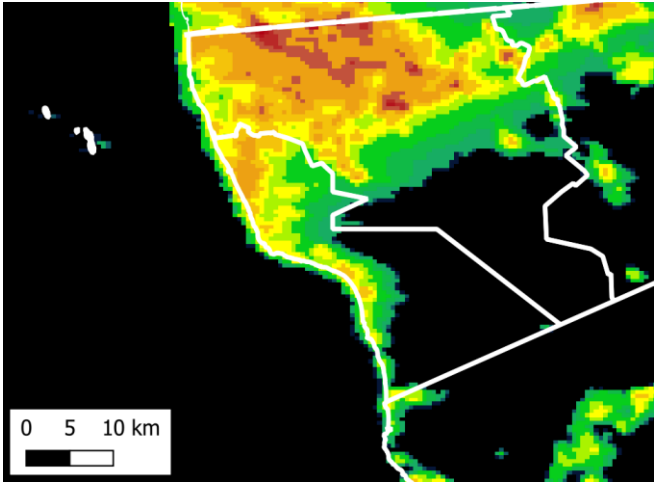


Tabla II-7c. Fichas resumen de las fuentes de contaminación lumínica del municipio de Tecate.
 Fuente: imágenes VIIRS 2021 en <https://www.lightpollutionmap.info/>.

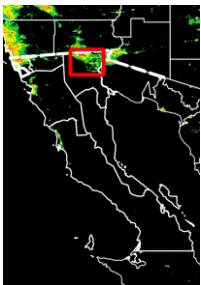
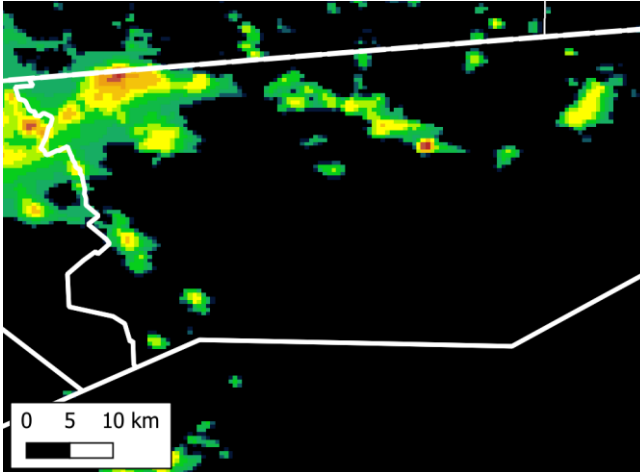
Municipio TECATE		Densidad de población: Alta
Población (2020)	108,440 hab.	
Superficie	2,862 km²	
Actividades económicas	Comercio y turismo	
Características paisajísticas	Cerros	
Infraestructura de mayor emisión	Alumbrado público, instalaciones deportivas, industrias, cárcel	
Otros aspectos ambientales	Partículas de polvo	
Radiancia municipal (2021)	4% (0.8328 nW cm ⁻² sr ⁻¹)	
% intensidad radiante (2021)	4% (24,367.4 nW sr ⁻¹)	
Características de la FCL		
El municipio contiene la mayor parte de la FCL#1, la cual se extiende a los municipios Tijuana y Playas de Rosarito. La FCL está concentrada en la zona norte del municipio y continua hasta el área metropolitana de Tijuana y con Tecate (EE.UU.).		
Norma para el control de la CL		
No posee		

Tabla II-7d. Fichas resumen de las fuentes de contaminación lumínica del municipio de Mexicali.
 Fuente: imágenes VIIRS 2021 en <https://www.lightpollutionmap.info/>.

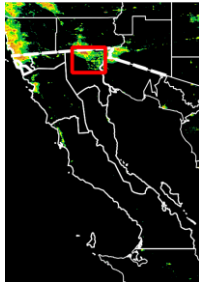
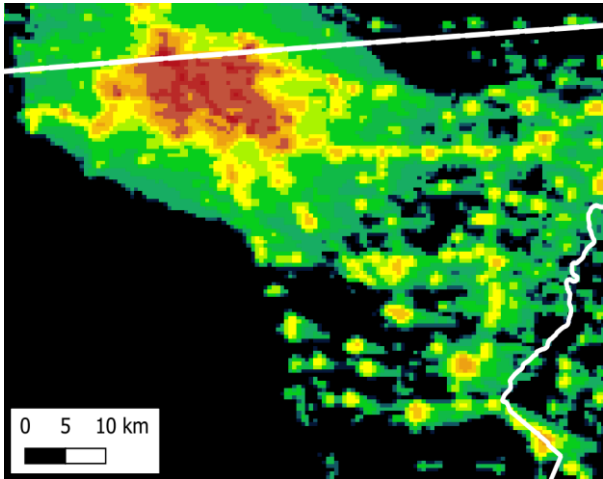
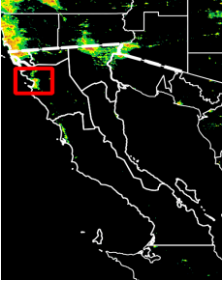
Municipio MEXICALI		Densidad de población: Media	
Población (2020)	1,030,051 hab.		
Superficie	9,985 km²		
Actividades económicas	Agropecuario, comercio y turismo		
Características paisajísticas	Cerros, desiertos, zona costera		
Infraestructura de mayor emisión	Alumbrado público, instalaciones deportivas, industrias		
Otros aspectos ambientales	Partículas de polvo		
Radiancia municipal (2021)	9% (1.8967 nW cm ⁻² sr ⁻¹)		
% intensidad radiante (2021)	35% (189.401 nW sr ⁻¹)		
Características de la FCL			
<p>El municipio contiene la FCL#2 que corresponde a la zona metropolitana de Mexicali. La FCL#2 está dispersa en la zona norte del municipio y continua hasta el área fronteriza con Calexico y El Centro (EE.UU.).</p>			
<p>Norma para el control de la CL Desde 2010</p>			

Tabla II-7e. Ficha resumen de las fuentes de contaminación lumínica del municipio de Ensenada.
 Fuente: imágenes VIIRS 2021 en <https://www.lightpollutionmap.info/>.

Municipio ENSENADA	
Población (2020)	443,225 hab.
Superficie	13,551 km²
Actividades económicas	Comercio, pesca, agrícola, vitivinícola y turismo
Características paisajísticas	Zona costera, montañas, esteros y lagunas
Infraestructura de mayor emisión	Alumbrado público, instalaciones turísticas, eventos, instalaciones deportivas, puertos, centro de procesamiento de gas
Otros aspectos ambientales	Partículas de polvo y vapor de agua
Radiancia municipal (2021)	3% (0.5229 nW cm ⁻² sr ⁻¹)
% intensidad radiante (2021)	13% (70,858 nW sr ⁻¹)
Características de la FCL	
<p>El municipio contiene la totalidad de la FCL#3, la cual se extiende en la zona costera que forma parte de la zona metropolitana Ensenada que incluye los asentamientos El Sauzal, Maneadero, El Zorrillo y el valle de Guadalupe.</p>	
<p>Norma para el control de la CL Desde 2006</p>	

Densidad de población: **Baja**



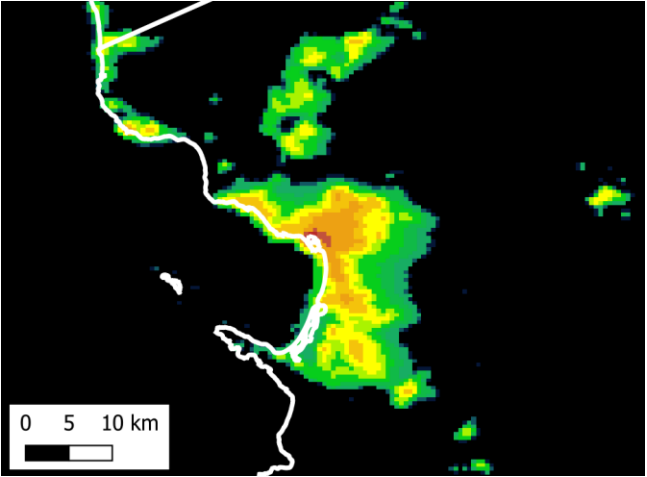
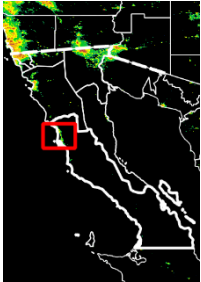


Tabla II-7f. Ficha resumen de las fuentes de contaminación lumínica del municipio de San Quintín.
 Fuente: imágenes VIIRS 2021 en <https://www.lightpollutionmap.info/>.

Municipio SAN QUINTÍN	
Población (2020)	117,568 hab.
Superficie	34,235 km²
Actividades económicas	Agropecuario, comercio y turismo
Características paisajísticas	Cerros, desiertos, costero, montañas, esteros
Infraestructura de mayor emisión	Alumbrado público, instalaciones deportivas
Otros aspectos ambientales	Partículas de polvo y vapor de agua
Radiancia municipal (2021)	1% (0.2392 nW cm ⁻² sr ⁻¹)
% intensidad radiante (2021)	15% (117731.7 nW sr ⁻¹)
Características de la FCL	
<p>Se concentra al NO del municipio donde se ubica la totalidad de la FCL#4, en la zona costera adyacente a la principal vía de comunicación de la península, la carretera transpeninsular. Incluye los asentamientos: Camalú, Emiliano Zapata, Vicente Guerrero, San Quintín, Lázaro Cárdenas y Ejido Papalote.</p>	
Norma para el control de la CL	
No posee	

Densidad de población: **Baja**



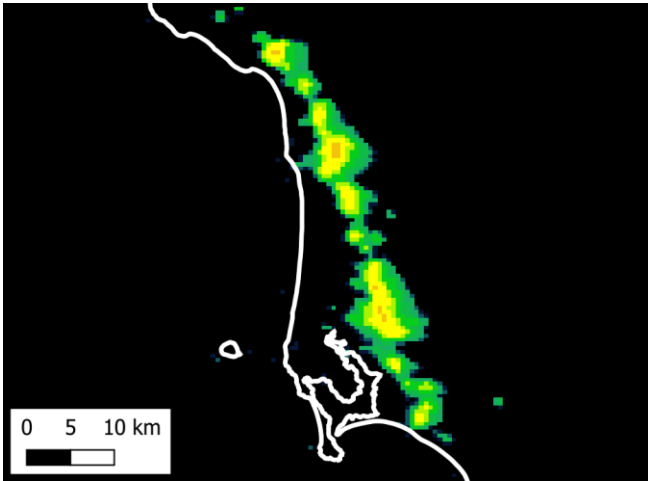
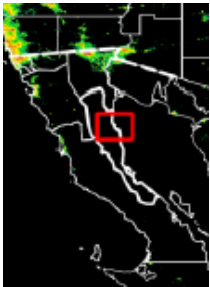
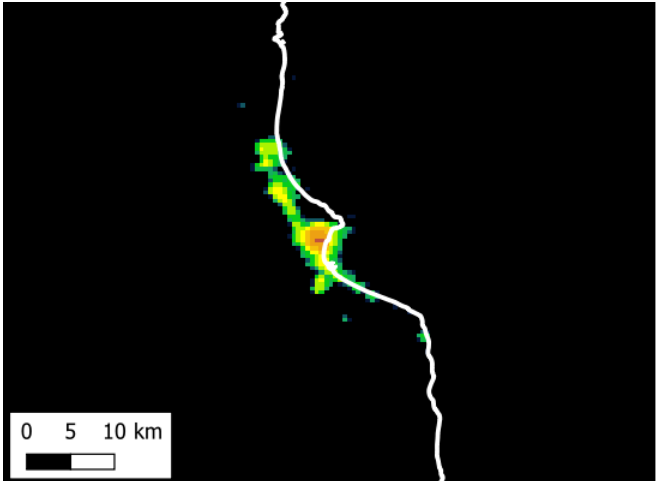
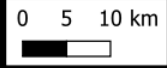


Tabla II-7g. Ficha resumen de las fuentes de contaminación lumínica del municipio de San Felipe.
 Fuente: imágenes VIIRS 2021 en <https://www.lightpollutionmap.info/>.

Municipio SAN FELIPE		Densidad de población: Baja	
Población (2020)	20,323 hab.		
Superficie	11,019 km²		
Actividades económicas	Agropecuario, pesca, comercio y turismo		
Características paisajísticas	Cerros, desiertos, costero		
Infraestructura de mayor emisión	Alumbrado público, puerto e instalaciones deportivas		
Otros aspectos ambientales	Partículas de polvo y vapor de agua		
Radiancia municipal (2021)	1% (0.1785 nW cm ⁻² sr ⁻¹)		
% intensidad radiante (2021)	4% (28,902.4 nW sr ⁻¹)		
Características de la FCL			
<p>El municipio contiene la totalidad de la FCL#5, la cual se extiende en la zona costera, adyacente a la costa del mar de Cortés, corresponde al asentamiento urbano San Felipe</p>			
<p>Norma para el control de la CL</p> <p>No posee</p>			

2.6 Referencias

- Álvarez Báez, C. A. (2017). "Vientos de Santa Ana y tormentas de polvo en el noroeste de México" (*Santa Ana winds and dust storms in northwestern Mexico*). <https://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.32695.39847>
- Aubé, M., Kocifaj, M., Zamorano, J., Solano Lamphar, H. & Sanchez De Miguel, A. (2016). The spectral amplification effect of clouds to the night sky radiance in Madrid. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 181, 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.01.032>
- Bará, S., & Lima, R. (2018). Photons without borders: Quantifying light pollution transfer between territories. *International Journal of Sustainable Lighting*, 20(2), 51-61. <https://doi.org/10.26607/ijsl.v20i2.87>
- Barentine, J. <https://www.johncbarentine.com/skyglow.html>
- Boletín Especial del Estado -BOE- (2001). Ordenación Ambiental del Alumbrado para la Protección del Medio Nocturno, Ley 6/2001 Comunidad Autónoma de Cataluña. Publicada en el Boletín Oficial del Estado el 22 de junio de 2001. <https://www.boe.es/eli/es-ct/l/2001/05/31/6>
- Boletín Especial del Estado -BOE- (2010). Ley de Prevención de la Contaminación lumínica y de fomento del ahorro y eficiencia energéticos derivados de instalaciones de iluminación (Comunidad de Castilla y León. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2010/BOE-A-2010-20074-consolidado.pdf>
- Bustamante-Calabria, M., Sánchez de Miguel, A., Martín-Ruiz, S., Ortiz, J.-L., Vílchez, J. M., Pelegrina, A., García, A., Zamorano, J., Bennie, J., & Gaston, K. J. (2021). Effects of the COVID-19 Lockdown on Urban Light Emissions: Ground and Satellite Comparison. *Remote Sensing*, 13(2), 258. <https://doi.org/10.3390/rs13020258>
- CIE (2022). CIE. e-ILV entry 17-29-177 light pollution. <https://cie.co.at/eilvterm/17-29-177>.
- Cinzano, P., & Falchi, F. (2012). *The propagation of light pollution in the atmosphere*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1209.2031>
- Cinzano, P., Falchi, F., & Elvidge, C. D. (2001). The first World Atlas of the artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 328(3), 689-707. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04882.x>
- Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C. & Baugh, K. 2000. The artificial night sky brightness was mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 318, 641–657. <https://www.researchgate.net/publication/227537884>
- Chow, J., Watson, J., Green, M., Lowenthal, D., Bates, B., Oslund, W., & Torres, G. (2000). Cross-border transport and spatial variability of suspended particles in Mexicali and California's Imperial Valley. *Atmospheric Environment*, 34(11), 1833-1843. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00282-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00282-4)
- Cox, D., Sánchez de Miguel, A., Dzurjak, S., Bennie, J. & Gaston, K. (2020). National Scale Spatial Variation in Artificial Light at Night. *Remote Sensing*. 12. 1591. [10.3390/rs12101591](https://doi.org/10.3390/rs12101591).
- Czarnecka, K., Błażejczyk, K., & Morita, T. (2021). Characteristics of light pollution – A case study of Warsaw (Poland) and Fukuoka (Japan). *Environmental Pollution*, 291, 118113. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118113>
- Davies TW, Duffy JP, Bennie J. & Gaston, K. (2014). The nature, extent, and ecological implications of marine light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment* 12(6):

- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2021). Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente VI BIS. Contaminación lumínica. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 18 de enero de 2021. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgeepa/LGEEPA_ref43_18ene21.pdf
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C., Elvidge, C., Baugh, K., Portnov, B.A., Rybnikova, N., & Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6), e1600377. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>
- Falchi, F. & Bará, S. (2021). Computing light pollution indicators for environmental assessment. *Natural Sciences*, 1(2), e10019. <https://doi.org/10.1002/ntls.10019>
- Fernandez-Ruiz, B., Serra, M., Alarcon, M. R., Lemes-Perera, S., Santana-Pérez, I., & Ruiz-Alzola, J. (2023). Calibrating nighttime satellite imagery with red photometer networks. *Remote Sensing*, 15(17), 4189. <https://doi.org/10.3390/rs15174189>
- Garrett, J. K., Donald, P., & Gaston, K. (2020). Skyglow extends into the world's Key Biodiversity Areas. *Animal Conservation*, 23(2), 153-159. <https://doi.org/10.1111/acv.12480>
- Gaston, K., & Sánchez De Miguel, A. (2022). Environmental Impacts of Artificial Light at Night. *Annual Review of Environment and Resources*, 47(1), 373-398. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112420-014438>
- Hänel, A., Posch, T., Ribas, S. J., Aubé, M., Duriscoe, D., Jechow, A., Kollath, Z., Lolkema, D. E., Moore, C., Schmidt, N., Spoelstra, H., Wuchterl, G., & Kyba, C. C. M. (2018). Measuring night sky brightness: Methods and challenges. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 205, 278-290. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.09.008>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía -INEGI-. (2020a). *Censo de Población y Vivienda 2020. México.*
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía -INEGI-. (2020b). *Marco Geoestadístico 2020. México.*
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía -INEGI-. (2021). *Aspectos Geográficos Baja California 2021. México.*
- Jechow, A. & Hölker, F. (2019). Snowglow—The Amplification of Skyglow by Snow and Clouds Can Exceed Full Moon Illuminance in Suburban Areas. *Journal of Imaging*, 5(8), 69. <https://doi.org/10.3390/jimaging5080069>
- Kocifaj, M. 2011. A numerical experiment on light pollution from distant sources, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 415, Issue 4, August 2011, Pages 3609–3615, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18977.x>
- Kocifaj, M. (2018). Multiple scattering contribution to the diffuse light of a night sky: A model which embraces all orders of scattering. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 206, 260-272. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.11.020>
- Kocifaj, M., & Barentine, J. C. (2021). Air pollution mitigation can reduce the brightness of the night sky in and near cities. *Scientific Reports*, 11(1), 14622. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94241-1>
- Kyba, C., Ruhtz, T., Fischer, J. & Hölker F. (2011). Cloud Coverage Acts as an Amplifier for Ecological Light Pollution in Urban Ecosystems. *PLoS ONE* 6(3): e17307. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017307>

- Kyba, C., Tong, K., Bennie, J. *et al.* Worldwide variations in artificial skyglow. *Sci Rep* 5, 8409 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep08409>
- Kyba, C., Kuester, T., Sánchez De Miguel, A., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., Bennie, J., Elvidge, C. D., Gaston, K. J., & Guanter, L. (2017). Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. *Science Advances*, 3(11), e1701528.
- Levin, N., Kyba, C. C. M., Zhang, Q., Sánchez De Miguel, A., Román, M. O., Li, X., Portnov, B. A., Molthan, A. L., Jechow, A., Miller, S. D., Wang, Z., Shrestha, R. M., & Elvidge, C. D. (2020). Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111443. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111443>
- Linares Arroyo, H., Abascal, A., Degen, T., Aubé, M., Espey, B. R., Gyuk, G., Hölker, F., Jechow, A., Kuffer, M., Sánchez De Miguel, A., Simoneau, A., Walczak, K., & Kyba, C. C. M. (2024). Monitoring, trends and impacts of light pollution. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(6), 417-430. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00555-9>
- Linares, H., Masana, E., Ribas, S. J., Aubé, M., Simoneau, A., & Bará, S. (2020). Night sky brightness simulation over Montsec protected area. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 249, 106990. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.106990>
- Liu, Q., Sha, D., Liu, W., Houser, P., Zhang, L., Hou, R., Lan, H., Flynn, C., Lu, M., Hu, T., & Yang, C. (2020). Spatiotemporal Patterns of COVID-19 Impact on Human Activities and Environment in Mainland China Using Nighttime Light and Air Quality Data. *Remote Sensing*, 12(10), 1576. <https://doi.org/10.3390/rs12101576>
- Mander, S., Alam, F., Lovreglio, R., & Ooi, M. (2023). How to measure light pollution—A systematic review of methods and applications. *Sustainable Cities and Society*, 92, 104465. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104465>
- McMahon, O., Smyth, T., & Davies, T. W. (2022). Broad spectrum artificial light at night increases the conspicuousness of camouflaged prey. *Journal of Applied Ecology*, 59(5), 1324-1333. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14146>
- Morales-Acuña, E., Torres, C. R., Delgadillo-Hinojosa, F., Linero-Cueto, J. R., Santamaría-del-Ángel, E., & Castro, R. (2019). The Baja California Peninsula, a Significant Source of Dust in Northwest Mexico. *Atmosphere*, 10(10), 582. <https://doi.org/10.3390/atmos10100582>
- Pavlačka, D., Vylečka, P., Barvíř, R., Rypl, O., & Burian, J. (2023). Influence of COVID-19 on night-time lights in Czechia. *Journal of Maps*, 19(1). <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2235381>.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2014). Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Baja California.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2013). Ley de Zonas Metropolitanas del Estado de Baja California. https://www.congresobc.gob.mx/Documentos/ProcesoParlamentario/Leyes/TOMO_VII/12042019_Leyzonametropolitana.pdf
- Román, M. O., Wang, Z., Sun, Q., Kalb, V., Miller, S. D., Molthan, A., Schultz, L., Bell, J., Stokes, E. C., Pandey, B., Seto, K. C., Hall, D., Oda, T., Wolfe, R. E., Lin, G., Golpayegani, N., Devadiga, S., Davidson, C., Sarkar, S., ... Masuoka, E. J. (2018). NASA's Black Marble nighttime lights product suite. *Remote Sensing of Environment*, 210, 113-143. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.017>
- Sánchez Miguel, A.S.; Kyba, C.C.M.; Zamorano, J.; Gallego, J.; Gaston, K.J. The nature of the diffuse light near cities is detected in nighttime satellite imagery. *Sci. Rep.* 2020, 10, 7829.

- Sánchez De Miguel, A., Bennie, J., Rosenfeld, E., Dzurjak, S., & Gaston, K. J. (2021). First Estimation of Global Trends in Nocturnal Power Emissions Reveals Acceleration of Light Pollution. *Remote Sensing*, 13(16), 3311. <https://doi.org/10.3390/rs13163311>
- Ścieżor, T. & Czaplicka A. (2020). The impact of atmospheric aerosol particles on the brightness of the night sky. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 254: 107168.
- Trasviña-Castro, A. & Ortiz-Figueroa, M & Herrera, H & Cosío, M.A & González-Rodríguez, Eduardo. (2003). 'Santa Ana' winds and upwelling filaments off Northern Baja California. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 37. 113-129. 10.1016/S0377-0265(03)00018-6.
- Zamora-Machado, M., Lambert-Arista, A. A., García-Cueto, O. R., Jaramillo-Salgado, O. A., Leyva-Sánchez, E., Reynaga-López, R. C., Herrera-García, J. R., Lizárraga-Osuna, N., & Anguiano-Cota, R. C. (2023). Clasificación de los vientos de Santa Ana para la evaluación de su potencial eólico en La Rumorosa, Baja California, México. *Ciencias Marinas*. <https://doi.org/10.7773/cm.y2023.3358>

Capítulo III: Estimación de los niveles de contribución municipal a la contaminación lumínica del cenit de los Parques Nacionales Sierra San Pedro Mártir y Constitución de 1857

3.1. Generalidades del sistema de áreas protegidas

El sistema de áreas protegidas internacional está compuesto por diversas categorías establecidas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), con el objetivo de proteger y conservar el medio ambiente. El Parque Nacional (PN) es una de las categorías más relevantes, ya que están destinados a la preservación de los ecosistemas representativos que no han sido alterados por la explotación u ocupación humana y que contienen riqueza de flora y fauna con alto valor científico, educativo, estético y recreativo, donde las autoridades gubernamentales toman medidas para la protección de sus valores paisajísticos, ecológicos, geomorfológicos y donde los visitantes son permitidos en condiciones especiales (UICN, 1969). Es por tanto “un espacio geográfico claramente definido, reconocido, dedicado y gestionado, mediante medios legales u otros tipos de medios eficaces para conseguir la conservación a largo plazo de la naturaleza y de sus servicios ecosistémicos y sus valores culturales asociados” (Dudley, 2008: 10).

La preocupación por el cumplimiento de los objetivos de protección establecidos para las áreas naturales ha sido una prioridad desde la fundación del primer Parque Nacional en Yellowstone (1871). A lo largo del tiempo, diversos tratados y acuerdos internacionales, como el Convenio sobre Diversidad Biológica, han impulsado la evaluación de la eficacia de la gestión en estas áreas. En 1994, la UICN amplía estos conceptos incorporando los principios de sustentabilidad con la preservación de la integridad de los ecosistemas para las presentes y futuras generaciones. Además, destacó la necesidad de garantizar las oportunidades espirituales, científicas, educativas y recreativas para los visitantes, asegurando que sean compatibles ambiental y culturalmente (Bosworth & Curry, 2020; Dudley, 2008).

3.1.1 Marco legal y conceptual de las áreas protegidas en México

En México, la LGEEPA establece que los PN son zonas con “representaciones biogeográficas, a nivel nacional, de uno o más ecosistemas que se signifiquen por su belleza escénica, su valor científico, educativo, de recreo, su valor histórico, por la existencia de flora y fauna, por su actitud para el desarrollo del turismo, o bien por otras razones análogas de interés general” (DOF, 2022). El país cuenta con un sistema de áreas protegidas conformados por seis categorías de manejo, siendo el PN el más restrictivo. Los

PN representan el 37,2% de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) del país, con 67 zonas que abarcan más de 162,200 kilómetros cuadrados, en las que se incluyen una diversidad paisajística como desiertos, montañas, bosques, playas, manglares, bahías, lagunas, cenotes y zonas arqueológicas (SEMARNAT, 2021).

La importancia del PN radica en su objetivo primario, que consiste en “proteger la biodiversidad natural junto con la estructura ecológica y los procesos ambientales sobre los que se apoya, y promover la educación y el uso recreativo” (Dudley, 2008:18). Más allá de la conservación ambiental, estas áreas proporcionan servicios ecosistémicos clave para la sociedad, como suministro de agua, regulación del clima, oportunidades recreativas y beneficios culturales, estéticos, entre otros, no materiales.

No obstante, las áreas naturales protegidas no están exentas de presiones externas porque no siempre han estado aisladas, sino que están rodeadas por actividades humanas que pueden comprometer sus objetivos de conservación. Una de estas actividades es el crecimiento de los centros poblados urbanos y las actividades que originan. De acuerdo con estimaciones de la Organización de Naciones Unidas (ONU) para el año 2050 se espera un crecimiento de la población urbana de 2.5 billón, en adición de cerca de 170,000 personas por día (United Nations, 2018). En México, esta realidad se ha manifestado en la zona norte del país, impulsado por las dinámicas migratorias y el establecimiento de actividades económicas para abastecer el mercado de USA.

Este crecimiento poblacional representa un desafío para la gestión de las áreas protegidas, ya que implica un aumento en la contaminación lumínica, cuya extensión e intensidad, a nivel global, ha mostrado un incremento medio anual del 10% (Falchi *et al.*, 2016; Kyba *et al.*, 2017; Cox *et al.*, 2020; Sanchez de Miguel *et al.*, 2021; Kyba *et al.*, 2023). Para mitigar su impacto en las áreas protegidas se han desarrollado diversos programas de monitoreo y certificación, como los implementados por DarkSky International (DSI) y la Starlight Foundation que promueven acciones como monitoreo constante del brillo del cielo nocturno una vez que se han establecido como cielos protegidos.

En Baja California

Las Sierras de San Pedro Mártir (SSPM) y de Juárez en Baja California, albergan ecosistemas de bosques de pino-encino, bosques de coníferas y chaparrales, los cuales poseen una alta diversidad biológica y están restringidas en áreas geográficas muy reducidas de la Península de Baja California. Debido a sus características y los servicios ecológicos, ambas han sido declaradas áreas protegidas bajo la categoría de Parque Nacional (Parque Nacional Sierra San Pedro Mártir y Parque Nacional Constitución de

1857). Adicionalmente, la calidad excepcional de sus cielos oscuros han sido determinantes para la posterior mudanza e instalación del Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir (OAN SPM) en el año 1971 y que en la actualidad alberga los telescopios ópticos más importantes del país.

Estos tres elementos -los dos parques nacionales y el observatorio- conforman un sistema clave para la conservación e investigación científica en México. Su importancia radica tanto en la preservación de la biodiversidad y en el paisaje natural, la investigación astronómica internacional, como en su potencial para el desarrollo del astroturismo, una actividad emergente basada en la observación de cielos oscuros.

A continuación, se presentarán dos estudios de investigación que analizan la contribución municipal a la contaminación lumínica del cenit en estas áreas protegidas, con el objetivo de evaluar su impacto.

3.2. Estimación de la contribución a la contaminación lumínica al cenit del Parque Nacional Sierra San Pedro Mártir y Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir, Baja California, México.

3.2.1 Introducción

3.2.1.1 PN SSPM y OAN SPM

El Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir (PN SSPM) y el Observatorio Astronómico Nacional (OAN) en Baja California han mantenido una relación histórica, científica y de conservación fundamental para el desarrollo de la astronomía en México. La creación del OAN en 1867 y sus sucesivos traslados hasta el emplazamiento actual en la Sierra de San Pedro Mártir (1971) han estado marcados por la necesidad de preservar condiciones óptimas para la observación astronómica libre de contaminación lumínica. A lo largo de las décadas, se han implementado diversas medidas de protección ambiental y regulaciones legales para garantizar la preservación de las condiciones del cielo nocturno en la región. La relevancia del OAN en el estudio de la contaminación lumínica ha sido clave para la implementación de normativas municipales, estatales y federales destinadas a la reducción del impacto de la luz artificial en la investigación astronómica.

Asimismo, en el año 1923 se reconoce la importancia de los ecosistemas de la Sierra donde se les declara reserva forestal con carácter inalienable e imprescriptible. La declaratoria de una porción de la sierra de San Pedro Mártir como Parque Nacional en 1947, la creación de la Reserva Forestal en 1951 y la ratificación de la declaración de interés público en 1975, la región ha sido reconocida por su importancia tanto para la protección de los ecosistemas, la conservación y restauración de la riqueza forestal de las montañas, como la investigación astronómica (DOF 1923, 1947, 1951, 1975).

El Observatorio Astronómico Nacional (OAN) de San Pedro Mártir (SPM), en Baja California, es un importante hito para la astronomía mexicana ya que allí se desarrolla investigaciones de alto nivel científico y a su vez se contribuye a la protección de uno de los más importantes bosques de pinos en Baja California. Su ubicación actual responde a inquietudes surgidas a raíz de los incrementos de la contaminación lumínica en las adyacencias de sus ubicaciones anteriores en el castillo de Chapultepec y Puebla que motivaron su reubicación en 1910, después de una búsqueda de sitios especiales para su asentamiento (Moreno -Corral *et al.*, 1994; Figura III-1).

El OAN es considerado uno de los observatorios más importantes en el hemisferio norte debido a la calidad de sus cielos oscuros y que le han hecho candidato para la instalación de otros telescopios internacionales. Por ello, se han realizado estudios de carácter puntual para la medición constante de los valores de contaminación lumínica en el OAN SPM, utilizando monitores fijos de calidad del cielo.

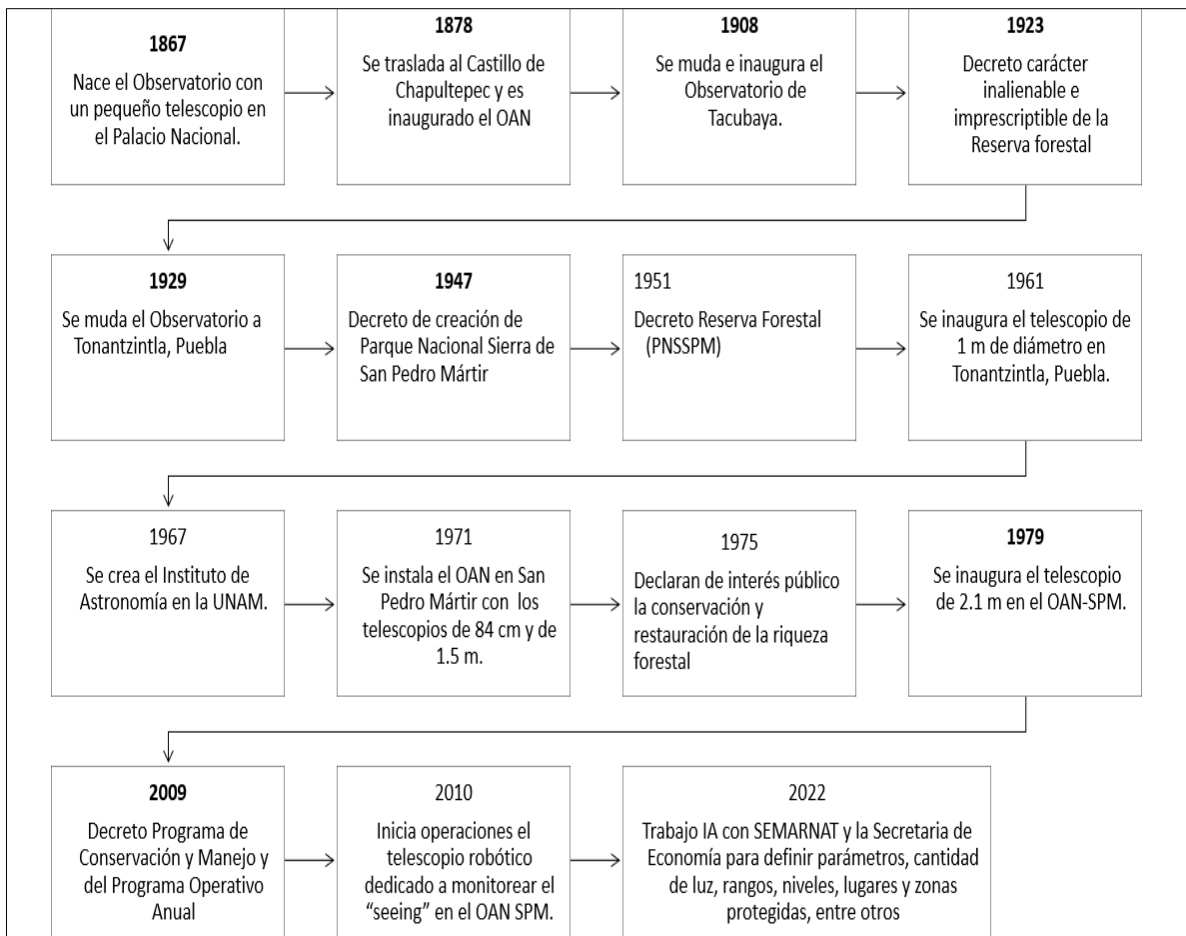


Figura III-1: Historia OAN y el PN SSPM. Fuente: Elaboración propia con información modificada de Puro (2019), Moreno-Corral *et al.* (1994).

La contaminación lumínica ha sido una preocupación creciente para la comunidad científica desde que la Unión Astronómica Internacional (IAU) identificó los efectos negativos de la iluminación artificial en la observación nocturna y su amenaza a la continuidad de los telescopios ópticos situados en las adyacencias de zonas pobladas (Riegel, 1973; Smith, 1979). Es emblemático el caso del observatorio del Monte Wilson el cual fue perdiendo su observación científica por la expansión de la contaminación lumínica de la ciudad de los Ángeles en la década de 1930 (McDonnell *et al.*, 2009).

En el caso del OAN SPM, a pesar de su ubicación remota y su ubicación en el PN SSPM, los efectos de la iluminación en sus adyacencias ya son visibles. La contaminación lumínica se observa en forma de resplandor de las áreas urbanas ubicadas a 60 y 200 km de distancia y hacia el horizonte -en dirección noreste-, dónde se incluyen los centros poblados de Ensenada, San Vicente, L. Cárdenas, Mexicali, San Felipe, Tijuana de varios municipios y hasta del condado americano de San Diego (Gagik *et al.*, 2016; Ávila, 2016; Figura III-2).



Figura III-2. Vista de la contaminación lumínica desde el OAN. Imagen: Fernando Ávila, 10 de abril 2013

Estudios recientes han demostrado que la contaminación lumínica no solo impacta la investigación astronómica, sino también el ritmo circadiano de los seres vivos, alterando la función de ecosistemas enteros (Longore & Rich, 2004). Investigaciones, como las que llevaron al Premio Nobel de Medicina en 2017, han resaltado la importancia de la regulación en los procesos biológicos. La exposición excesiva a la luz artificial puede afectar la producción de melatonina, lo que influye en el comportamiento de la fauna y el equilibrio de los ecosistemas. Adicionalmente, otras afectaciones incluyen la alteración de los

patrones migratorio de aves, desorientación de las tortugas, aumento de la presencia de insectos, requerimientos de altos niveles de energía y por ende en el calentamiento global, pérdida del valor cultural del cielo, entre otros (González *et al.*, 2014)

Este reconocimiento internacional de la relevancia de la protección contra los efectos nocivos de la contaminación lumínica al medio ambiente natural, al humano, y no sólo a las áreas de observaciones astronómicas es cada vez más necesario (Walker & Benvenuti, 2021). Ello implica necesariamente una perspectiva interdisciplinaria del valor natural del cielo nocturno para la implementación de las acciones para el control de su contaminación y los requerimientos de iluminación ecológica y eficiente. Para abordar estas limitaciones, es fundamental actualizar los documentos normativos, incorporando consideraciones ecológicas, paisajísticas y culturales. Asimismo, existen iniciativas para preservar el cielo nocturno y su gestión, las cuales implican en algunos casos la modificación de algunas normativas como las que ya se han realizado en el norte de Chile, España y Australia (Commonwealth of Australia, 2020; Diario Oficial de la República de Chile, 2023).

Estos cambios son posibles, en parte, por los estudios de monitoreo y control en la gestión de los cielos oscuros, los cuales facilitan que se genere información actualizada sobre la situación actual del recurso y su entorno. Adicionalmente, iniciativas de organizaciones internacionales como StarLight o IUCN proponen criterios y categorías para áreas de preservación de cielos oscuros y las perspectivas futuras de estas áreas a proteger.

El OAN ha sido un actor clave en el impulso de la creación y aplicación de regulaciones para prevenir, reducir y evitar la contaminación lumínica en el estado de Baja California y México (Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2006; Ávila 2019). Varios municipios del estado cuentan con normativas municipales, siendo el municipio de Ensenada el pionero en esta normativa en México en el año 2006, Mexicali (2011) y Tijuana (2019) (Periódico Oficial del Estado de Baja California: 2006, 2011, 2019b; Ávila 2019; Puro, 2019). Estas normativas han establecido criterios técnicos para la instalación y uso de la iluminación exterior con el fin de minimizar la dispersión de la luz hacia el cielo nocturno.

Se destaca en la actualización del Reglamento para la prevención de la Contaminación Lumínica en el Municipio de Ensenada (2016) aspectos como la delimitación de una zona de máxima protección (ZMP) en un radio de 100 kilómetros tomando como centro la ubicación del OAN y se establecen algunas características de alumbrado como temperatura de color menor a 3000 K, diseño full cut off, entre otras (Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2016).

En el caso del Reglamento para la prevención de la contaminación lumínica en el Municipio

de Mexicali, en el texto no se define la ZMP, sin embargo se reconoce la importancia del OAN (Periódico Oficial del Estado de Baja California 2011; Puro, 2019). Con la creación de los nuevos municipios San Quintín y San Felipe (producto de la división del municipio Ensenada y del municipio de Mexicali) y la presencia de localidades ubicadas dentro del área de protección se requieren normativas en los nuevos municipios (Figura III-3).

En esta área pese a su aislamiento, existen centros poblados de importancia ubicados en las adyacencias del OAN, los cuales en los últimos años han incrementado en población, en extensión, en actividad económica y por ende en iluminación. A ello debemos sumar los cambios en las tecnologías de iluminación utilizadas en el alumbrado público del municipio Ensenada y realizados en el año 2006, cambios que incluyen reemplazo de sodio a baja presión por LED, que incluyen nuevos espectros con emisiones en el azul y que no cumplen con la normativa establecida para el municipio de Ensenada (Puro, 2019; Tabla III-1).

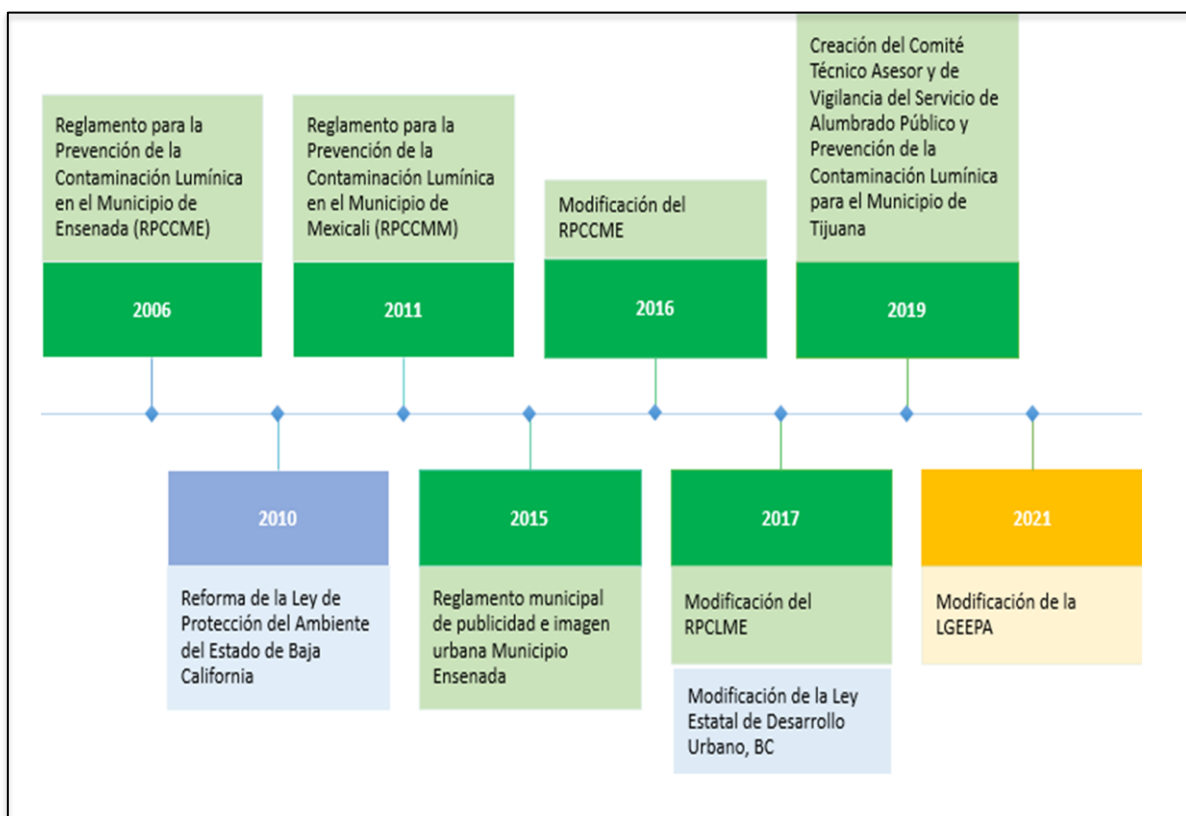


Figura III-3 Reglamentaciones aprobadas para la prevención de la contaminación lumínica en Baja California. Los distintos colores en la imagen indican el nivel de jurisdicción: amarillo para regulaciones federales, azul para estatales y verde para municipales. Fuente: Elaboración propia.

Tabla III-1. Comparación de luminarias censadas y sustituidas en el municipio de Ensenada. Fuente: Modificado de Puro (2019)

Luminarias Censadas	Luminarias recomendadas en la actualización del Reglamento para la prevención de la Contaminación Lumínica en el Municipio de Ensenada, Baja California (2016)	Luminarias por instalar/sustituir
Diseño "semi cut off" Temperaturas de color en el rango de los amarillos Tecnología Vapor de sodio a alta presión Diferentes potencias	Uso de diseño "full cut off" en el alumbrado público Uso de temperaturas de color (RE) menor a 3,000 K en la zona de máxima protección Diferentes potencias Instalación sin inclinación en el alumbrado público y no emitir luz por encima de noventa grados	Diseño "full cut off" Temperaturas de color en el rango de los blancos (5,500 K) Tecnología LED Diferentes potencias Instalación sin inclinación

Por lo tanto, son relevantes los estudios y cuantificación de la contaminación lumínica en el estado de Baja California y sus entornos urbanos donde el resplandor urbano ya se hace evidente y la pérdida de los cielos oscuros nocturnos pudiera acrecentarse por la expansión urbana y sus requerimientos de iluminación, aumentado por el incumplimiento de una legislación existente (Puro, 2019; Tabla III-2).

Tabla III-2. Evaluación del cumplimiento del reglamento en la política de Modernización del Alumbrado Público del municipio de Ensenada del año 2016. Fuente: Puro (2019)

Elemento para evaluar en el flujo luminoso	Indicador	Cumplimiento del reglamento	Observaciones
Dirección	Diseño full cut off	Si	
	Instalación sin inclinación	¿Si?	Se presume que fueron instaladas correctamente
Rango espectral	Temperatura de color	No	La temperatura de color está por encima del valor recomendado para la Zona de Máxima Protección
Intensidad	Este elemento no se evaluó porque requería mayor detalle y datos		

En Baja California los estudios en contaminación lumínica se han restringido a los monitoreos fijos en el OAN para cuantificar el brillo del cielo nocturno y preservar las condiciones de la observación astronómica y considerando aspectos como: estabilidad atmosférica, calidad de imagen, opacidad atmosférica en el visible, infrarrojo y milimétrico,

brillo del cielo nocturno y nubosidad. Adicionalmente, se han realizado caracterizaciones astro climáticas para postular algunos sectores del OAN como candidatos para instalar telescopios (Moreno-Corral *et al*, 1994; Tapia *et al.*, 2007; Gagik *et al*, 2016; Plauchu-Frayn, 2017). Estos autores concluyeron que los cielos nocturnos de San Pedro Mártir son de una alta calidad tanto como el de los mejores observatorios del mundo, y confirmaron que SPM es uno de los pocos sitios en el planeta con condiciones adecuadas para la investigación astronómica (Tabla III-3).

Tabla III-3. Comparación del brillo del cielo de observatorios astronómicos (expresada en mag/arcsec²)

Mauna Kea (Hawai) (a)	Paranal (Chile) (a)	La Silla (Chile) (a)	Tololo (Chile) (b)	San Pedro Mártir (México) (b)	Roque de los Muchachos (Canarias, España) (a)	El Teide (Tenerife, España) (a)
22.05	21.7	21.7	21.8	21.84	21.9	21.4

Fuente: a) Hanel *et al.* (2018). b) <https://www.iac.es/es/observatorios-de-canarias/calidad-del-cielo/parametros-de-calidad-del-cielo/brillo-de-cielo-nocturno>

Otro resultado de los estudios es la confirmación de que desde el OAN es visible la iluminación artificial de las poblaciones adyacentes, en el horizonte en dirección noreste, a lo largo de la frontera México-USA y la costa del golfo de California (Gagik *et al.*, 2016).

Por su parte, Diaz (2016) realizó un análisis con el objetivo de proponer factores que permitieran cuantificar las emisiones de las pantallas electrónicas y del alumbrado público en la zona urbana de Ensenada. En una línea complementaria, Puro (2019) examinó la gestión y las normativas de prevención de la contaminación lumínica aplicadas en las adyacencias del OAN, así como la distribución espacial de los asentamientos urbanos dentro del área de protección lumínica del observatorio. Además evaluó el proyecto de modernización del alumbrado público del municipio de Ensenada, implementado en 2016, mediante el cual se sustituyó la tecnología existente por luminarias LED. Entre sus hallazgos concluyeron que esta modernización no cumplió con los parámetros de emisión espectral establecidos en el Reglamento para la prevención de la Contaminación Lumínica en el Municipio de Ensenada.

Más recientemente, Puro Coa *et al.* (2025) estimaron la contribución de la contaminación lumínica transfronteriza que afecta al Parque Nacional Constitución de 1857 en Baja California. Utilizando imágenes VIIRS disponibles para el periodo 2012-2021 disponibles en la plataforma [https://www.lightpollutionmap.info/.](https://www.lightpollutionmap.info/), identificaron a Mexicali, Ensenada y condados del sur de California como los emisores de luz artificial incidente en el parque.

Por otro lado, a escala global, Falchi *et al.* (2016) presentaron imágenes del mapeo de grandes territorios del brillo artificial del cielo nocturno en el Atlas Mundial de la

Contaminación Lumínica. El estudio reveló que más del 80% de la población mundial vive bajo cielo contaminado por luz artificial, y que el impacto es particularmente severo en regiones densamente urbanizadas del hemisferio norte.

Esta investigación, desde una perspectiva interdisciplinaria con un enfoque ambiental-geográfico, tiene como objetivo estimar los municipios con mayor impacto y contribución a la contaminación lumínica al cenit del PN y OAN San Pedro Mártir considerando un radio de 200 km y utilizando herramientas para la gestión y toma de decisiones. Este estudio aporta información de utilidad para caracterizar la problemática de la contaminación lumínica en el estado de Baja California y genera información de interés para la gestión de esta problemática en los municipios actuales y los nuevos municipios, ubicados en la zona de máxima protección del OAN SPM. Asimismo, aportará información de utilidad para la Oficina de la Ley del Cielo del OAN ya que incluye las emisiones de luz que se ubican a más de 100 km de distancia y que se dispersan en la atmósfera creando un efecto de adición lumínica que abrillanta el cielo.

3.2.1.1 Características del PN SSMP y el OAN SPM

PN SSMP

El PN SSMP se ubica en la parte central del estado de Baja California, aproximadamente a 200 km al sur de la ciudad de Mexicali y a 170 km al sureste de la ciudad de Ensenada en jurisdicción de los municipios de Ensenada, San Quintín y San Felipe.

El polígono del parque se ubica entre las coordenadas 40°44' y 31°10' de latitud norte y 115°13' y 115°44', cuenta con una superficie de 72,910.68 hectáreas (Figura III-4). Este parque forma parte de la sierra que corre a lo largo de la península de Baja California, donde se ubican sus picos más altos y las áreas boscosas que constituyen las cabeceras de las cuencas de los principales arroyos de la entidad. El clima es predominantemente templado semifrío subhúmedo, con lluvias invernales, veranos cálidos y frescos; en el suroeste del parque se observan condiciones de clima templado subhúmedo y mediterráneo templado, con escasas lluvias invernales y semifrío el primero y verano cálido el segundo. La vegetación se caracteriza por un alto grado de endemismo, donde predominan los pastos y herbáceas, el chaparral, el bosque ripario, bosque de encinos y bosques de pinos (CONANP, 2006).



Figura III-4. Mapa de ubicación y polígono del PN SSPM y el OAN-SPM. Fuente: CONANP (2006).

OAN SPM

El OAN SPM se ubica en la parte más alta de la sierra del mismo nombre, dentro de los linderos del PN SSPM (subzona de preservación III) en jurisdicción del municipio de Ensenada en el estado de Baja California, México. Emplazado a una altitud de 2,830 m sobre el nivel del mar con las coordenadas del Telescopio de 2 m: 31°02'39" N y 115°27'49" W (Cruz Gonzales *et al.*, 2004; CONANP, 2006; Figura III-4).

Su ubicación proporciona condiciones excepcionales para la observación astronómica, poca turbulencia atmosférica (seeing), numerosas noches claras, escasa nubosidad y baja humedad. Estos factores, unidos a la opacidad atmosférica en el visible, infrarrojo y milimétrico y sin brillo del cielo nocturno, aseguran la calidad del cielo nocturno, que alcanza valores de 22 magnitudes, posicionándolo entre los cuatro mejores lugares del mundo para la observación astronómica, siendo a la isla de Hawái, las islas Canarias y el norte de Chile (Moreno-Corral *et al.*, 1994; Cruz-González *et al.*, 2003; Tapia *et al.*, 2007; Plauchu-Frayn *et al.*, 2016; Gagik *et al.*, 2016).

Además, el OAN SPM es el observatorio astronómico más importante en el espectro visible en México, albergando un conjunto de telescopios con diferentes diámetros ópticos donde se realizan investigaciones de alto nivel científico y tecnológico. Debido a la importancia de preservar sus cielos oscuros, se han impulsado la creación de normativas en los municipios adyacentes como mencionado en la sección previa (POEBC, 2006 y 2011). Adicionalmente, la Organización DarkSky International (DSI) impulsa la certificación como Santuario Internacional de Cielo Oscuro al Parque Nacional San Pedro Mártir, para ello se deben tomar varias acciones, como un monitoreo constante del brillo del cielo nocturno, un programa educativo y un plan de manejo de la iluminación (Ávila Fernando, 2023, comunicación personal).

3.2.2 Delimitación del área de estudio

Para los fines de esta investigación se define como área de estudio, aquella comprendida en un radio de los 200 km alrededor del OAN SPM, ubicado en el PN SSPM, a partir de las coordenadas del Telescopio de 2 metros: 31°02'39" N y 115°27'49" W. Esta delimitación incluye dos áreas de importancia:

- 1) El área total del PN SSPM,
- 2) La Zona de Máxima Protección, definida como un radio de 100 km desde el OAN, conforme al Reglamento para la Prevención de la Contaminación Lumínica en el municipio de Ensenada (2016).

El área abarca la totalidad de los municipios Ensenada, Mexicali (Baja California) y San

Luis Río Colorado (Sonora); parcialmente los municipios y condados Playas de Rosarito, Tecate, Tijuana, San Felipe y San Quintín del estado de Baja California, Puerto Peñasco de Sonora; los condados de San Diego, Imperial y Yuma de USA (Figura III-5).

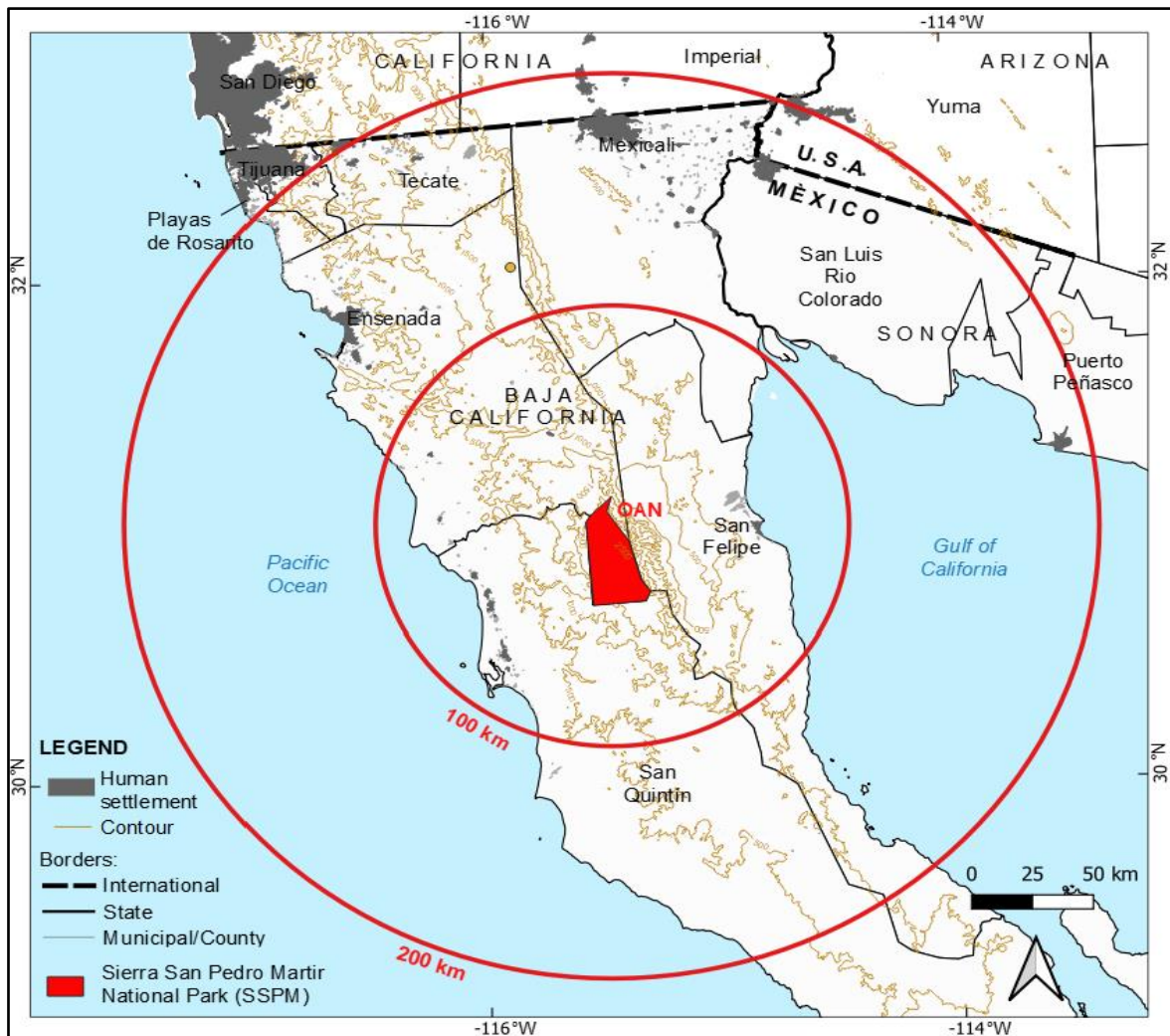


Figura III-5. Municipios y condados dentro del área de estudio binacional.

3.2.3 Metodología

Para evaluar la contribución municipal a la contaminación lumínica del PN SSPM y OAN SPM se utilizaron diferentes fuentes y herramientas:

- **Datos poblacionales y delimitaciones municipales**

Las delimitaciones político-administrativas y datos demográficos para los años 2010 y 2020 fueron obtenidas del INEGI (2020) para México y de la Oficina del Censo de EE. UU (US Census Bureau, 2021) en formatos CSV, WKT y SHP.

- **Datos satelitales y SIG**

Se emplearon las imágenes nocturnas del satélite VIIRS para el periodo 2012-2021 provistas a través de la herramienta en línea del mapa de contaminación lumínica de

Jurij Stare (<https://www.lightpollutionmap.info>). Un Sistema de Información Geográfica (SIG) basado en QGIS se utilizó para recopilar, analizar y procesar datos espaciales, así como para delimitar el área de estudio, calcular las distancias y cambios poblacionales.

- **Simulador del brillo cenital**

Para cuantificar la contribución municipal a la contaminación lumínica del PNSSPM se consideraron las propuestas teóricas de Bará & Lima (2018), que se basan en un modelo isotrópico de emisión de luz. Se utilizó la herramienta experimental de simulación de brillo cenital nocturno del light pollution map siguiendo el procedimiento descrito de Puro *et al.* (2025) para estimar el promedio de radiancia y la contribución lumínica de cada municipio/condado al brillo de cielo del PN SSPM. El polígono de extensión territorial municipal se convierte a formato WKT, para alimentar la simulación de brillo cenital, la cual calcula los valores de radiancia expresados en $10^{-9} \text{ W/ cm}^2 \cdot \text{sr}$, para estimar la contribución municipal de la contaminación lumínica al cenit de cada municipio o condado del área de estudio. Se repite el proceso para cada uno de los 12 municipios/condados (8 en México y 3 en EE. UU.).

3.2.4 Resultados y discusión

El radio de influencia de 200 kilómetros alrededor del OAN y PN SSPM incluye una porción del área de México y los Estados Unidos de América (USA) en cuatro estados (Arizona, California, Sonora y Baja California) y once municipios, con un total de 67,183 km². Los municipios con mayor superficie en el área de estudio son San Quintín, Baja California (23.4%), Ensenada, Baja California (19.7%), Mexicali, Baja California (15%), San Felipe, Baja California (15%) y San Luis Río Colorado, Sonora (13%). También se incluyen importantes centros de población como Mexicali, Ensenada, San Luis Río Colorado y Puerto Peñasco, además de una porción de los municipios Tijuana, Imperial, San Diego, Yuma y Puerto Peñasco.

Los municipios más cercanos al PN SSPM y OAN son San Felipe, San Quintín, Ensenada, San Luis Río Colorado, Mexicali. Los municipios más distantes incluyen Yuma, Puerto Peñasco, Playas de Rosarito, Imperial, Tijuana y San Diego (Figura III-6).

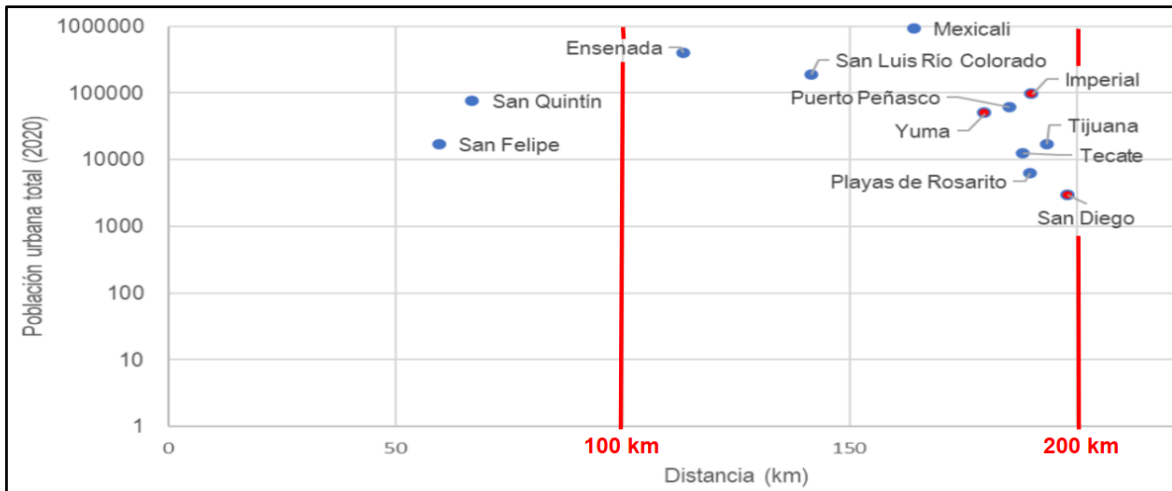


Figura III-6. Distribución espacial de la población municipal de México (azul) y condados de USA (rojo) en relación con la distancia promedio al PN SSPM - OAN SPM.

Para el año 2020, la población total en el área de estudio es de 2,065,693 habitantes, de los cuales 1,866,707 habitan en asentamientos urbanos. De esta población urbana, el 92.08%, se encuentra en México y el 7.92% en EE. UU. Los municipios con los mayores porcentajes de población urbana se concentran principalmente en Mexicali (50.5%), Ensenada (21.27%) y San Luis Colorado (10.03%), como se detalla en la Tabla III-4.

Tabla III-4 Distancia al parque nacional y población total urbana para cada municipio/condado, o porción de municipio/condado (*). Fuente: INEGI 2010, 2020 (**Sin datos para el año 2010 por ser asentamientos de reciente creación, solo información del censo 2020)

Municipios / condados	Promedio de Distancias al OAN (km)	Población urbana total 2010	Población urbana total 2020	Población urbana total 2020 (%)	Variación 2020 - 2010	% Variación 2020 - 2010	Tasa de crecimiento 2020-2010
Playas de Rosarito	189.75	4,921	6,238	0.3	1,317	0.4	26.76
San Quintín*	66.85	60,744	76,417	4.1	15,673	5.0	25.80
Yuma	179.80	39,792	49,454	2.6	9,662	3.1	24.28
Mexicali	164.28	769,211	942,772	50.5	173,561	55.8	22.56
Ensenada	113.28	335,355	397,099	21.3	61,744	19.9	18.41
Tecate*	188.25	10,580	12,505	0.7	1,925	0.6	18.19
San Luis Río Colorado*	141.45	167,616	187,273	10.0	19,657	6.3	11.73
San Diego*	197.98	2,684	2,955	0.2	271	0.1	10.10
Puerto Peñasco*	185.30	56,756	62,301	3.3	5,545	1.8	9.77
Imperial *	190.17	91,384	95,456	5.1	4,072	1.3	4.46
San Felipe*	59.57	16,702	17,143	0.9	441	0.1	2.64
Tijuana* (**)	193.55	(**)	17,094	0.9	17,094	5.5	
Total general	140.92	1,555,745	1,866,707		310,962		19.99

3.2.3.1 Contribución porcentual de la radiancia cenital municipal al PN SSPM - OAN SPM 2012-2021

El mayor porcentaje de contribución al resplandor cenital proviene de San Quintín (23%), seguido de San Felipe (23%), Ensenada (19%) Mexicali (19.4%), San Luis Río Colorado (6%). El resto de los municipios aporta un 5% (Tabla III-5 y Figura III-7).

Tabla III-5. Porcentaje del promedio contribución de la radiancia cenital municipal al PN SSPM - OAN SPM durante el periodo 2012-2021

Municipio / County	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2012-2021
San Quintín	20.92	23.70	24.76	24.36	22.68	22.34	21.88	21.96	21.24	22.74	22.7
San Felipe	24.08	23.01	20.97	21.36	22.84	22.77	22.84	23.24	23.38	21.68	22.6
Mexicali	20.99	19.81	19.10	18.34	18.81	19.15	18.97	19.54	20.09	19.06	19.4
Ensenada	18.13	18.47	19.54	19.95	19.23	18.80	19.64	18.27	17.92	19.79	19.0
San Luis Río Colorado	5.16	4.52	4.97	5.34	5.42	5.69	5.69	5.8	6.17	5.82	5.5
Yuma	3.26	3.10	3.11	3.13	3.23	3.20	3.11	2.97	03.01	3.00	3.1
Imperial	2.92	2.78	2.9	2.84	2.92	2.96	2.86	2.93	3.14	2.93	2.9
Puerto Peñasco	0.73	0.68	0.59	0.60	0.69	0.7	0.74	0.78	0.82	0.79	0.7
Tecate	0.76	0.72	0.71	0.68	0.65	0.66	0.68	0.63	0.61	0.62	0.7
Playas de Rosarito	0.14	0.15	0.16	0.17	0.19	0.20	0.21	0.21	0.21	0.20	0.2
Tijuana	0.09	0.12	0.13	0.10	0.11	0.12	0.12	0.11	0.1	0.1	0.1
Total	97.21	97.1	96.98	96.9	96.8	96.62	96.77	96.46	96.71	96.75	96.83

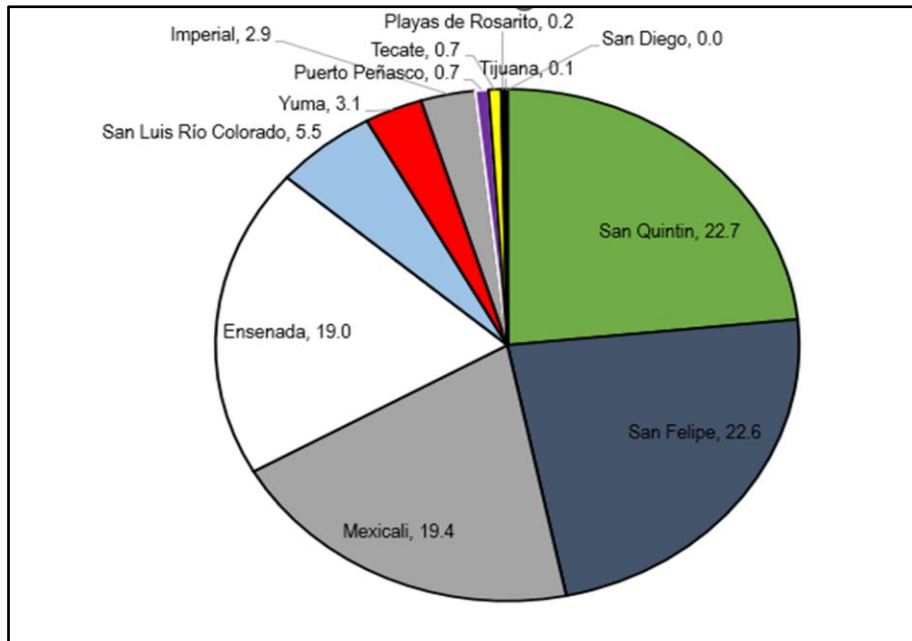


Figura III-7 Porcentaje del promedio contribución de la radiancia cenital municipal al PN SSPM - OAN SPM durante el periodo 2012-2021. Fuente: Elaboración propia con imágenes VIIRS.

Los valores significativos de San Quintín y San Felipe están estrechamente relacionados con la relativa cercanía de sus centros poblados (entre 60 y 70 km), lo cual incide en una mayor emisión de luz artificial y su impacto sobre el PN y el OAN. Adicionalmente, los municipios de Ensenada y Mexicali con una distancia promedio entre 120 y 180 km, presentan una alta emisión debido a su densidad poblacional y por presentar los mayores centros poblados urbanos. El resto de los municipios aporta el 16.3% de la emisión.

Los cuatro municipios aportan la mayor contribución al parque nacional y el observatorio, destacándose que el 45.3% corresponde a los nuevos municipios San Quintín y San Felipe, que no poseen reglamentación para el control de la contaminación lumínica. Por otro lado, el 38% corresponde a Ensenada y Mexicali que son pioneros en Baja California y México en el establecimiento de normativas para la protección contra la contaminación lumínica.

San Quintín y Mexicali también presentan una alta concentración de partículas en el aire, posiblemente debido a factores como la actividad agrícola intensiva, el clima seco y fuertes vientos fuertes predominantes del Pacífico, que favorecen la alta erosión eólica que levanta las partículas del suelo y las dispersa (Chow *et al.*, 2000; Watson & Chow, 2001; Morales-Acuña, 2019, Sciezor & Czplick, 2020). Adicionalmente, la infraestructura de caminos no está pavimentada contribuye a la generación de polvo. Estas condiciones pueden contribuir a un aumento de la reflexión y dispersión de la luz en diferentes direcciones y de ende a un aumento de la contaminación lumínica, tal como lo han reportado en estudios de Kyba *et al*, 2017 y los modelos propuestos por Kocijaj & Barentine (2022) acerca de la reducción

del impacto la contaminación lumínica al aplicar medidas de control de la contaminación atmosférica.

Estas condiciones ambientales son factores críticos que deben abordarse, especialmente porque el municipio San Quintín, de reciente creación, posee asentamientos con un rápido crecimiento poblacional y de intensas actividades agrícolas. Además, el sistema de iluminación pública predominante utiliza luminarias de sodio de alta presión, lo que contribuye al resplandor lumínico (Puro, 2019). La reglamentación lumínica todavía inexistente en este municipio creado recientemente en el año 2021 debería considerar dichos componentes ambientales propios de la región a la hora de definir los umbrales y características de las posibles fuentes de contaminación.

A nivel de países, definitivamente en el área de 200 km alrededor del OAN y SPM el mayor porcentaje de contribución a la contaminación lumínica al cenit es México con 94% y los EE. UU. en un 6%. Por lo tanto, las medidas de mitigación y reducción de la contaminación lumínica deben enfocarse en la aplicación, actualización y refuerzo de las regulaciones existentes, así como la creación de nuevas normativas en los municipios donde aún no se han implementado medidas de control de la contaminación lumínica, en cumplimiento de la LGEEPA y las leyes ambientales estatales que promueven una iluminación ecológica y eficiente. Al mismo tiempo el financiamiento de las dependencias municipales de la gestión y aplicación de la vigilancia y control.

3.2.3.2 Resplandor municipal para el período 2012-2021

Según los datos recopilados para el periodo 2012-2021, la radiancia municipal promedio más alta se registró en el municipio de Yuma ($2.0941 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$), seguido de Imperial ($1.9671 \cdot 10^{-9} \text{ W} / (\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$). Este hallazgo es particularmente relevante por los valores de incremento que muestra en el periodo de estudio, a pesar de que los centros urbanos fronterizos como Yuma, Somerton y San Luis no han experimentado un crecimiento poblacional significativo, pero sí han incrementado en su iluminación.

Por el contrario, los menores valores de radiancia se registraron en San Quintín ($0.0382 \cdot 10^{-9} \text{ W} / (\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$), San Felipe ($0.0388 \cdot 10^{-9} \text{ W} / (\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$) y San Diego ($0.1417 \cdot 10^{-9} \text{ W} / (\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$). (Figura III-8 y Tabla III-6).

Tabla III-6. Promedio de radiancia cenital municipal al PN SSPM - OAN SPM para el periodo 2012-2021.

Municipio / County	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	% radiancia cenital (2021)	Promedio 2012-2021	% de cambio 2021-2021
Yuma	2.00	2.14	2.12	2.13	2.11	2.09	2.15	2.02	1.98	2.21	24.54	2.09	10.43
Imperial	1.86	1.90	1.97	1.93	1.93	1.93	1.98	1.99	2.04	2.15	23.81	1.97	15.42
Mexicali	1.60	1.60	1.54	1.48	1.47	1.48	1.55	1.57	1.57	1.67	18.57	1.55	4.41
Playas de Rosarito	0.51	0.57	0.62	0.66	0.68	0.70	0.78	0.79	0.75	0.79	8.82	0.69	56.34
Puerto Peñasco	0.48	0.47	0.41	0.42	0.46	0.46	0.52	0.53	0.54	0.58	6.47	0.49	21.58
San Luis Río Colorado	0.40	0.36	0.40	0.43	0.42	0.43	0.45	0.46	0.47	0.49	5.48	0.43	25.06
Tijuana	0.39	0.37	0.41	0.33	0.34	0.37	0.40	0.36	0.30	0.35	3.90	0.36	-9.45
Tecate	0.30	0.30	0.29	0.28	0.26	0.27	0.29	0.27	0.26	0.29	3.25	0.28	-2.53
Ensenada	0.22	0.26	0.22	0.27	0.27	0.27	0.28	0.27	0.27	0.27	3.04	0.26	21.90
San Diego	0.13	0.18	0.19	0.16	0.15	0.14	0.14	0.11	0.10	0.11	1.24	0.14	-16.98
San Felipe	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.43	0.04	-3.52
San Quintín	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.45	0.04	17.68
Total	7.97	8.22	8.26	8.17	8.17	8.22	8.61	8.44	8.35	9.01	100	8.34	

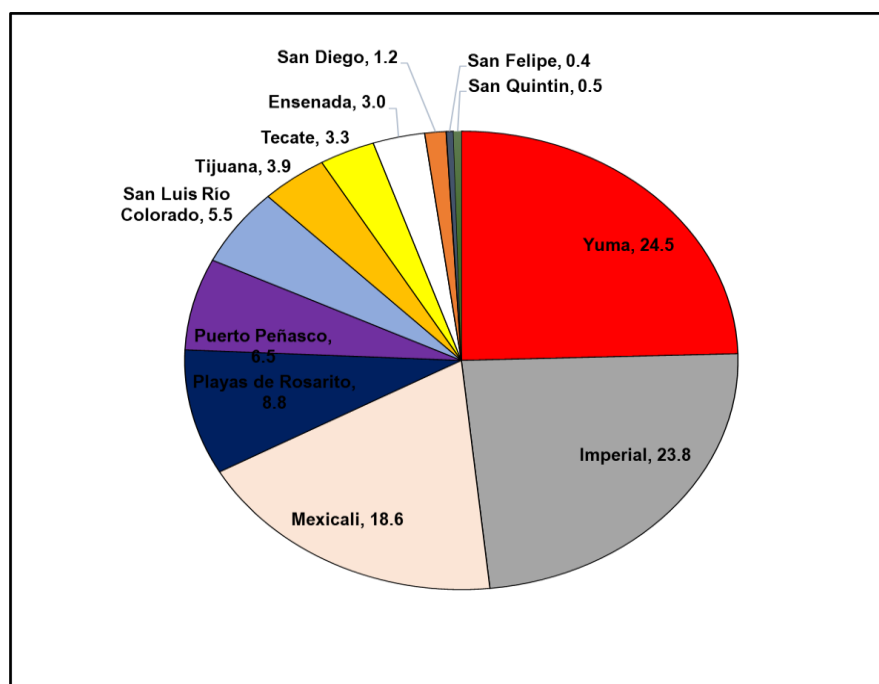


Figura III-8. Porcentaje del promedio de radiancia cenital municipal al PN SSPM - OAN SPM para 2021 en el área de estudio de radio 200 km.

Para 2021, los municipios con el porcentaje promedio más alto fueron Yuma (24.5%), Imperial (23.8%) y Mexicali (18.6%). En particular, el condado de Yuma presenta la mayor concentración de fuentes emisoras de luz y ha mostrado un incremento del 3.06% en la radiancia cenital entre 2018 y 2021. Al considerar el aporte total de emisión cenital (intensidad radiante en Figura III-9), donde se incluye el área de cada municipio, Mexicali destaca con la mayor emisión total (48%), superando a Tijuana (0.4%), el área del

municipio de Mexicali es diez veces mayor que la de Tijuana en este estudio. Imperial destaca en un segundo lugar con un 12%, a pesar de su menor extensión territorial (con un área 5 veces más pequeña es 3 veces menos brillante).

Para 2021, la intensidad radiante total emitida en el cenit por los municipios aledaños al PN es 22.4 % proveniente de Estados Unidos y 77.6% de México.

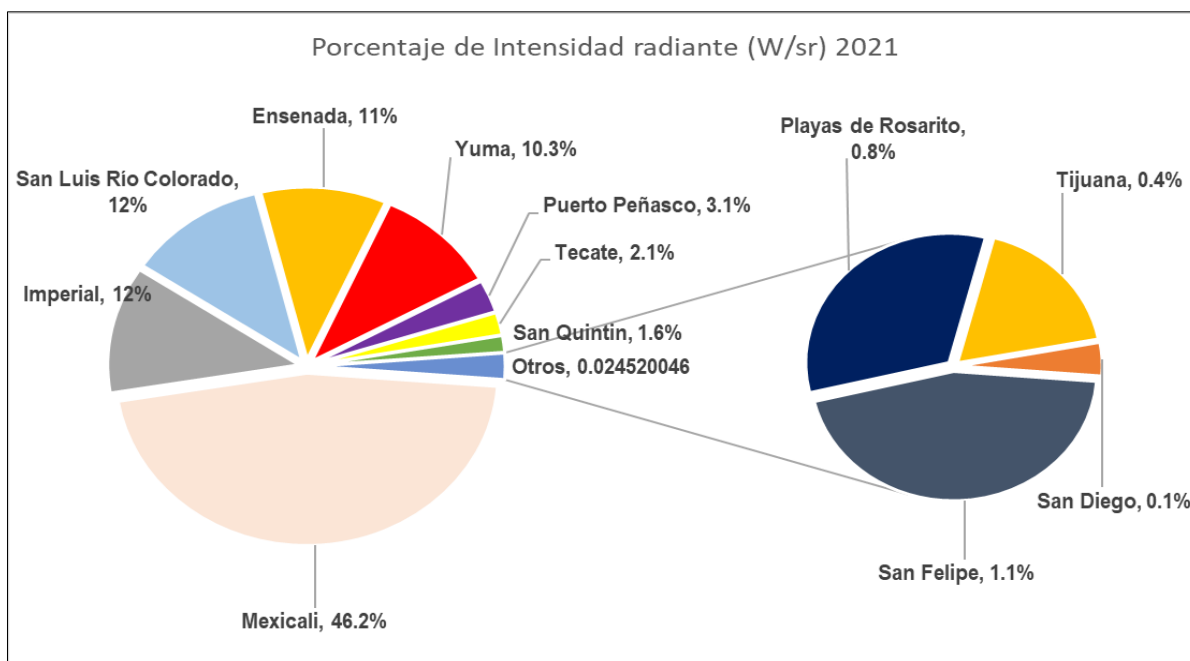


Figura III-9. Porcentaje del promedio de intensidad radiante para 2021. Fuente: cálculos propios con imágenes VIIRS 2021.

3.2.3.3 El papel de la contribución municipal a la contaminación lumínica cenital

Se definieron dos áreas de influencia prioritaria para el PN - OAN, el primero en un radio de 100 km, establecido en el Reglamento para la Prevención de la Contaminación Lumínica en el municipio de Ensenada y el segundo en un radio de 150 km, siguiendo los criterios propuestos por Puro (2019), el Diario Oficial de la República de Chile (2023), Puro *et al.* (2025) para el OAN en el Parque Nacional San Pedro Mártir, los observatorios astronómicos del norte de Chile y el Parque Nacional Constitución, respectivamente. Además, responde a un modelo isotrópico de la fuente de emisión, lo que implica que la cantidad de energía emitida por una fuente es igual en cualquier dirección.

El incremento poblacional en los municipios en el periodo de 10 años se observa principalmente en Mexicali (56%), Ensenada (20%), San Luis Río Colorado (6%) y Tijuana (6%). Esta tendencia de crecimiento es más significativa en la frontera con EE. UU. y en las proximidades del Parque Nacional - OAN, a una distancia de 160 km. El crecimiento

urbano en estas áreas incrementa la demanda de iluminación, lo que conlleva un aumento en la emisión de fotones de luz y, en consecuencia, una mayor contaminación lumínica.

Nuestros resultados muestran una coincidencia significativa entre las distancias más próximas al OAN y su mayor contribución al cenit, como se esperaba. Sin embargo, municipios con grandes centros urbanos como Mexicali e Imperial, también contribuyen significativamente, a pesar de la distancia, debido a que poseen mayor número de fuentes y mayor intensidad.

Los principales contribuyentes a la contaminación lumínica cenital del PN OAN SPM se ubican a una distancia promedio de 160 km. Más allá de esta distancia, la contribución disminuye considerablemente, con la excepción del municipio Imperial como el segundo municipio más brillante. Entre 100 y 160 km, cuatro municipios representan aproximadamente el 83.54% del aporte: Mexicali (19.39%), Ensenada (19%), San Quintín (23%) y San Felipe (23%).

Esta tendencia respalda las propuestas de Puro (2019), el Diario Oficial de la República de Chile (2023) y Puro *et al.* (2025) de ampliar el área de influencia de la luz en el OAN San Pedro Mártir (México) y Chile de 100 km a 150 km, considerando la distribución espacial de las poblaciones y resaltando la importancia del parque nacional y el entorno terrestre y marítimo.

Es urgente incentivar e integrar nuevas medidas para el control de la contaminación lumínica, incluyendo los efectos en otras áreas protegidas, capacitación y financiamiento de los municipios y la elaboración de una Norma Oficial Mexicana con la participación de la Semarnat, la Oficina de Ley del Cielo, universidades y especialistas.

3.2.5 Referencias

- Ávila Castro, F. (2016). La Ley del Cielo, in: *The Right to Dark Skies/ El Derecho a Los Cielos Oscuros*. UNESCO, Ciudad de México, México, pp. 123–134. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000246131#:~:text=The%20Right%20to%20dark%20skies>.
- Bará, S. & Lima, R. (2018). Photons without borders: quantifying light pollution transfer between territories. *International Journal of Sustainable Lighting* 20, 51–61. <https://doi.org/10.26607/ijsl.v20i2.87>
- Bosworth, G., & Curry, N. (2020). *Encyclopedia of Human Geography* (Second).
- Chow, J. C., Watson, J. G., Green, M., Lowenthal, D., Bates, B., Oslund, W., & Torres, G. (2000). Cross-border transport and spatial variability of suspended particles in Mexicali and California's Imperial Valley. *Atmospheric Environment*, 34(11), 1833-1843. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00282-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00282-4)
- Commonwealth of Australia (2020). National Light Pollution Guidelines of Wildlife, Including Marine Turtles, Seabirds and Migratory Shorebirds. <https://www.agriculture.gov.au/sites/default/files/documents/national-light-pollution-guidelines-wildlife.pdf>.
- CONANP (2006). Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional San Pedro Mártir. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/119_libro_pm.pdf
- Cox, D.T.C., Sánchez De Miguel, A., Dzurjak, S.A., Bennie, J. & Gaston, K.J. (2020). National Scale Spatial Variation in Artificial Light at Night. *Remote Sensing* 12, 1591. <https://doi.org/10.3390/rs12101591>
- Cruz-González, I., Ávila, R., and Tapia, M., Eds. (2003). *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias)* 19, 99–102. <https://www.redalyc.org/pdf/571/57101918.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (1923). Acuerdo declarando reservas forestales con el carácter de inalienables e imprescriptibles, distintas porciones arboladas de la República. Secretaría de Agricultura y Fomento. https://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?cod_diario=194398&pagina=766&seccion=0
- Diario Oficial de la Federación (1947). Declaración del Parque Nacional San Pedro Mártir. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 26 de abril de 1947. <http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/DecretosDOF/Sanpedromartirsierra.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (1951). Declaración de la reserva Nacional Forestal a la Sierra San Pedro Mártir. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 27 de julio de 1951. http://dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?codnota=4485326&fecha=27/07/1951&cod_diario=190401
- Diario Oficial de la Federación (1975). Declaran de interés público la conservación y restauración de la riqueza forestal de las montañas de San Pedro Mártir, en Ensenada, Baja California para asegurar el desarrollo normal de la investigación astronómica, geográfica y demás disciplinas afines. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 17 de febrero de 1975. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4751272&fecha=17/02/1975
- Diario Oficial de la Federación (2009). Programa de manejo del Parque Nacional San Pedro Mártir. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 15 de diciembre de 2009. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_pcym/119_DOE.pdf
- Diario Oficial de la Generalitat de Catalunya (2001). Ordenación Ambiental del Alumbrado para la Protección del Medio Nocturno, Ley 6/2001 Comunidad Autónoma de Cataluña.

- Diario Oficial de la República de Chile (2023). Decreto que establece Norma de emisión de luminosidad artificial generada por alumbrados exteriores, elaborada a partir de la revisión del Decreto Supremo N°43, de 2012, del Ministerio del Medio Ambiente. <https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2023/10/18/43679/01/2391423.pdf>
- Díaz, J. (2016). *Análisis de los factores normativos y metrológicos que intervienen en la contaminación lumínica de una zona urbana* (Tesis de Ingeniero industrial). Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Ensenada, México. <http://catalogocimarron.uabc.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=217769>
- Duriscoe, D. (2001). Preserving pristine night skies in national parks and the wilderness ethic. *George Wright Forum* 18, 30–36. <http://www.georgewright.org/184albers.pdf>
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C., Elvidge, C., Baugh, K., Potnov, B., Rybnikova, N., Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances* 2. <https://doi.org/doi:10.1126/sciadv.1600377>
- Gagik, T., Hernandez, M., Ochoa, J. (2016). Astroclimatic characterization of Vallecitos: A candidate site for CTA at San Pedro Mártir. *Astronomical Society of the Pacific*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1601.02383>
- González, S. A., Yáñez-Navea, K. y Muñoz, M. (2014). Effect of coastal urbanization on Sandy beach coleoptera *Phaleria maculate* (Kulzer, 1959) in northern Chile. *Marine Pollution Bulletin*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2020). Censos y Conteos de Población y Vivienda. México.
- Kocifaj, M., Kómar, L. (2016). A role of aerosol particles in forming urban skyglow and skyglow from distant cities. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 458, 438–448. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw293>
- Kyba, C.C.M., Altıntaş, Y.Ö., Walker, C.E., Newhouse, M. (2023). Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022. *Science* 379, 265–268. <https://doi.org/10.1126/science.abq7781>
- Kyba, C.C.M., Kuester, T., Sánchez De Miguel, A., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., Bennie, J., Elvidge, C.D., Gaston, K.J., Guanter, L., 2017. Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. *Sci. Adv.* 3, e1701528. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701528>
- Longcore, T., & Rich, C. (2004). Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(4), 191-198. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0191:ELP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2)
- McDonnell, M. (Editor), Hahs, A. y Breuste, J. (2009). *Ecology of Cities and Towns: A Comparative Approach*. Cambridge University Press, p. 243-263. http://assets.cambridge.org/97805216/78339/frontmatter/9780521678339_frontmatter.pdf
- Morales-Acuña, E., Torres, C. R., Delgadillo-Hinojosa, F., Linero-Cueto, J. R., Santamaría-del-Ángel, E., & Castro, R. (2019). The Baja California Peninsula, a Significant Source of Dust in Northwest Mexico. *Atmosphere*, 10(10), 582. <https://doi.org/10.3390/atmos10100582>
- Moreno-Corral, M., Costero, R., Schuste, W. (1994). High Atop the Baja, The National Observatory of Mexico. *Astronomical Society of the Pacific*. *Astronomical Society of the Pacific*.
- NASA, n.d. NASA's VIIRS/NPP Lunar BRDF-Adjusted Nighttime Lights Yearly composites ("All Angle_Composite_Snow_Free"). 2012 -2021.

- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2006). Reglamento para la prevención de la contaminación lumínica en el Municipio de Ensenada, Baja California. Publicado en el Periódico Oficial del Estado de Baja California el 29 de septiembre de 2006. <https://www.ensenada.gob.mx/wp-content/uploads/2021/11/Reglamento-para-la-prevencion-de-la-contaminacion-luminica-en-el-Municipio-de-Ensenada-Baja-California.pdf>.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2010). Decreto 339. Modificación de los Artículos 1, 2, 8, 38, 120 y 121. Cambio de la denominación de la Sección V, por el de Prevención y Control de la Contaminación Lumínica, del Capítulo II del Título Cuarto, de la Ley de Protección al Ambiente para el Estado de Baja California. Publicado en el Periódico Oficial del Estado de Baja California el 04 de enero de 2010.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2011). Reglamento para la prevención de la contaminación lumínica en el Municipio de Mexicali, Baja California. Publicado en el Periódico Oficial del Estado de Baja California el 08 de julio de 2011.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2016). Modificación del Reglamento para la Prevención de la Contaminación Lumínica en el Municipio de Ensenada, Baja California. Publicado en el Periódico Oficial del Estado de Baja California el 09 de mayo de 2016.
- Plauchu-Frayn, I., Richer, M.G., Colorado, E., Herrera, J., Córdova, A., Ceseña, U., Ávila, F. (2017). Night Sky Brightness at San Pedro Martir Observatory. *PASP* 129, 035003. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/129/973/035003>
- Puro, E. (2019). Análisis de la gestión de la contaminación lumínica en las adyacencias del Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir, Municipio de Ensenada, B. C., México (Tesis (Especialidad). Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B. C., México. <https://catalogocimarron.uabc.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=236823>
- Puro Coa, E., Seingier, G., Sánchez de Miguel, A., Solano-Lamphar, H. A., & Ávila, F. (2025). Estimating municipal contributions to cross-border light pollution using VIIRS satellite data: A case study of a national park in Northwest Mexico. *Environmental Challenges*, 18, 101073. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101073>
- QGIS.org. (2023). QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>.
- Riegel, K. (1973). Light Pollution: Outdoor lighting is a growing threat to astronomy. *Science* 179, 1285–1291. <https://doi.org/10.1126/science.179.4080.128>
- Sánchez de Miguel, A., Bennie, J., Rosenfeld, E., Dzurjak, S., Gaston, K.J. (2021). First Estimation of Global Trends in Nocturnal Power Emissions Reveals Acceleration of Light Pollution. *Remote Sensing* 13, 3311. <https://doi.org/10.3390/rs13163311>
- Smith, M. (1979). Report and recommendations of IAU commission 50, Reports on Astronomy. *IAU Transactions XVIIIA* 218–222.
- Stare, J., n.d. Lightpollutionmap (v2.8.11). <https://www.lightpollutionmap.info>.
- Tapia, M., Hiriart, D., Richer, M.G., Cruz-González, I. (2007). Site testing at San Pedro Mártir. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* 31, 47–60. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57103108>
- United Nations (2018). <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
- U.S. Census Bureau (2021). Census 2020. <https://data.census.gov>
- Walker, C. (editor), & Benvenuti, P. (editor). (s. f.). *Dark & Quiet Skies II (2021), Report of the conference held 3-7 October, 2021*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5874725>

Watson, J. G., & Chow, J. C. (2001). Source characterization of major emission sources in the Imperial and Mexicali Valleys along the US/Mexico border. *Science of The Total Environment*, 276(1-3), 33-47. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00770-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00770-7)

3.3 Estimación de los niveles de contribución municipal a la contaminación lumínica del zenit del Parque Nacional Constitución de 1857, Baja California

Se realizó el mismo ejercicio que con el ANPO del OA SSPM pero con una ANP más cercana a la frontera con Estados Unidos y con una perspectiva transfronteriza.

Puro Coa, E.; Seingier, G.; Sánchez De Miguel, A; Solano-Lamphar, H.; Ávila, F. (2025). Estimating municipal contributions to cross-border light pollution using VIIRS satellite data: A case study of a national park in Northwest Mexico. *Environmental Challenges*, 18, 101073. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101073>

Received 6 July 2024; Received in revised form 23 November 2024; Accepted 22 December 2024- Available online 24 December 2024

Estimación de las contribuciones municipales a la contaminación lumínica transfronteriza utilizando datos satelitales VIIRS: un estudio de caso de un parque nacional en el noroeste de México

Resumen

La contaminación lumínica es una forma de contaminación ambiental causada por la iluminación artificial nocturna que alcanza y afecta áreas a menudo alejadas de las principales fuentes de emisión, como áreas naturales protegidas para la conservación de especies, ecosistemas y paisajes. Estas áreas generalmente carecen de regulaciones que aborden este tipo de contaminación y cuentan con pocos estudios sobre el tema. Este estudio estima, por primera vez, la contaminación lumínica transfronteriza de México y los Estados Unidos de América que impacta el Parque Nacional Constitución 1857 en Baja California, México. Este parque representa un área de interés para preservar sus paisajes, fuentes de agua y zona de tránsito de aves migratorias a lo largo de la Ruta Migratoria del Pacífico. Utilizando imágenes satelitales VIIRS y considerando un radio de 200 km alrededor del Parque Nacional, se calculó la contaminación lumínica en el cenit de los catorce municipios adyacentes al área protegida. Se obtuvieron tres indicadores del estado de contaminación lumínica para el período 2012-2021: radiancia cenital, intensidad radiante y contribución porcentual de los municipios en el contexto fronterizo. Los municipios con mayores valores de radiancia cenital para el periodo 2012-2021 son Mexicali, Ensenada, San Diego e Imperial, siendo el mayor aporte de radiancia 75 % de México y 25 % de Estados Unidos. Dichas contribuciones proporcionan datos cruciales para evaluar los impactos ambientales transfronterizos de la contaminación lumínica y ayudan a gestionar el área protegida y revisar las regulaciones sobre contaminación lumínica en estos municipios y condados.

Palabras claves: Contaminación lumínica, Frontera Estados Unidos-México, Áreas protegidas, Brillo del cielo, Parque Nacional Constitución 1857, Teledetección, Resplandor cenital

Notas destacadas

- La aplicación "simulación de brillo del cielo cenital" de "www.lightpollutionmap.info" se puede utilizar para estimar rápidamente la radiancia cenital a partir de imágenes VIIRS.
- El aporte de radiancia cenital al área protegida estudiada es 75 % de México y 25 % de Estados Unidos.
- Los municipios con mayor radiancia cenital promedio emitida son dos en México y dos transfronterizos (EE. UU.).
- Para el año 2021, la intensidad radiante total emitida en el cenit de los municipios aledaños al Parque Nacional Constitución 1857 es 62 % de Estados Unidos y 38 % de México.
- La tendencia de crecimiento demográfico es más significativa en la frontera con México y está más cerca del Parque Nacional.



Estimating municipal contributions to cross-border light pollution using VIIRS satellite data: A case study of a national park in Northwest Mexico

Elvis Puro Coa^a, Georges Seingier^{b,*}, Alejandro Sánchez de Miguel^{c,d}, Héctor Antonio Solano-Lamphar^{e,f}, Fernando Ávila^g

^a Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, Mexico

^b Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, Mexico

^c Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica. Instituto de Física de Partículas y del Cosmos (IPARCOS), Universidad Complutense, Madrid, España

^d Environment and Sustainability Institute, University of Exeter, Penryn, Cornwall TR10 9FE, UK

^e Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial A.C., Parque Tecnológico Querétaro, San Fandila 76908 Querétaro, Mexico

^f Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, Insurgentes Sur 1582, Crédito Constructor, 03940, Ciudad de México, Mexico

^g Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Apdo. Postal 877, Ensenada, Baja California 22800, Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:

Light pollution
USA-Mexico border
Protected areas
Sky brightness
Constitution 1857 National Park
Remote sensing
Zenith radiance

ABSTRACT

Light pollution is a form of environmental pollution caused by artificial nighttime illumination that reaches and affects areas often distant from major emission sources, such as protected natural areas for species conservation, ecosystems, and landscapes. These areas typically lack regulations addressing this type of pollution and have few studies on the subject. This study estimates, for the first time, transboundary light pollution from Mexico and the United States of America impacting the Constitution 1857 National Park in Baja California, Mexico. This park represents an area of interest for preserving its landscapes, water sources, and transit zone for migratory birds along the Pacific Flyway. Using VIIRS satellite imagery and considering a 200 km radius around the National Park, light pollution at the zenith of the fourteen municipalities adjacent to the protected area was calculated. Three indicators of light pollution status for the period 2012–2021 were obtained: zenith radiance, radiant intensity, and percentage contribution by municipalities in the border context. The municipalities with the highest zenith radiance values for the period 2012–2021 are Mexicali, Ensenada, San Diego, and Imperial, with the highest radiance contribution being 75 % from Mexico and 25 % from the United States. Such contributions provide crucial data for assessing the transboundary environmental impacts of light pollution and aid in managing the protected area and revising light pollution regulations in these municipalities and counties.

1. Introduction

A significant portion of terrestrial areas, particularly those near urban centers, are now affected by artificial light sources; and the nature of light scattering in the atmosphere extends the presence of photons beyond the limits of populated areas, affecting living organisms and the nighttime landscape (Cao et al., 2023; Karska et al., 2024). This form of pollution, known as light pollution, is generally caused by an increase in public and private lighting, which expands in both extent and intensity globally (Falchi et al., 2016; Kyba et al., 2017; Cox et al., 2020; Sánchez de Miguel et al., 2021), reaching our natural areas and altering the original conditions of the night and affecting species that depend on it for their activity/rest cycles, feeding, pollination, migration, spawning,

birth, and return to the sea, among other factors (Falchi et al., 2011; Gaston et al., 2013; La Sorte et al., 2022; Gaston and Sanchez de Miguel, 2022; Hirt et al., 2023; Rodrigo-Comino et al., 2023). According to Kyba et al. (2023), unchecked current lighting policies could result in an average annual increase in light pollution of 10 %.

This type of anthropogenic environmental pollution also interacts with other forms of atmospheric pollution and transcends geopolitical boundaries (Kocifaj and Kómar, 2016; Ścieżor and Czaplicka, 2020). The Geneva Convention defines atmospheric pollution as the anthropogenic introduction, direct or indirect, into the atmosphere of substances or energy that have harmful effects on health, the environment, or material goods in areas subject to national jurisdiction (United Nations, 1979). The need for further regulation of transboundary light pollution is

* Corresponding author.

E-mail address: georges@uabc.edu.mx (G. Seingier).

<https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101073>

Received 6 July 2024; Received in revised form 23 November 2024; Accepted 22 December 2024

Available online 24 December 2024

2667-0100/© 2025 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

urgent, particularly in regions where migratory bird routes and protected ecosystems overlap with urban growth areas. International cooperation between neighboring countries, such as Mexico and the United States, is crucial for mitigating the long-term environmental impacts of light pollution. These measures would not only protect biodiversity but also promote eco-tourism by preserving natural dark skies, offering both ecological and economic benefits to the region. Without cross-border legal frameworks, these protected areas face continuous degradation of their night skies, impacting the delicate balance of nocturnal ecosystems.

While light pollution is generated in mostly urban environments, consideration has only recently begun for its relevance in rural areas that are neighbors or are surrounded by population centers. Despite being relatively distant from the object to be preserved (the night sky of a place), light pollution sources emit photons that can travel up to 300 km if there is a big metropolitan area in that radius (Bará and Lima, 2018; Falchi and Bará, 2021). However, being detected does not always imply an impact at such great distances due to the influence of the Earth's curvature. Additionally, environmental planning instruments such as ecological-territorial zoning or protected area programs recognize the scenic, ecological, cultural, and scientific value of certain resources but do not highlight the value of dark skies and their impact on ecosystems.

The propagation of light photons necessitates the protection of designated natural areas due to their high value and species diversity, ecosystems, and landscapes, as well as the relationships and interactions that occur within them. This is the case for national parks, areas with the highest category of international protection, which have been the subject of concern in various studies to quantify the impact of light pollution on their dark skies, subsequent effects on conservation objects, and to identify emission sources, which in some studies in western US National Parks are located more than 320 km from the areas studied (Duriscoe, 2001; Aubrecht et al., 2010; González-Madriz et al., 2020; <https://www.nps.gov>).

Additionally, monitoring the impact of light pollution on sky quality is necessary, requiring the selection of the most appropriate indicators to understand its spatial occurrence. One of the most used indicators is zenith radiance. However, this is not the only one because depending on the type of study, radiance at different distances from the zenith can be considered, including the horizon (Falchi and Bará, 2020; Cox et al., 2020, 2021; Bará et al., 2021; Falchi et al., 2023). Furthermore, measures are required to reduce and control light pollution, including legal regulations at diverse levels of government and the incorporation of dark skies as values of natural areas.

1.1. Legal regulations for dark sky conservation

The first efforts for dark sky conservation emerged in the 1970s with recommendations for the protection of existing and potential astronomical observatories by the International Astronomical Union -IAU- (Smith, 1979; Riegel, 1973). This initiative led to two important measures: the creation of regulations for dark sky protection and the establishment of technical offices for dark sky conservation. More recently, in the early 2000s, some inter-institutional meetings were held with environmental organizations, promoting initiatives that include the protection of dark skies in protected natural areas and environmental regulations.

Regulations known popularly as "sky laws" propose the control of light emissions towards the sky, the creation of light protection areas within a 100 km radius around the astronomical observatory and urban zoning for lighting. Notable regulations in different sites include Pima County and Tucson (Arizona, USA), San Diego (California, USA), the Canary Islands (Spain), Flagstaff (Arizona, USA), Kona (Hawaii, USA), Llano del Hato (Mérida, Venezuela), northern Chile, and Baja California (Mexico). Additionally, offices were created in observatory protection areas such as in the Canary Islands (Spain), Llano del Hato (Venezuela), northern Chile, Andalusia (Spain), and Baja California (Mexico), among

others (Puro, 2019).

These legal frameworks aim to regulate sources and protect dark skies of astronomical areas with the definition of influence areas of 100 km around them. However, these light protection areas are not intended to propose efforts for dark sky conservation in protected areas and recognize their direct impact on the environment.

This concern leads to interdisciplinary recognition of the matter (Hölker et al., 2010; Falchi and Bará, 2021) and the search for alliances in international meetings -IAU, IUCN (International Union for Conservation of Nature), DSI (Dark Sky International Association), Starlight Foundation, among others- to discuss the adverse effects of light pollution on the environment and propose new work strategies.

Since the 2000s, major international organizations such as the DSI and Starlight have promoted the creation of criteria for the preservation, conservation, and protection of dark skies. This is achieved through certification programs for areas that meet the criteria which promote mitigation measures to the reduction of light pollution and the use of good lighting standards. As a result, they have obtained more than 200 dark sky places around the world (<https://darksky.org>) and more than 500 starlight international reserves (<https://fundacionstarlight.org>). Additionally, these experiences have inspired other proposals for criteria to select areas with very dark skies, such as those Peregrym et al. (2020) in Europe and the Caucasus region.

The creation of the Dark Skies Advisory Group by the IUCN in 2009 stands out, aiming to promote the preservation of the ecological integrity of the natural environment, recognizing the importance of natural darkness for the conservation of protected areas. Also, the proposal for management categories includes the preservation of dark skies in natural protected areas. However, in practice, very few places are designated with these protection categories.

Successful regulations with recognition of the incidence of light pollution on environmental issues and protected areas include the declaration of the Serra de Montsant Natural Park (Cataluña, Spain), where the value of dark skies for the natural environment is recognized in a protected area and zoning and regulation for the protection of the nighttime environment. On the other hand, Australia has national guidelines on light pollution for wildlife; Chile has incorporated biodiversity protection and the importance of the quality of its night skies into its regulations for the protection of terrestrial and marine ecosystems, as well as incorporating its application from a regional to a national scope (Diario Oficial de la Generalitat de Catalunya 2001; Commonwealth of Australia, 2020; Diario Oficial de la República de Chile, 2023).

Additionally, general environmental protection and conservation regulations have been implemented in southern and eastern regions of Europe that recognize artificial light and its adverse effects as a form of environmental pollution. These regulations include the prohibition of killing, altering, or destroying protected species, as well as their habitats, breeding, and resting places, in addition to protecting natural spaces and landscapes designated as protected areas (Schroer et al., 2020)

1.2. Dark skies and protected areas

Concerns about the consequences of light pollution and its impact on nocturnal living organisms and the environment in protected areas began in coastal areas, with the effect of artificial lighting systems on turtle nesting and hatching birth sites causing disorientation and, in some cases, death (Peters and Verhoeven, 1994; Kamrowski et al., 2012). Currently, the impact of light pollution on a wide variety of species, including fish, bioluminescent species, and even commercially important species, is being studied (Gaston et al., 2013; Verutes et al., 2014; Sanders et al., 2020; Simons et al., 2022).

Similarly, the impact on seabirds and coastal migratory birds by lights from ships, lighthouses, and oil platforms, among others, has led to regulation not only in coastal exterior lighting but also in the vicinity of observatories and the management documents of some protected

areas (Van Doren et al., 2017; Silva et al., 2020; Commonwealth of Australia, 2020).

A global study for the period 1992 - 2010 showed that over 42 % of protected areas experienced a significant increase in nighttime lighting, with a small percentage of protected areas in Europe (24 %) and North America (17 %) exhibiting elevated levels of nighttime lighting in all years (Gaston et al., 2015).

The impacts on dark skies in environmentally protected areas have been poorly studied in Mexico and worldwide, with the most monitored places being those corresponding to the zenith of the nighttime sky in protected areas where astronomical observatories are located, such as the National Astronomical Observatory (OAN) in the San Pedro Mártir National Park located about 120 km from our study area (Moreno-Corral et al., 1994; Tapia et al., 2007; Gagik et al., 2016; Plauchu-Frayn et al., 2017).

In Mexico, other general studies conducted in the states of Sonora and Baja California Sur have sought to monitor dark sky values using sky quality meters, and DSI certificates a state park in Queretaro (Solano, 2010; Verutes et al., 2014; <https://darksky.org/places/joya-la-barreta-ecological-park/>).

It is precise because of the presence of this observatory in the state of Baja California that the creation of regulations for the protection of dark skies is promoted, with characteristics similar to those of the first regulations: an area of 100 km around the OAN and express recognition of the interest in preserving the value for astronomy (Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2006; Ávila Castro, 2016; Puro, 2019). However, recent changes in regulations such as those in Chile and declaratory recognition of the value of dark skies for biodiversity are experiences that could be applied in the protected areas of the Baja California region. Therefore, monitoring the current characteristics in these nighttime environments is imperative.

The main objective of this study is to assess the transboundary contributions of light pollution impacting the Constitution 1857 National Park in Baja California (CNP) using remote sensing data from the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) satellite. Specifically, this study aims to: (1) identify the key sources of light pollution from adjacent municipalities in this Mexico-United States border region; (2) analyze spatial variations in light pollution levels over the period 2012–2021; and (3) generate initial inputs for future mitigation strategies based on the findings, with a focus on enhancing cooperation between municipalities and regions to reduce transboundary light pollution. The emphasis on municipalities is based on the legal authority granted by the Political Constitution of the United Mexican States regarding territorial planning and public lighting, in accordance with the Urban Development Law and the Environmental Protection Law of the State of Baja California.

2. Materials and methods

2.1. CNP

CNP was decreed on April 27, 1962, and located in the municipality of Ensenada in Baja California state, Mexico, with an area of 50.09 km². The national park is located approximately 60 km straight from the US border and, by road, about 200 km.

The protection objectives in the declaration of the national park highlight the importance of the Juárez mountains and their forests for "establishing a recreation and protection center for forest resources and wildlife, taking into account the beauty of the place due to the existence of a system of small lagoons, the main one being the Hanson or Andrade lagoon", one of the few lagoons in this semi-arid region (Diario Oficial de la Federación -DOF-, 1962).

It is predominantly a habitat of mountain pine forest and mountain chaparral vegetation. It possesses a set of representative species of the area and a reservoir of wetlands that feed a body of water recognized as a Ramsar site, the Hanson lagoon. This site is essential for migratory

birds, aquatic and coastal, and is part of one of the great migratory routes of the Americas: the Pacific Flyway. It should be noted that these annual migrations occur at night when the wind currents are gentler, and the moon and stars serve as a guide.

Additionally, the management program recognizes its importance as a "unique surface due to its biological characteristics and its great ecological relevance for biodiversity conservation" (DOF, 2011).

CNP is an important protected area in the California region, both for its physical-natural characteristics and its social environment. It serves as a reservoir of water that nourishes aquifers used by downstream populations.

2.2. Study area

Based on previous studies showing the significant impact that urban generated light pollution can have on natural areas at considerable distances (Bará and Lima, 2018; Falchi et al., 2021), a 200-kilometer radius around the CNP was chosen to encompass nearby and distant urban sources of light pollution, ensuring a comprehensive understanding of the transboundary impact on the natural area.

Therefore, our study area is defined as the region within a 200-kilometer radius around the CNP, based on the centroid coordinates 32.0699° N, 115.8919° W, at 1641 m above sea level (Fig. 1).

The study area encompasses a geographically diverse region, including both continental and peninsular territories, with its western coasts bordering the Pacific Ocean. Three large territorial units are identified: the coast, the mountains, and the desert. The central and eastern regions are characterized by mountains and deserts, which function as natural barriers to the moisture-laden air masses from the Pacific Ocean. This generates distinct climate zones: fog and humidity along the western coasts, mild conditions in the interior, and extreme heat in the eastern deserts. The coastal region experiences a temperate dry and semi-dry Mediterranean climate with mild, humid winters and hot, dry summers, while the mountainous areas have a temperate sub-humid and semi-cold climate. In contrast, the desert regions in the east exhibit arid to extremely dry conditions.

Rainfall is very scarce, with annual precipitation averaging around 200 mm, more abundant in coastal and mountainous areas. In the desert area, scarce rainfall ranges between 76 mm and 40 mm per year in areas of Imperial, Yuma, and the Sonoran Desert. The municipality of Mexicali stands out as the driest spot in Mexico, with an annual total rainfall of less than 50 mm.

In the dry climate, average annual temperatures range between 18 and 19 °C, with maximum temperatures soaring above 30 °C from May to September and lowest temperatures around 5 °C in January. In the semi-cold climate, the altitudinal factor plays a significant role, allowing for low temperatures and occasional snowfall in the winter. However, it is the desert areas of Mexicali, Calexico, San Luis, and San Luis Rio Colorado that genuinely stand out, having recorded maximum temperatures of 45 °C in July and August (Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2014).

Socioeconomically, it is an area with many urban and rural communities, with intense human and commercial activity, particularly in producing and circulating food from the agricultural valleys with a rich agricultural activity supported by an irrigation system. Likewise, the presence of the maquiladora industry in Mexico for the US market contributes to the dynamic character of the border.

In land use, urban and suburban areas stand out, mainly in the coastal areas where San Diego, Tijuana, Ensenada, Tecate, Playas de Rosarito, and San Quintín on the Pacific coast, and San Felipe, on the Gulf of California are located. On the other hand, the location of the Colorado River Valley and the Carlton Sea Valley adjacent to the Sonoran Desert is where Mexicali and its Valley stand out. San Luis Rio Colorado, in the vicinity of the great Altar Desert, sucks the northern end of the Gulf of California from the northeast of Baja California, the southeast of California and the southwest of Arizona and western



Fig. 1. CNP localization and 200 km radius study area.

Sonora, the Sonoran Desert to southeastern Arizona where sand and dunes predominate.

2.3. Methodology

Two main tools were used to fulfill the overall study process: geographical information system (GIS) to gather, extract and analyze spatial demographic and administrative data on one side, and the zenith brightness simulation tool provided by the Light Pollution Map website (Stare, J.; <https://www.lightpollutionmap.info>), to assess light pollution intensity and distribution. The procedure followed is described below and summarized in Fig. 2.

2.3.1. Data used

Using open-source QGIS software (QGIS.org, 2023), we built a GIS that incorporated different geometry types in shapefiles format. National park polygon was obtained from the official shapefile produced by the National Commission of Natural Protected Areas of Mexico (CONANP). Official municipalities/counties territorial boundaries in Mexico and the USA were provided by the National Institute of Statistics and Geography (INEGI) for Mexico and The United States Census Bureau in

shapefile format (US Census Bureau, 2021), taking into account the recent creation of new municipalities, particularly in México. From the same source, official census point data for both countries provided demographic data for all population centers within these municipalities/counties for 2012 and 2021 (estimates were arithmetically calculated, since only 2010 and 2020 data were available).

QGIS geoprocessing vectoral buffer tool allowed us to create our study area, geometrically defined as a 200-kilometer buffer around the park, calculated from the park's centroid. This latter was used in the vectoral geoprocessing clip tool to provide the municipal areas within the 200 km buffer. From there, different vectoral tools (select by location, group stats, distance to centroid, centroids, and area calculation) were used to calculate specific population and areas in the partially contained municipalities/counties.

To quantify municipal light pollution and its contributions to the CNP, we consider the Bará and Lima (2018) methodology, which uses an isotropic model of light emission. This model assumes that light emitted uniformly in all directions from a source, and it is used to quantify the transfer of light pollution between territories. It helps to understand how light pollution from one area can affect another area. This methodology allows us to assess the magnitude of transboundary light pollution in an

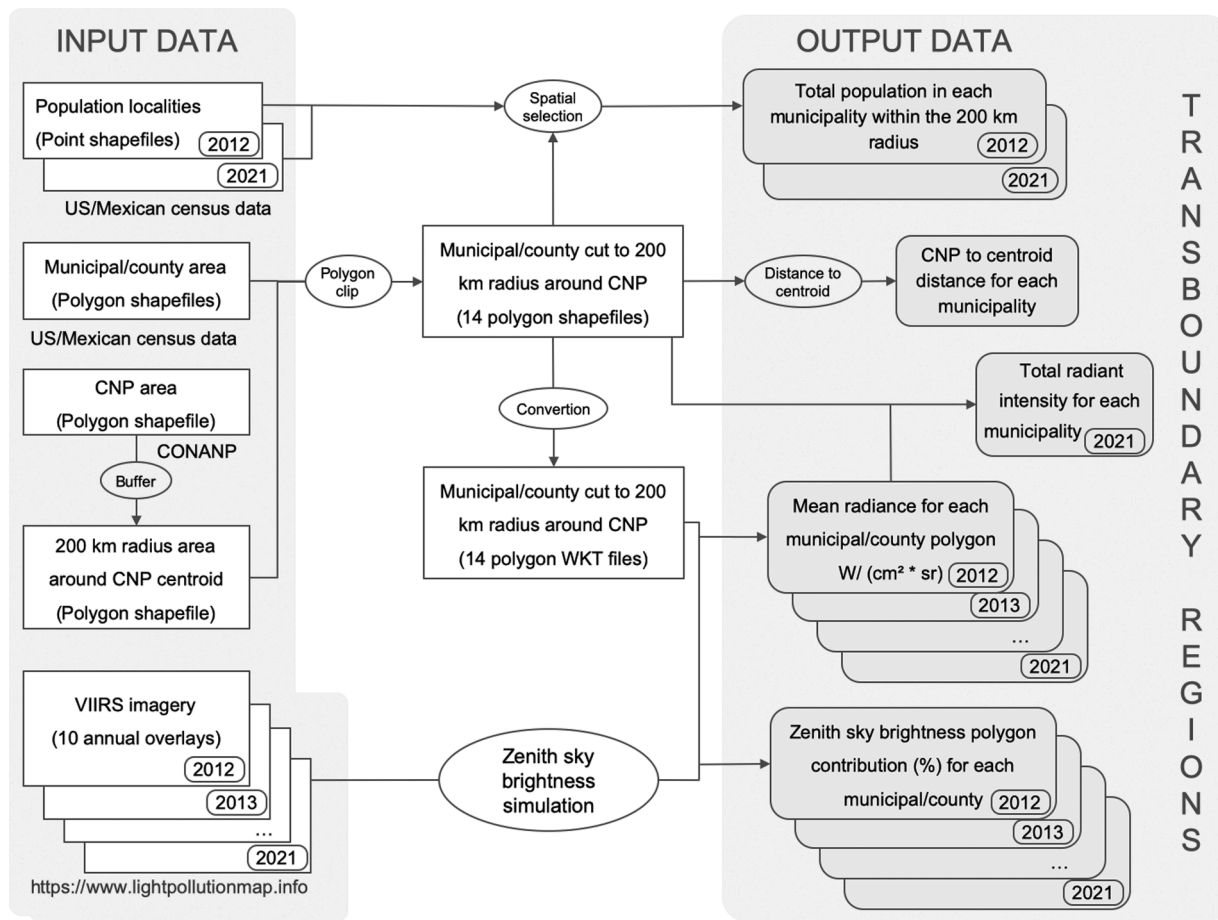


Fig. 2. Methodology flow chart.

area which has an impact on the observation point zenith brightness of a given key protected area. This information is valuable for light pollution management, as public lighting is under municipal authority, where regulations are established.

Operational since 2011, VIIRS Day/Night Band images provide data in the ultraviolet to visible range, between 500 and 900 nm. These radiance data, combined with the previous methodology, can help identify municipalities/counties with annual contributions to light pollution in and around the park, as has been proved in the zenith brightness simulation tool of the Light Pollution Map website (Stare, J.; <https://www.lightpollutionmap.info>; NASA, n.d.). With annual VIIRS image overlays from a specific year as an input, it estimates the annual mean of zenith radiance values in a 200 km radius area, considered the area which has an impact on the observation point zenith brightness. Additionally, an extended tool allows to estimate the contribution of light sources coming from an area delimited by an uploaded polygon, in WKT format.

Municipality/county area within the 200 km buffer polygon geometry layers in shapefile format were exported to WKT format to feed the zenith brightness simulation tool, which was used in an iterative way for each fourteen municipalities/counties. We obtained values of radiance mean expressed in 10^{-9} W/ (cm² * sr), and the percentage of zenith sky brightness each given polygon contributes. The process was repeated for each selected VIIRS overlay between years 2012 and 2021. Selected observation point latitude and longitude for the simulation were the CNP centroid coordinates (32.0699° N, 115.8919° W).

2.3.2. Study limitations

In terms of methodology limitations, consideration must be given to the spectral range of VIIRS images, the study of a portion of the sky,

particle size, and municipal polygon sizes. VIIRS is sensitive to portions of the visible and near-infrared spectrum, corresponding to 500 – 900 nanometers (nm), including a wide range of luminaire types. However, it does not cover modern lighting technologies such as light-emitting diodes (LEDs) emitting blue light (400 nm), which are widely used in the study area.

Only zenith radiance emission (at a 90-degree angle) is considered, making only emission points visible and disregarding the horizontal dispersion of light. Additionally, atmospheric light scattering modeling does not account for differences in suspended particles between the coastal zones of California and those of the eastern Sonora-Arizona Desert.

To calculate the different contributions of light-emitting sources, municipal boundary polygons in Mexico and their equivalents in the USA counties were considered. Smaller delimitations are recommended for greater precision in calculations, as municipalities in Baja California are often large and sparsely populated.

While there is only one on-site sky brightness data collection point with a Sky Quality Meter in the CNP, and no permanent program to monitor the evolution of the issue at the moment, this research provides an initial characterization with a transboundary-territorial approach.

3. Results and discussion

Within the 200-kilometer radius of influence around the CNP, the transboundary area between México and the United States of America (USA) encompasses four states (Arizona, California, Sonora, and Baja California) and fourteen municipalities, totaling 88,025 km². In some municipalities, only a small part of their territory falls within the 200-kilometer area, and we only have the population data for that specific

area. For example, Puerto Peñasco municipality has one inhabitant within the study area (INEGI, 2020).

The municipalities with the highest percentages of surface area in the study area are Ensenada, Baja California (15.03 %), Imperial, California (13.22 %), San Diego, California (12.78 %), and Mexicali, Baja California (11.37 %). This area also includes major population centers such as San Diego (California), Mexicali (Baja California), Tijuana (Baja California), San Luis Río Colorado (Sonora), and Ensenada (Baja California) (Fig. 3).

As shown in Fig. 4, the closest municipalities to CNP are Ensenada (71.48 km), Tecate (72.85 km), Mexicali (83.87 km), Tijuana (102.05 km), and San Felipe (158.08 km). The most distant municipalities are La Paz (179.98 km), Puerto Peñasco (183.99 km), and Riverside (184.45 km).

Additionally, the estimated population of the study area for the year 2021 is 7988,268 inhabitants, with Mexico and the USA each accounting for 50 % of the population. The highest population percentages are mainly concentrated in San Diego County, California (39.5 %), and Tijuana, Mexicali, and Ensenada in Baja California (43.2 %) (Table 1). Geographically, these major population centers are located in coastal areas of the Pacific, except Mexicali, in an agricultural valley in the Colorado River.

3.1. Percentage contribution of municipal zenith radiance to cnp for 2012–2021

The highest percentage of zenith radiance contribution comes from Mexicali at 44.63 %, followed by Ensenada at 11.95 %, San Diego at 11.92 %, Imperial at 9.55 %, and Tijuana at 9.30 % (Table 1, Fig. 5a and Table S1)

The significant values from Mexicali, besides its illumination, may be influenced by intense environmental contamination by dust and ash particles generated by intense agricultural and livestock activities. High wind erosion conditions and particle transport also contribute to light reflection in suspended particles. These environmental factors are urgent concerns that need to be addressed, especially in a large urban settlement like Mexicali with over a million inhabitants.

Municipalities with lower contributions, like Riverside, contribute less mainly due to their small population density. Municipalities with no contribution, like La Paz and Puerto Peñasco, have no contribution primarily due to the almost nonexistent population within the study area.

Although the most significant average of radiance contributions to the zenith of the PNC come from Mexico (75 %), there is a substantial contribution from the cross-border area with the USA (25 %). This result emphasizes the need for a cross-border approach to addressing the environmental impact of light pollution and the coordination of measures to control and reduce it.

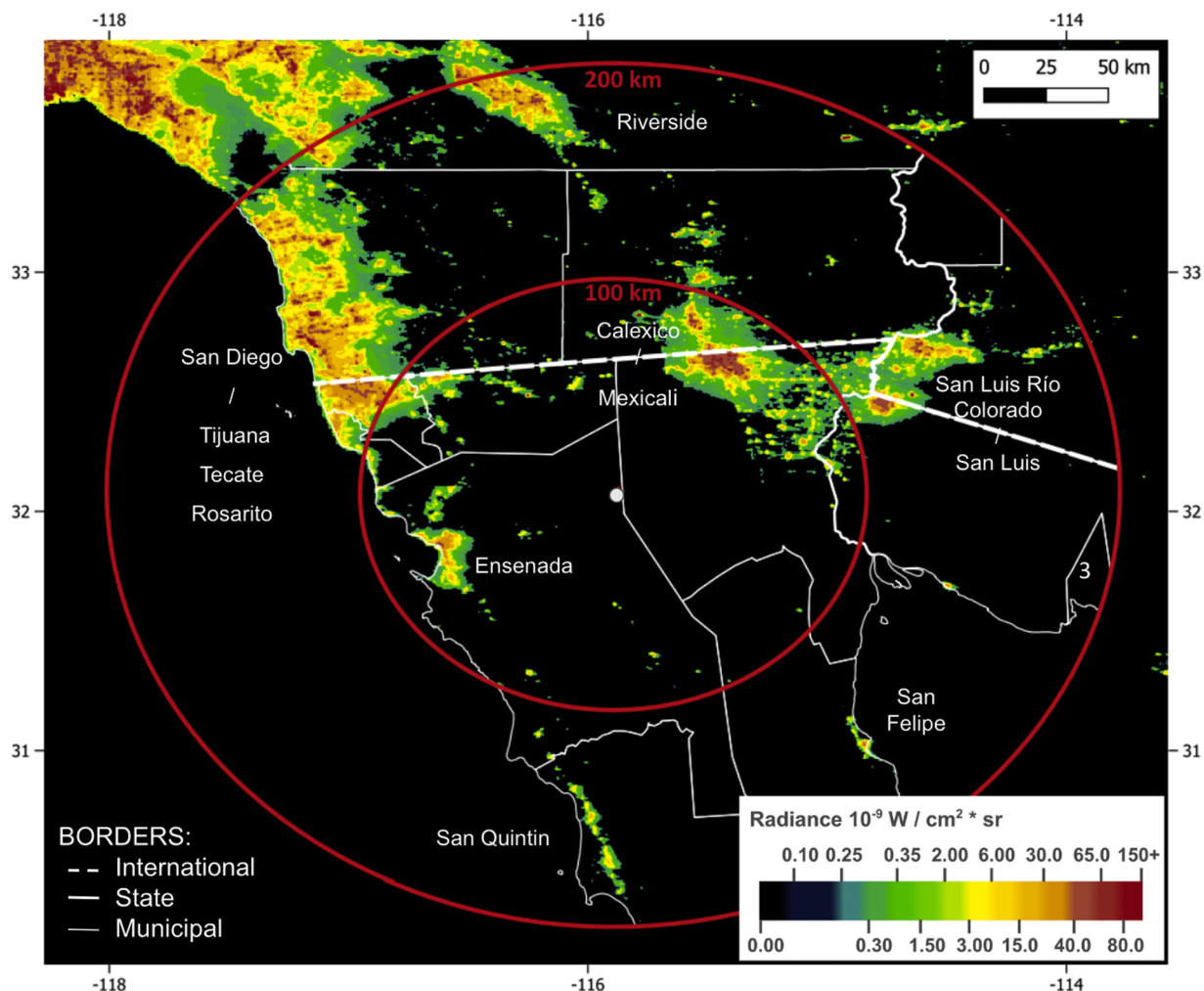


Fig. 3. VIIRS-DNB 2021 nighttime lights (<https://www.lightpollutionmap.info>, NASA’s Black Marble nighttime lights product) in the study area, with superimposed borders of municipalities/counties.

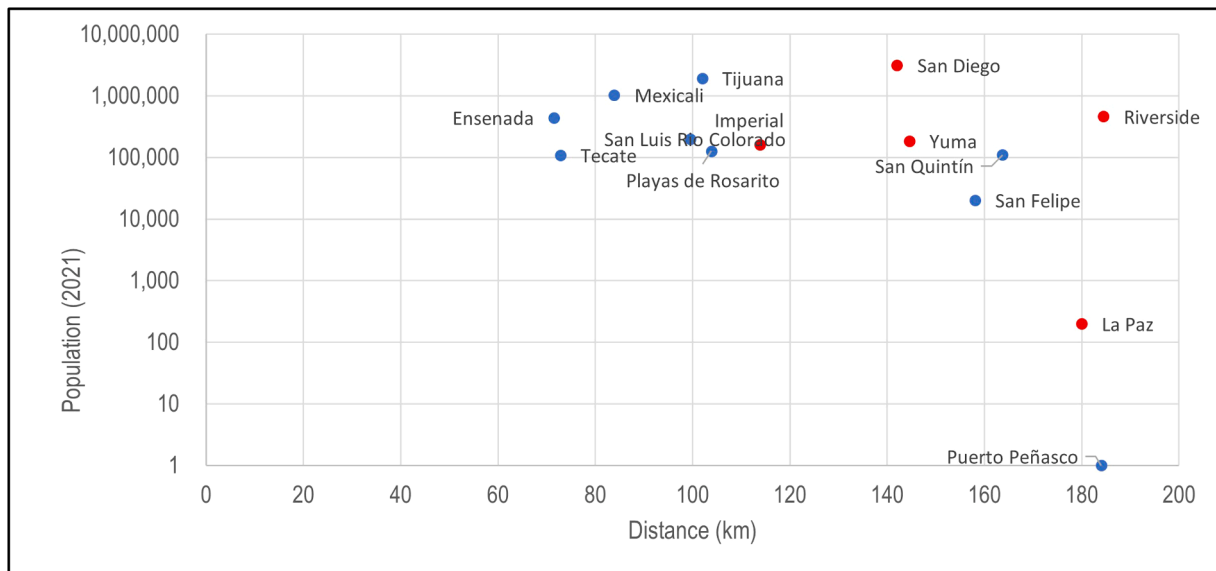


Fig. 4. Population distribution in Mexico municipalities (blue)/USA counties (red) versus distance to CNP.

Table 1
Distance to national park, population, zenith radiance for each municipality/county.

Municipality / County	Average distance to centroid (km)	Municipal / county population				Zenith radiance			
		Within 200 km		Variation (2012–2021)		Percentage contribution (2012–2021 average)	2021 average value (10^{-9} W/(cm ² *sr))	Variation 2012–2021	
		2012	2021	Absolute	%			Absolute (10^{-9} W/(cm ² *sr))	%
USA									
California State									
Imperial	114	152,390	162,310	9921	7	9.55	0.57	0.05	10.31
Riverside	184	435,908	461,276	25,367	6	0.97	1.59	0.29	22.66
San Diego	142	2971,561	3156,618	185,057	6	11.92	3.9	0.42	12.12
Arizona State									
La Paz	180	240	193	-47	-20	0	0	0	0
Yuma	145	175,045	185,339	10,294	6	2.34	1.26	-0.11	-0.41
MÉXICO									
Sonora State									
San Luis Rio	100	182,504	201,077	18,572	10	2.55	0.49	-0.1	-5.86
Colorado									
Puerto Peñasco	184	2	1	-1	-50	0	0	0	0
Baja California State									
Ensenada	71	388,522	447,987	59,466	15	11.95	0.3	0.07	33.24
Mexicali	84	941,057	1041,175	100,119	11	44.63	1.67	0.2	4.41
Playas de Rosarito	104	97,971	130,505	32,534	33	1.09	3.46	1.18	52.04
Rosarito									
San Felipe	158	18,609	20,311	1702	9	0.10	0.05	0	-3.85
San Quintín	164	89,238	113,493	24,255	27	0.10	0.11	0.02	19.68
Tecate	73	103,327	109,079	5752	6	4.64	0.54	0.09	-3.43
Tijuana	102	1631,475	1958,904	327,429	20	9.30	13.64	4.52	35.39

3.2. Municipal radiance for the period 2012–2021

According to the data collected for the period 2012–2021, the highest average radiance is $11.0306 \cdot 10^{-9}$ W/(cm² * sr), observed in the municipality of Tijuana (Fig. 6 and Table S2). This finding is particularly relevant as it pertains to the city of Tijuana and its surrounding area, which are characterized by low adoption rates of Full Cut Off luminaires and have experienced significant population growth over the past ten years, leading to an increase in commercial, industrial, ornamental, and residential lighting. The following municipalities with higher average radiance values are San Diego with $3.6793 \cdot 10^{-9}$ W/(cm² * sr) and Playas de Rosarito with $2.9474 \cdot 10^{-9}$ W/(cm² * sr). San Diego, the second-largest city in California and the eighth-largest in the USA, had a metropolitan area comprising over three million inhabitants by 2020. In

contrast, the lowest average radiance values are observed in San Felipe with $0.0048 \cdot 10^{-9}$ W/(cm² * sr) and La Paz with $0.0027 \cdot 10^{-9}$ W/(cm² * sr).

Taking the year 2021 as a reference, we observe average values of zenith radiance (Fig. 5b), where the highest average percentage are found in the municipalities of Tijuana (49 %), Imperial (14 %) and Playas de Rosarito (12 %). Consequently, Tijuana municipality has the highest concentration of lighting-emitting sources. When calculating the total contribution of emission at the zenith (radiant intensity in Fig. 5c), taking into account area of each municipality, San Diego stands out with the highest total emission at the zenith (38 %), surpassing Tijuana (13 %). This is because the area of the San Diego municipality is ten times larger than that of Tijuana. For 2021, the total radiant intensity emitted at the zenith by the municipalities surrounding the CNP is 62 % from the

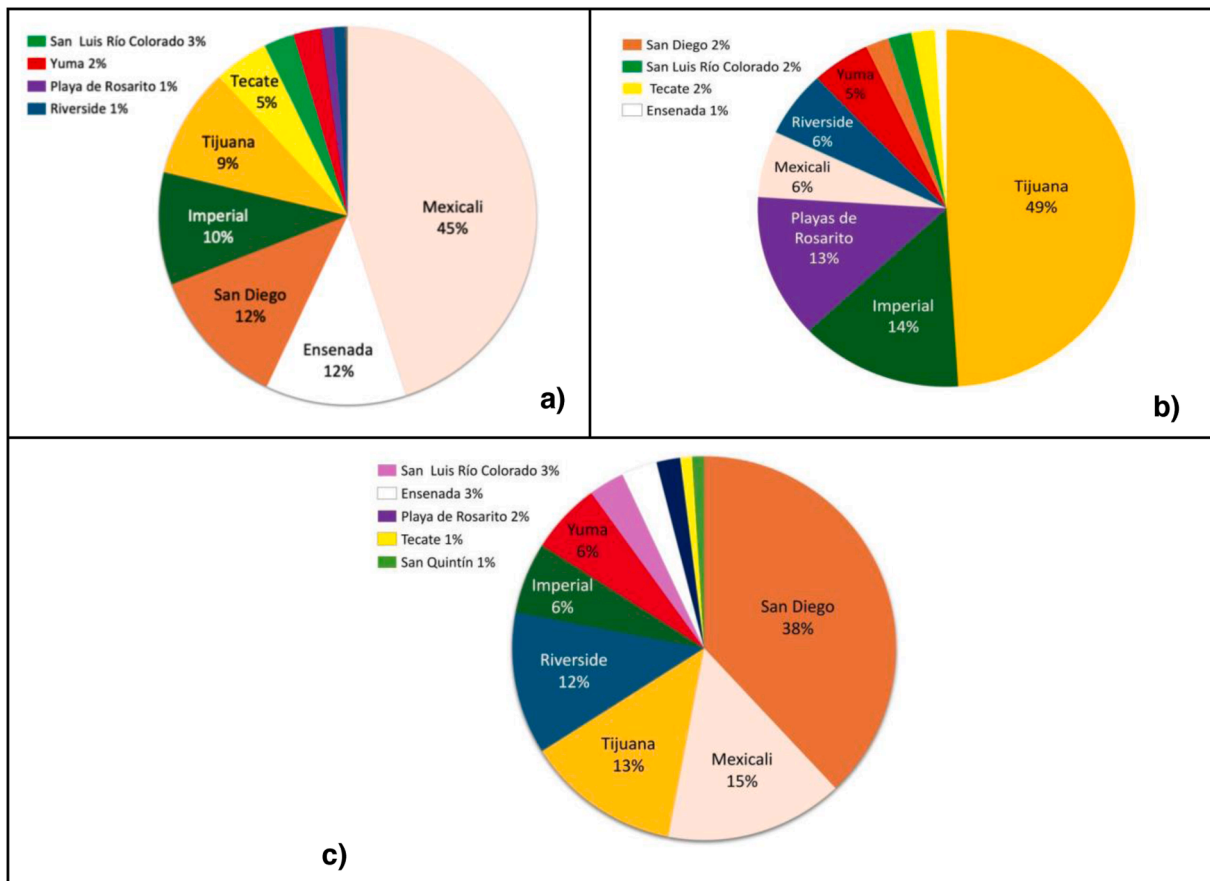


Fig. 5. a) Percentage of the average zenith radiance contribution to the CNP by municipality for 2012–2021; b) Percentage of average zenith radiance (2021); c) Percentage of total radiant intensity emitted at the zenith in the 200 km zone (2021).

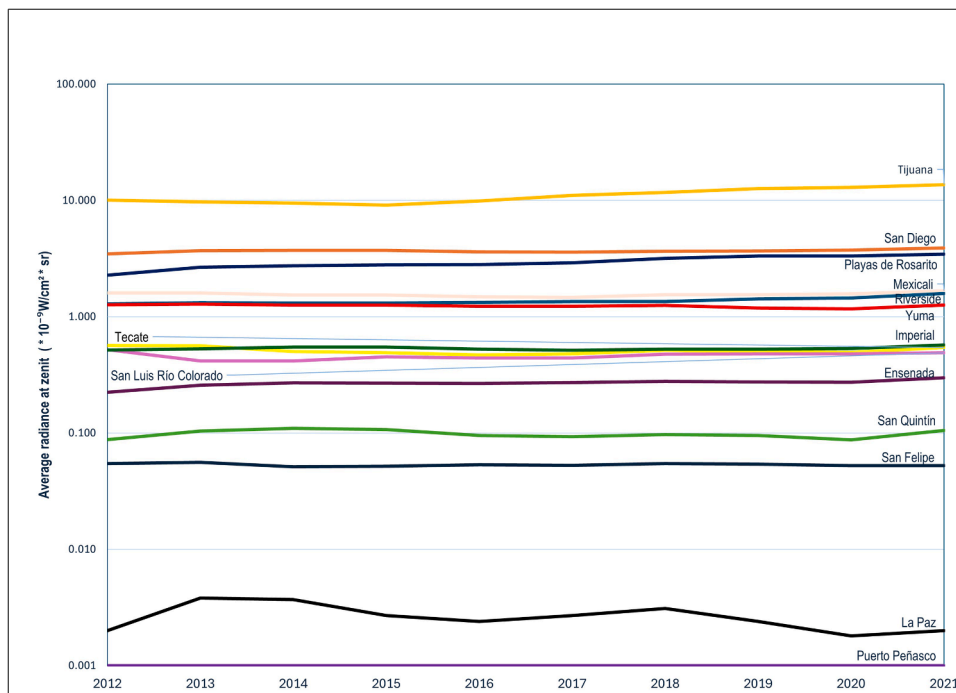


Fig. 6. Average zenith radiance by municipalities/counties for the period 2012–2021. For improved representation on the logarithmic scale, a minimum value is assigned to Puerto Peñasco (originally 0).

United States and 38 % from Mexico.

3.3. The role of municipal/county contribution to zenith light pollution in the cnp

For this analysis, a priority area of influence to the CNP within a 150 km radius was defined, following the proposal by Puro (2019) and the Diario Oficial de la República de Chile, 2023 for the OAN in the San Pedro Mártir National Park, and the astronomical observatories in northern Chile, respectively. Furthermore, it responds to an isotropic model of the emission source, implying that the amount of energy emitted from a source is equal in any direction.

Our results show a significant coincidence between the distances to the municipalities/counties with the highest radiance emission in their most important cities. The main contributors to zenith light pollution in the CNP are located at an average distance of 150 km. These findings are crucial in shaping policy decisions aimed at protecting this natural area's dark skies (Fig. 7).

Fig. 7 illustrates the absence of contribution to zenith light pollution from sources beyond 150 km. However, as with San Diego, we must consider the spread nature of urban centers, represented as large patches of metropolitan areas whose size extends beyond the average distance. Between 100 and 150 km, three urban areas together account for approximately 31 % of the contribution: Tijuana (9 %), Imperial (10 % for the cities of El Centro, Calexico, Imperial, and Brawley), and San Diego (12 %).

This trend supports the proposals of Puro (2019) and the Diario Oficial de la República de Chile, 2023 to expand the light influence area in OAN San Pedro Mártir (Mexico) and Chile from 100 km to 150 km. In the case of the CNP, its ecological importance, proximity to primary light emitting sources, and migratory bird transit zones that utilize the National Park are vital factors to be considered. The defined area offers an opportunity to integrate measures to control light pollution in updates to municipal regulations.

Also noteworthy is the organization of the distribution of urban centers that represent significant sources of radiance emission, and some of them are even connected despite the borders, constituting large population clusters whose emissions are distinguishable in VIIRS images as transboundary urban patches and growing areas. The transboundary regions are:

- 1). San Diego - Tijuana - Tecate - Rosarito, with Tijuana and San Diego being large cities with growth on opposite sides of the border. San Diego has a long spatial extension ranging from 66 km to 200 km

at the extremes of the distance from the CNP, associated with a continuous and more extensive urban patch of the southern California metropolis adjacent to the municipality of Tijuana, which extends southward. This transboundary light source is the largest in the study area, accounting for 21 % of light pollution contribution to the National Park.

2). Mexicali - El Centro - Calexico, forming an urban cluster in the municipalities of Mexicali and Arizona, is in fertile valleys with intense agricultural and industrial activities and is surrounded by deserts. These conditions facilitate the presence of copious amounts of suspended particles in the air that significantly affect diffuse light and generate that vast dome of scattered light distinguished in the images. In addition, their proximity to the National Park contributes 55 % to light pollution.

3). San Luis Río Colorado - San Luís - Yuma is an urban cluster in the San Luis Río Colorado and Yuma municipalities. Additionally, the growing area of Ensenada - Valle Guadalupe cities are located within the first 50 km of distance to the National Park and have a population growth of 17.6 % in 10 years.

The population increase in the municipalities over the 10 years period is mainly in Playas de Rosarito (33 %), Tijuana (20 %), Ensenada (15 %), Mexicali (11 %) and San Diego (6 %). Therefore, this growth trend is more significant on the Mexican border and is closer to the National Park, impacting housing and urban growth requirements like lighting requirements, and consequently, an increase in the emission of light photons. It is essential to highlight the high correlation (0.84) between population variation and zenith radiance variation for the period 2012–2021.

The growing connectivity of large transboundary urban patches and, therefore, their emission and light dispersion sources towards the zenith and likely other angles of view of the sky become barriers of artificial light that affect birds in the Pacific migratory route that use the Hanson Lagoon (in CNP) and the Colorado River Delta as resting sites. An example is San Diego - Tijuana - Tecate and Mexicali - Calexico, with more significant growth on the Mexican side of the border and connected to the south of the border with San Luis Río Colorado - San Luís - Yuma. With more north-south development is San Diego - Tijuana - Playas de Rosarito, which could connect with Ensenada in the future.

However, there is also a trend of growth and connectivity in some fragmented urban centers along the Camalú - Padre Kino axis in the municipality of San Quintín.

It is worth noting that orographic obstacles such as the Rumorosa and Sierra de Juárez, or geographical features like the Laguna Salada

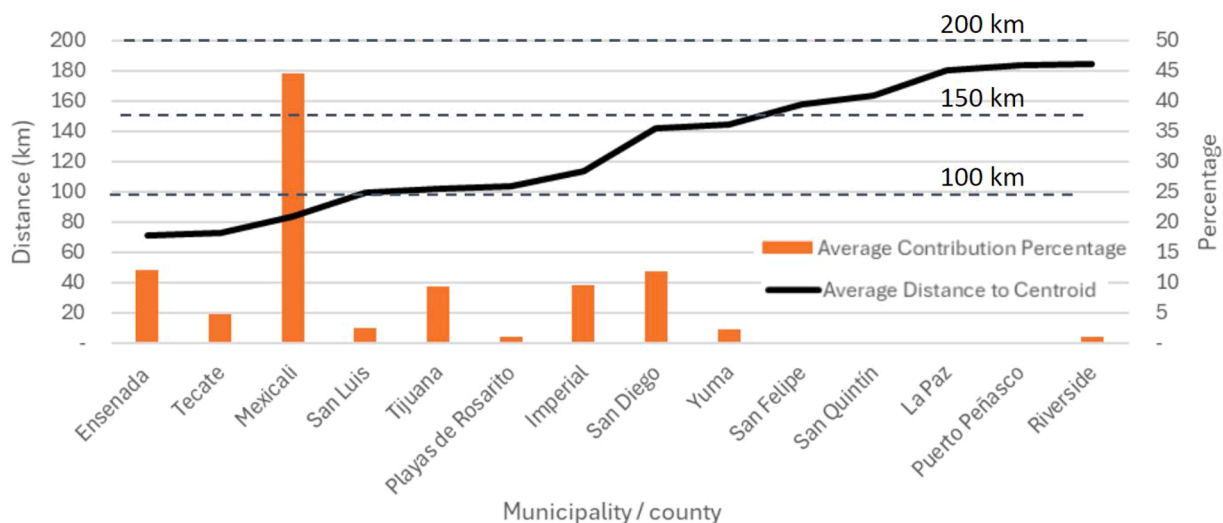


Fig. 7. Distribution of municipalities within the 200 km radius and average contribution percentage (2012–2021).

desert, Sonora desert, and the Colorado River delta, which surround the CNP in the first 80 km, contribute to attenuating the sources of light that contaminate its zenith.

The categories of the fourteen municipalities located within the two hundred kilometers of the National Park are as follows in Table 2.

Our research reveals that a considerable proportion of light pollution comes from densely populated urban areas and nearby industrial centers. This information is vital for formulating specific mitigation strategies. For example, we suggest the implementation of stricter regulations on artificial lighting in these areas, focusing on reducing light intensity and using environmentally friendly lighting technologies such as low-emission LED lights in the blue spectrum. Additionally, we recommend the installation of lighting systems that minimize light dispersion towards the sky and protected natural areas.

The practical application of these results could include collaboration with local and regional governments to review and update urban lighting regulations and promote awareness of the environmental impact of light pollution. Furthermore, it is essential to promote educational campaigns targeted at the community, highlighting the importance of preserving dark skies for their aesthetic value and ecological and astronomical significance. By integrating these approaches into local and regional policies, our study aims to contribute to the conservation of the CNP and its biodiversity and support public health and social well-being by reducing the adverse effects of light pollution.

4. Conclusions

The Light Pollution Map platform (<https://www.lightpollutionmap.info>), which provided access to VIIRS imagery and polygon analysis tools (zenith sky brightness simulation), provides a fast and efficient method for assessing radiance contributions and emissions. Our research, for the first time in this binational region, identified a significant concentration of light pollution affecting the CNP, mainly in the north, northeast, and northwest regions. This distribution aligns with major urban centers such as San Diego, Tijuana, and Mexicali, where Mexico accounts for 75 % of the concentration of light pollution and the United States for 25 %. These findings underscore the urgent need for cross-border collaboration to effectively combine efforts to address this problem.

It is important to consider the potential influence of geographical and topographical obstacles on light scattering, even when using an isotropic source emission model for local analyses. Moreover, the role of suspended particles and water vapor in the atmosphere should be considered when adjusting the results of light pollution contribution (Kocifaj and Kómar, 2016; Ściężor and Czaplicka, 2020). This is

Table 2
Categories of municipalities/counties contribution levels.

Contribution Level	Municipalities	Characteristics
High contribution	San Diego (USA), Mexicali, and Tijuana (Mexico)	Highest populations, large urban centers with average distance to the park of 150 km.
Moderately high contribution	San Luis Río Colorado, Ensenada and Imperial	Moderate populations, significant urban centers with average distance to the park greater than 80 km.
Moderate contribution	Yuma, Playas de Rosarito and Tecate	Moderate populations, significant urban centers, proximity to the national park within an average distance of 150 km.
Low contributions	Riverside, San Quintin, San Felipe and La Paz,	Sparse populations, dispersed population distribution, average distances greater than 170 km.
Without contribution	Puerto Peñasco	Sparse populations, or without activity generating light pollution

particularly important when establishing comparisons in the study area, such as between the drier eastern regions like the Mexicali-Imperial Valley and the more humid western coastal zone of Ensenada and San Diego. The specific environmental characteristics of these regions, such as elevated temperatures and the presence of dust particles in local agricultural or desert areas, play a significant role in influencing light scattering.

For a more accurate assessment in Baja California, future studies should use more detailed scales, such as urban polygons or smaller administrative divisions, rather than municipal boundaries, even though decisions about public lighting are made at the municipal or county level. These adjustments are crucial for enhancing the accuracy and effectiveness of public lighting assessments.

Light pollution from urban centers, although at a considerable distance from protected areas, can form light barriers that impact migratory species over long distances, undermining conservation efforts by gradually fragmenting dark skies corridors that connect important natural areas in both sides of the borders (Duriscoe, 2001; Aubrecht et al., 2010; Gaston et al., 2015; <https://www.nps.gov>). Therefore, it is crucial for all of us, as environmental policymakers, conservationists, urban planners, and researchers to work together and foment legal measures to combat light pollution in both the regions of Mexico and the United States. In addition, recommendations from the DSI Association and existing legal regulations, such as using low-intensity and full-cut LED lighting in urban areas surrounding protected regions, must be implemented to minimize upward light scattering.

One of the first steps, and essential basis, for mutual understanding between countries is to bring attention to the nature of light pollution as an environmental problem (United Nations, 1979), which interacts with other forms of air pollution (Kocifaj and Kómar, 2016; Ściężor and Czaplicka, 2020). This would make it possible to jointly address aspects such as the emission of particles into the atmosphere by some agricultural and industrial activities in the area, as widely reported by air pollution studies on both sides of the international border.

Furthermore, bilateral agreements between Mexico and the United States, similar to existing environmental treaties such as the U.S.-Mexico Environmental Program: Border 2020, could facilitate coordinated efforts to regulate and reduce transboundary light pollution and its impacts. Such agreements sought by the U.S.-Mexico collaboration to improve the environment at the border would include establishing a shared network to monitor transboundary light pollution to ensure continuous assessment, provide technical advice, and encourage compliance with new rules to preserve dark skies. It is also essential to highlight the need for additional financing to municipalities in Mexico so that the existing dark sky protection standards can be applied.

The environmental agencies of each country could coordinate this cooperation, and an implementation program, which involves the administrations of the municipalities responsible for lighting, could be established, to promote the safeguarding of dark skies for future generations.

CRediT authorship contribution statement

Elvis Puro Coa: Writing – review & editing, Writing – original draft, Validation, Investigation, Formal analysis, Conceptualization. **Georges Seingier:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation, Project administration, Investigation, Funding acquisition, Formal analysis, Conceptualization. **Alejandro Sánchez de Miguel:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation, Methodology, Conceptualization. **Héctor Antonio Solano-Lamphar:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Validation, Formal analysis. **Fernando Ávila:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Methodology.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

We thank Jesús Hernández for his useful commentaries, as well as the National Council for Humanities, Science and Technology (CON-AHCYT) for the first author's PhD scholarship.

Supplementary materials

Supplementary material associated with this article can be found, in the online version, at [doi:10.1016/j.envc.2024.101073](https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101073).

Data availability

No data was used for the research described in the article.

References

- Aubrecht, C., Jaiteh, M., De Sherbinin, A., 2010. Global assessment of light pollution impact on protected areas. <https://www.iucn.org/es/node/12152>.
- Avila Castro, F., 2016. La Ley del Cielo, in: *The Right to Dark Skies/El Derecho a Los Cielos Oscuros*. UNESCO, Ciudad de México, México, pp. 123–134. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000246131#:-:text=The%20Right%20to%20dark%20skies>.
- Bará, S., Lima, R., 2018. Photons without borders: quantifying light pollution transfer between territories. *Int. J. Sustain. Lighting* 20, 51–61. <https://doi.org/10.26607/ijsl.v20i2.87>.
- Bará, S., Falchi, F., Lima, R., Pawley, M., 2021. Keeping light pollution at bay: a red-lines, target values, top-down approach. *Environ. Challenges* 5. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100212>.
- Cao, M., Xu, T., Yin, D., 2023. Understanding light pollution: recent advances on its health threats and regulations. *J. Environ. Sci.* 127, 589–602. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.06.020>.
- Commonwealth of Australia, 2020. National light pollution guidelines of wildlife, including marine turtles, Seabirds and Migratory Shorebirds. <https://www.agriculture.gov.au/sites/default/files/documents/national-light-pollution-guidelines-wildlife.pdf>.
- Cox, D.T.C., Sánchez De Miguel, A., Dzurjak, S.A., Bennie, J., Gaston, K.J., 2020. National scale spatial variation in artificial light at night. *Remote Sens. (Basel)* 12, 1591. <https://doi.org/10.3390/rs12101591>.
- Diario Oficial de la Federación, 1962. Decreto Que Declara Parque Nacional, Con El Nombre De Constitución de 1857. <http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/DecretosDOF/Constitucion1857.pdf>.
- Diario Oficial de la Federación, 2011. Resumen del Programa de Manejo del Parque Nacional Constitución de 1857. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_pcyim/115_DOF.pdf.
- Diario Oficial de la Generalitat de Catalunya, 2001. Ordenación Ambiental del Alumbado para La Protección del Medio Nocturno, Ley 6/2001 Comunidad Autónoma de Cataluña.
- Diario Oficial de la República de Chile. Decreto Que Establece Norma de Emisión De Luminosidad Artificial Generada Por Alumbrados exteriores, Elaborada a Partir De La Revisión Del Decreto Supremo N°43, De 2012, Del Ministerio Del Medio Ambiente. <https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2023/10/18/43679/01/2391423.pdf>.
- Duriscoe, D., 2001. Preserving pristine night skies in national parks and the wilderness ethic. *George Wright. Forum.* 18, 30–36. <https://www.georgewright.org/184albers.pdf>.
- Falchi, F., Cinzano, P., Elvidge, C., Keith, D., Haim, A., 2011. Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *J. Environ. Manage.* 92, 2714–2722. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.029>.
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C., Elvidge, C., Baugh, K., Potnov, B., Rybnikova, N., Furgoni, R., 2016. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Sci. Adv.* 2. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>.
- Falchi, F., Bará, S., 2020. A linear systems approach to protect the night sky: implications for current and future regulations. *R. Soc. Open Sci.* 7, 201501. <https://doi.org/10.1098/rsos.201501>.
- Falchi, F., Bará, S., 2021. Computing light pollution indicators for environmental assessment. *Natur. Sci.* 1, e10019. <https://doi.org/10.1002/ntls.10019>.
- Falchi, F., Ramos, F., Bará, S., Sanhueza, P., Jaque Arancibia, M., Damke, G., Cinzano, P., 2023. Light pollution indicators for all the major astronomical observatories. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 519, 26–33. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac2929>.
- Gagik, T., Hernandez, M., Ochoa, J., 2016. Astroclimatic characterization of Vallecitos: a candidate site for CTA at San Pedro Mártir. *Astronom. Soc. Pacific. https://doi.org/10.48550/arXiv.1601.02383*.
- Gaston, K., Bennie, J., Davies, T.W., Hopkins, J., 2013. The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biol. Rev.* 88, 912–927. <https://doi.org/10.1111/brv.12036>.
- Gaston, K., Duffy, J.P., Bennie, J., 2015. Quantifying the erosion of natural darkness in the global protected area system. *Conser. Biol.* 29, 1132–1141. <https://www.jstor.org/stable/24483188>.
- Gaston, K., Sánchez de Miguel, A., 2022. Environmental impacts of artificial light at night. *annual review of environment and resources. Annu. Rev. Environ. Resour.* 47. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112420-014438>.
- González-Madrugal, J., Solano-Lamphar, H., Ramírez, M., Navea, K., Muñoz, M., 2020. La contaminación lumínica como aproximación a la planeación urbana de ciudades mexicanas. *EURe* 46, 155–174. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612020000200155>.
- Hirt, M.R., Evans, D.M., Miller, C.R., Ryser, R., 2023. Light pollution in complex ecological systems. *Phil. Trans. R. Soc. B* 378. <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0351>.
- Hölker, F., Moss, T., Griefahn, B., Kloas, W., Voigt, C., Henckel, D., Hänel, Kappeler, Völker, Schwoppe, Franke, Uhrandt, Fisher, Klenke, Wolter, Tockner, 2010. The dark side of light: a transdisciplinary research agenda for light pollution policy. *Ecol. Soc.* 5, 13. <https://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss4/art13>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2020. Censos y Censos de Población y Vivienda. México.
- Kamrowski, R., Limpus, C., Moloney, J., Hamann, M., 2012. Coastal Light pollution and marine turtles: assessing the magnitude of the problem. *Endang. Spec. Res* 19, 85–98. <https://doi.org/10.3354/esr00462>.
- Karska, J., Kowalski, S., Gladka, S., et al., 2024. Artificial light and neurodegeneration: does light pollution impact the development of Alzheimer's disease? *Geroscience* 46, 87–97. <https://doi.org/10.1007/s11357-023-00932-0>.
- Kocifaj, M., Kómar, L., 2016. A role of aerosol particles in forming urban skyglow and skyglow from distant cities. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 458, 438–448. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw293>.
- Kyba, C.C.M., Altıntaş, Y.Ö., Walker, C.E., Newhouse, M., 2023. Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022. *Science (1979)* 379, 265–268. <https://doi.org/10.1126/science.abq7781>.
- Kyba, C.C.M., Kuester, T., Sánchez De Miguel, A., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., Bennie, J., Elvidge, C.D., Gaston, K.J., Guanter, L., 2017. Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. *Sci. Adv.* 3, e1701528. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701528>.
- La Sorte, F.A., Horton, K.G., Johnston, A., Fink, D., Auer, T., 2022. Seasonal associations with light pollution trends for nocturnally migrating bird populations. *Ecosphere* 13, e3994. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3994>.
- Moreno-Corral, M., Costero, R., Schuste, W., 1994. High Atop the Baja, The National Observatory of Mexico. *Astronom. Soc. Pacific. Astronom. Soc. Pacific.*
- NASA, n.d. NASA's VIIRS/NPP lunar brdf-adjusted nighttime lights yearly composites ("AllAngle Composite Snow Free"). 2012–2021.
- Peregryn, M., Pénzesné Kónya, E., Falchi, F., 2020. Very important dark sky areas in Europe and the Caucasus region. *J. Environ. Manage.* 274, 111167. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111167>.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2006. Reglamento Para La Prevención De La Contaminación Lumínica En El Municipio de Ensenada, Baja California. <https://www.ensenada.gob.mx/wp-content/uploads/2021/11/Reglamento-para-la-prevencion-de-la-contaminacion-luminica-en-el-Municipio-de-Ensenada-Baja-California.pdf>.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2014. Programa de ordenamiento ecológico del estado de baja california.
- Peters, A., Verhoeven, K.J.F., 1994. Impact of artificial lighting on the seaward orientation of hatchling loggerhead turtles. *J. Herpetol.* 28, 112. <https://doi.org/10.2307/1564691>.
- Plauchu-Frayn, I., Richer, M.G., Colorado, E., Herrera, J., Córdova, A., Ceseña, U., Ávila, F., 2017. Night sky brightness at san pedro mártir observatory. *PASP* 129, 035003. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/129/973/035003>.
- Puro, E., 2019. Análisis De La Gestión De La Contaminación Lumínica En Las Adyacencias Del Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir, Municipio de Ensenada, B. C., México (Tesis (Especialidad)). Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B. C., México. <https://catalogocimarron.uabc.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=236823>.
- QGIS.org, 2023. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>.
- Riegel, K., 1973. Light pollution: outdoor lighting is a growing threat to astronomy. *Science (1979)* 179, 1285–1291. <https://doi.org/10.1126/science.179.4080.128>.
- Rodrigo-Comino, J., Seeling, S., Seeger, M.K., Ries, J.B., 2023. Light pollution: a review of scientific literature. *Anthropoc. Rev.* 10, 367–392. <https://doi.org/10.1177/20530196211051209>.
- Sánchez de Miguel, A., Bennie, J., Rosenfeld, E., Dzurjak, S., Gaston, K.J., 2021. First estimation of global trends in nocturnal power emissions reveals acceleration of light pollution. *Remote Sens* 13, 3311. <https://doi.org/10.3390/rs13163311>.
- Sanders, D., Frago, E., Kehoe, R., Patterson, C., Gaston, K.J., 2020. A meta-analysis of biological impacts of artificial light at night. *Nat. Ecol. Evol.* 5, 74–81. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01322-x>.
- Schroer, S., Huggins, B.J., Azam, C., Hölker, F., 2020. Working with inadequate tools: legislative shortcomings in protection against ecological effects of artificial light at night. *Sustainability.* 12, 2551. <https://doi.org/10.3390/su12062551>.
- Ścieżor, T., Czaplicka, A., 2020. The impact of atmospheric aerosol particles on the brightness of the night sky. *J. Quant. Spect. Rad. Trans.* 254, 107168. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107168>.

- Silva, R., Medrano, F., Tejada, I., Terán, D., Peredo, R., Barros, R., Colodro, V., González, P., González, V., Guerra-Correa, C., Hodum, P., Keitt, B., Luna-Jorquera, G., Malinarich, V., Mallea, G., Manríquez, P., Nevins, H., Olmedo, B., Páez-Godoy, J., De Rodt, G., Rojas, F., Sanhueza, P., Suazo, C.G., Toro, F., Toro-Barros, B., 2020. Evaluación del impacto de la contaminación lumínica sobre las aves marinas en Chile: diagnóstico y propuestas. *Ornitol. Neotrop.* 31, 13–24. <https://doi.org/10.58843/ornneo.v31i1.575>.
- Simons, A., Martin, K., Longcore, T., 2022. Determining the effects of artificial light at night on the distributions of Western Snowy Plovers (*Charadrius nivosus nivosus*) and California Gunion (*Leuresthes tenuis*) in southern California. *J. Coast. Res.* 38, 302–309. <https://www.jstor.org/stable/48656955>.
- Smith, M., 1979. Report and recommendations of IAU commission 50, Reports on Astronomy. *IAU Transactions XVII* 218–222.
- Solano-Lamphar, H., 2010. Medición de la contaminación lumínica en espacios naturales: propuesta de un modelo productivo (tesis doctoral). universitat politècnica de catalunya. Departament de Projectes d'Enginyeria. <https://hdl.handle.net/10803/6854>.
- Stare, J., n.d. Lightpollutionmap (v2.8.11) . <https://www.lightpollutionmap.info>.
- Tapia, M., Hiriart, D., Richer, M.G., Cruz-González, I., 2007. Site testing at San Pedro Mártir. *Revista Mexi. de Astron. y Astrof.* 31, 47–60. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57103108>.
- United Nations, 1979. Convention on long-range transboundary air pollution. <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/1979%20CLRTAP.e.pdf>.
- US Census Bureau, 2021. Census 2020. <https://data.census.gov>.
- Van Doren, B.M., Horton, K.G., Dokter, A.M., Klinck, H., Elbin, S.B., Farnsworth, A., 2017. High-intensity urban light installation dramatically alters nocturnal bird migration. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 114, 11175–11180. <https://doi.org/10.1073/pnas.1708574114>.
- Verutes, G.M., Huang, C., Estrella, R.R., Loyd, K., 2014. Exploring scenarios of light pollution from coastal development reaching sea turtle nesting beaches near Cabo Pulmo, Mexico. *Global Eco. Conser.* 2, 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2014.09.001>.

Capítulo IV: La percepción del cielo nocturno y contaminación lumínica en los asentamientos: Francisco Zarco, El Porvenir (Guadalupe) y Villa de Juárez (San Antonio de las Minas), Valle de Guadalupe, Ensenada, Baja California

4.1 Introducción

La noche ha sido históricamente percibida y valorada por la sociedad como un elemento fundamental en la regulación biológica de los seres vivos y la construcción cultural de creencias y representaciones de símbolos e ideas del cosmos. El cielo nocturno, concebido tanto como parte del paisaje como paisaje en sí mismo, ha sido fuente de inspiración para diferentes culturas, un espacio simbólico y un recordatorio de los orígenes de la humanidad. Además de su valor estético y cultural, el cielo cumple una función vital para el equilibrio fisiológico de todos los seres vivos al estar sincronizado con los ciclos naturales de luz y oscuridad que rigen los ritmos circadianos (Gallaway, 2010, Dudley, 2018; Storm *et al.*, 2022; Mudrik, 2024).

No obstante, la oscuridad natural se encuentra cada vez más perturbada por la expansión de la iluminación artificial, fenómeno que genera contaminación lumínica. Esta perturbación puede ser de diferentes tipos: deslumbramiento, sobreiluminación, invasión lumínica y, de modo más reconocible, el resplandor del cielo nocturno - brillo artificial difuso en el horizonte de zonas urbanizadas-. Alteración ambiental con consecuencias ecológicas, a la salud y culturales que afectan no sólo áreas urbanas, sino también rurales y naturales, extendiendo sus impactos más allá de las fuentes emisoras y amenazando la observación astronómica profesional (Smith, 1979; Holker, 2010; Gaston *et al.*, 2013; Bara & Lima, 2018; Sander *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2020; Meng, 2021; Bará *et al.*, 2022).

Estudios estiman que más del 80% de la población mundial vive bajo cielos contaminados lumínicamente (99% de la población de Estados Unidos y Europa) y evidencian que un quinto de la humanidad ya no puede observar la Vía Láctea desde sus hogares (Cinzano *et al.*, 2001; Falchi *et al.*, 2016, Kyba, 2017). Elevados niveles de radiancia nocturna han sido correlacionados estadísticamente con factores claves de la calidad de vida: salud, el tráfico y contaminación ambiental. Entornos con altos niveles de iluminación, muestran indicadores adversos que sugieren que la contaminación lumínica afecta el bienestar humano, el sentido de la identidad cultural e intensifica las desigualdades socioespaciales (Gill, 2023; Flies *et al.*, 2023).

Ante este panorama, es fundamental identificar y comprender las percepciones ambientales de los habitantes sobre sus entornos nocturnos, para definir las estrategias adecuadas para la toma de decisiones urbanísticas y ambientales.

4.1.1 Percepción y el cielo nocturno

Bennet (2016) define la percepción social como la “manera en que una persona observa, comprende, interpreta y valora un objeto, acción, experiencia, persona, política o resultado” (p.585). Para el entorno nocturno, esta percepción se vincula con el concepto de percepción ambiental, la cual ha sido abordada desde diferentes perspectivas:

- Como respuesta sensorial a los estímulos externos, donde ciertos fenómenos se registran mientras que otros pasan desapercibidos (Tuan, 1974);
- Como valoración subjetiva con la que cada individuo aprecia el entorno (Gallopín, 1986);
- Como el proceso activo y constructivo donde el cerebro organiza e interpreta estímulos sensoriales, integrando experiencias previas, expectativas y contexto, lo que conduce a interpretaciones únicas de la realidad (Goldstein, 2018).
- Como selección, organización e interpretación de estímulos sensoriales que configuran la experiencia del entorno (Scott & Liu, 2024).

Diversos autores han justificado la importancia del estudio y análisis de las percepciones ambientales para contribuir a la delimitación de territorios indígenas, valoración etnográfica, ambiental y la participación local en la toma de decisiones, entre otros. Es crucial considerar variables como la edad, el origen, el género, y el contexto cultural y geográfico, ya que estos factores inciden en la forma en que las personas interactúan con su entorno. En este sentido, Tuan (1974) introduce el concepto geográfico de topofilia, que describe la unión subjetiva o sentimental entre la gente y el lugar, analizable desde dimensiones temporales, espaciales y culturales.

4.1.2 Percepción y apego al cielo nocturno

El cielo nocturno posee valores ambientales, culturales y científicos. Gallaway (2010) lo reconoce como fuente de bienestar pasivo y valor instrumental que vincula al ser humano con su entorno, que otorga beneficios funcionales como orientación y navegación, descanso, recreación, espiritualidad, vínculos con el territorio y producción del conocimiento. En este sentido, posee valores tangibles e intangibles y servicios ambientales relacionados con la capacidad de regular el entorno, las características y procesos para el buen funcionamiento de los ecosistemas. En definitiva el cielo nocturno posee un importante valor social, cultural y científico, que como expresión paisajística también puede tener una valoración económica en relación con el aprovechamiento que se puede hacer con actividades de eco y astroturismo (Navarro & Salazar, 2022).

Antecedentes de los estudios de percepción y contaminación lumínica

La concepción de la luz como contaminante es reciente y poco difundida. Para la mayoría de la población, “contaminación” se asocia a residuos sólidos, emisiones industriales o plásticos, pero no con la luz artificial (Robles, 2021).

La preocupación inicial sobre la contaminación lumínica surgió en el ámbito astronómico, vinculada al impacto de la iluminación artificial sobre los observatorios astronómicos. Sin embargo progresivamente, se ha reconocido la necesidad de incorporar estudios interdisciplinarios que integren dimensiones ambientales, sociales y culturales. Aunque la literatura científica aún es incipiente, existen investigaciones recientes que integran diferentes aspectos:

- Markvica *et al.* (2019) analizaron y compararon los efectos de los diferentes tipos de iluminación utilizados en la vialidad urbana con la percepción de los usuarios del espacio público y su comportamiento de movilidad. Para ello, realizaron encuestas y observaciones en la ciudad de Viena. En los resultados de las encuestas se evidenció el efecto positivo de las LED tanto para conductores como peatones. En el comportamiento peatonal no se observaron diferencias significativas en los tipos de iluminación analizadas, salvo trayectorias peatonales más céntricas a lo largo de la acera con iluminación LED optimizada.
- Kim *et al.* (2015) evaluaron la percepción del riesgo asociado a cada uno de los tipos de contaminación lumínica y el proceso de amplificación social del riesgo en Corea, estos autores consideraron el efecto de algunas variables como confianza en el gobierno y la exposición mediática. La recolección de información se realizó mediante encuestas y entre sus hallazgos se encuentra una alta percepción de riesgo ante la intrusión lumínica y una baja confianza institucional.
- Las diferencias espaciales de la percepción de la contaminación lumínica en contextos rurales fueron analizadas por Mudrik (2024) desde una perspectiva etnoastronómica en el centro-norte de Santa Fe, Argentina. Este estudio abordó cómo la percepción del cielo nocturno y representaciones del espacio celeste son afectadas por la contaminación lumínica.
- Coogan *et al.* (2020) examinan la percepción pública de la contaminación lumínica en Irlanda y observan efectos diferenciados en las fuentes de luz artificial de las áreas urbanas y rurales. En las áreas urbanas se reportaron cielos más brillantes debido a la iluminación artificial y cambios en el comportamiento animal. En las áreas rurales los cielos eran más oscuros, las fuentes de iluminación se originan en los vecinos y reportaban que la luz nocturna afectaba su sueño.

Tabla IV-1. Actividades económicas en el Valle de Guadalupe (1 de septiembre a 20 de noviembre de 2023). Fuente: Reyes, 2024.

Actividad	Ensenada	Valle de Guadalupe
Hoteles, moteles y compartido	48	201
Restaurantes, bares y antros	225	173
Bodegas/vinícolas	11	123
Comercio y servicios	170	48
Cabañas o villas	0	86

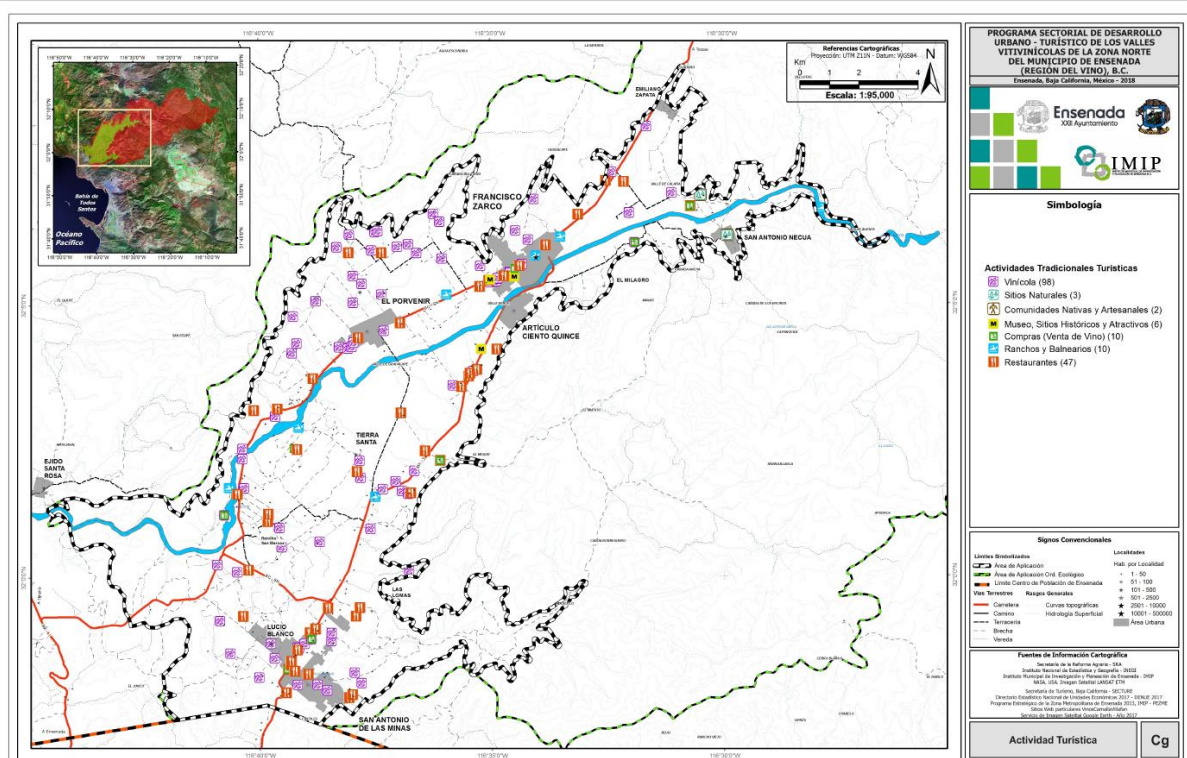


Figura IV-3. Actividades Tradicionales turísticas del Valle de Guadalupe. Fuente: IMIP (Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2018).

4.1.4 Normativa de iluminación

El Valle de Guadalupe se ubica dentro del ámbito de aplicación de las disposiciones municipales de Ensenada. En cuanto iluminación e imagen urbana destacan las siguientes:

Reglamento para la prevención de la contaminación lumínica en el municipio de Ensenada, Baja California (POEBC, 2006)

Este reglamento es de orden público y de observancia general en el ámbito del municipio de Ensenada, su objeto es:

“prevenir, reducir y evitar la contaminación lumínica que se proyecta hacia la oscuridad natural del cielo y luz intrusa en las zonas urbanas [...] ocasionada por el alumbrado público, privado y medios de publicidad que pueden afectar las investigaciones del Observatorio Astronómico Nacional establecido en la Sierra de San Pedro Mártir de este municipio [...], así como promover el ahorro y consumo eficiente en el uso de la energía eléctrica y la utilización de energías alternativas” (Artículo 1, POEBC Reforma, 2016).

Este reglamento regula toda la iluminación exterior (alumbrado público ornamental, deportivo, recreativo, estacionamientos, industrias, viviendas, seguridad y anuncios publicitarios). Si bien establece una Zona de Máxima Protección del OAN-SPM, (radio de 100 km), el Valle de Guadalupe (ubicado a 156 km del OAN) no está incluido, sólo está sujeto a las disposiciones generales. Entre sus especificaciones técnicas:

- Uso de luminarias con diseño full cut-off en el alumbrado público.
- Instalación del alumbrado público sin inclinación.
- Restricción horaria y de diseño en las instalaciones deportivas y anuncios publicitarios.
- Regulación de dispositivos como fuentes láser y faros buscadores.
- Temperaturas de color (RE) menores a 3000 K, solamente aplica para la zona de máxima protección.

Programa Sectorial de Desarrollo Urbano-Turístico de los Valles Vitivinícolas de la Zona Norte del Municipio de Ensenada (POEBC, 2018)

Este programa establece lineamientos para conservar la imagen urbana y regular la publicidad exterior en el Valle de Guadalupe, priorizando la protección del paisaje rural y vitivinícola. Normas relevantes en cuanto a los anuncios, espectaculares, publicidad y señalamientos incluye:

- En tanto no exista el reglamento que regula la imagen urbana del Valle queda prohibida la construcción de espectaculares y carteles de propaganda inscripciones o artefacto de cualquier naturaleza para fines publicitarios y se eliminarán los existentes sobre edificios y espacios públicos o privados incluyendo la que se pinte o forme con elementos naturales del territorio, tales como rocas, árboles, laderas, etcétera.
- La publicidad exterior queda limitada a mostrar información del Valle respecto a la denominación social de personas físicas o morales, asociaciones o colectivos, actividades comerciales, mercantiles, profesionales, de información general turística, culturales, recreativas y de ocio.

- La señalética que se encuentre dentro del derecho de vía de la carretera federal número 3 o carretera estatal deberá contar con el permiso y apegarse a la normatividad establecida por la SCT o del Estado, la que corresponda.
- En las carreteras el alumbrado público deberá ser limitado al estrictamente necesario y cumplir con los lineamientos del reglamento de la contaminación lumínica para el municipio de Ensenada.

Reglamento de Zonificación y Usos para el Programa Sectorial de Desarrollo Urbano-Turístico de los Valles Vitivinícolas de la Zona Norte del Municipio de Ensenada (Región del Vino), B.C. (POEBC, 2019)

En el reglamento asociado a este programa sectorial se especifica que toda la iluminación exterior deberá limitarse a lo estrictamente necesario y adecuarse a lo estipulado en el Reglamento para la prevención de la contaminación lumínica en el municipio de Ensenada, BC (2006). Asimismo, destacan las siguientes disposiciones específicas relacionadas al alumbrado exterior:

- El sistema de iluminación exterior tiene como finalidad resaltar, de su entorno durante la noche, la textura y la forma del área, estructura o monumento, favoreciendo así las condiciones de seguridad, estéticas y comerciales del lugar.
- La iluminación exterior debe dirigir su haz de luz hacia abajo y apuntando hacia el área objetivo, para maximizar la eficiencia, minimizar el número total de luminarias que produzcan la mínima perturbación de las observaciones astronómicas en la Sierra de San Pedro Mártir y disminuir la contaminación lumínica del cielo.

4.1.5 Condiciones del servicio de alumbrado público

El alumbrado en los tres asentamientos se concentra principalmente en las vías principales. Como se detalló en el Capítulo II, en el marco del Proyecto de Modernización del alumbrado público del municipio de Ensenada (2016), se sustituyeron luminarias de vapor de sodio de alta presión (VSAP) por lámparas con diodos emisores de luz (LED) y en la actualidad persisten ambos sistemas en ambas localidades.

Shaflik (1997) estimó que la iluminación vial aporta entre un 35% a 50% a la contaminación lumínica. No obstante, investigaciones recientes muestran que este porcentaje de contribución varía según la ciudad y el diseño de iluminación (tipo de luminarias, diseño, rango espectral y distribución espacial). Esto indica que la iluminación vial no constituye necesariamente la fuente predominante, ya que existen múltiples emisores de luz exterior -como letreros comerciales, proyectores, Instalaciones industriales o penitenciarias, luces de edificaciones y monumentos, sitios de alojamiento, parques, centros deportivos,

puertos, aeropuertos, entre otros- que también inciden de forma importante en el brillo artificial del cielo nocturno. Por esta razón, resulta fundamental implementar buenas prácticas de iluminación orientadas a minimizar el impacto ambiental de todas las fuentes.

En el caso del Valle de Guadalupe, se dispone de escasa información sobre ciertas fuentes puntuales utilizadas en las actividades nocturnas al aire libre, particularmente en eventos como bodas, fiestas, conciertos y otras celebraciones que pueden generar niveles significativos de emisión lumínica y contribuir de forma local al deterioro de la calidad del cielo nocturno.

Problemáticas en el Valle de Guadalupe

El Valle de Guadalupe es un objeto de investigación académica y tiene una presencia importante en los medios de comunicación locales, donde se destaca su valor paisajístico, actividad vitivinícola y diversidad sociocultural que lo potencian como un recurso turístico importante del municipio de Ensenada y del estado de Baja California.

En revisión de la prensa local (Diario El Vigía y Ensenada.net) durante los años 2024 y 2025 se visibilizan diversas problemáticas en el valle:

- Conflictos por el agua de los acuíferos
- Conflictos de uso de la tierra
- Expansión inmobiliaria con un rápido crecimiento de las actividades comerciales y de alojamiento
- Realización de eventos nocturnos no regulados
- Deficiencias del transporte público y alumbrado público.
- Incremento de la actividad delictiva.

Los reportes de noticias en la prensa local consideran que el incremento de la inseguridad es un fenómeno o problemática que trasciende horarios y se carece de lugares seguros y que esta situación afecta la actividad turística en el valle de Guadalupe (Cortez, 2025; Ramírez, 2025 en Notas de prensa local Anexo 1). Asimismo, los resultados para Baja California de la Encuesta Nacional de Victimización y Percepción sobre Seguridad Pública (ENVIPE) del INEGI (2024) subraya lo siguiente:

- Los espacios donde la población manifiesta sentirse insegura incluyen: la calle, el transporte público, la carretera, el banco y el parque o centro recreativo.
- Los lugares donde se sentían menos inseguros destacan: el centro comercial, el mercado, el automóvil, la escuela, el trabajo y su casa.

- Las acciones realizadas para mejorar la seguridad pública en su municipio o localidad incluyen: construcción/mantenimiento de parques y canchas deportivas, mejorar el alumbrado, mayor patrullaje y vigilancia policiaca, mejorar el ingreso de las familias, atender el desempleo, operativos contra la delincuencia, atención a los y las jóvenes para prevenir la delincuencia juvenil, actividades o programas para prevenir la violencia y/o la delincuencia, programas de sensibilización para que la gente denuncie y combatir el narcotráfico, entre otras.
- Entre los diferentes problemas identificados por la población de BC en primer lugar está la inseguridad (68.8%), seguido del aumento de precios (38.1%), la corrupción (32%) y en cuarto lugar, el narcotráfico (27.4%).

Ambas caras del mismo Valle (muchos de los problemas identificados son causados por el mismo éxito turístico) generan tensiones que evidencian la necesidad de estrategias integrales, con enfoques interdisciplinarios y transdisciplinarios que consideren la complejidad y las transformaciones socio ambientales de este territorio, al mismo tiempo que las percepciones de los habitantes como eje para la gestión territorial y ambiental.

Dentro de esta problemática compleja, el objetivo principal de esta investigación es identificar las percepciones de los habitantes de tres asentamientos del Valle de Guadalupe sobre el cielo nocturno, la iluminación artificial en el entorno y las normativas de protección del cielo nocturno. Estos elementos serán integrados con el análisis del brillo del cielo nocturno obtenido mediante imágenes del sensor DNB del satélite VIIRS, con el fin de relacionar los datos objetivos con la dimensión subjetiva del fenómeno.

Este tema es de relevancia considerando que en México, particularmente, no existen estudios sobre percepción lumínica en valles vitivinícolas como el Valle de Guadalupe, lo que destaca la importancia de esta investigación en una región rural en desarrollo.

4.2 Área de estudio

Para los fines de esta investigación se define como área de estudio a tres asentamientos, ubicados en la subcuenca Guadalupe del Valle de Guadalupe: el asentamiento urbano Francisco Zarco (valle de Guadalupe) y los asentamientos rurales Villa de Juárez (San Antonio de la Minas) y El Porvenir (Guadalupe) (Figura IV-4). Representan una muestra significativa de los distintos tipos de organización presentes en el Valle y permiten explorar las percepciones sobre el cielo nocturno, la iluminación artificial y la contaminación

- Cuestionarios/entrevistas estructuradas integradas por la indagación en cinco aspectos en los que se dividió el cuestionario: características sociodemográficas, relación con la iluminación pública y sus cambios, vinculación con el cielo nocturno, percepción de la contaminación lumínica, conocimiento normativo y compromisos. Incluyó preguntas abiertas y cerradas para obtener información cualitativa y cuantitativa.
- Aplicación:
 - Total de cuestionarios/entrevistas: 35 (34 cuestionarios presenciales y uno digital con Google Form). La duración del cuestionario fue de aproximadamente 15 minutos.
 - Población: residentes permanentes mayores de 18 años.
 - Periodo: abril 2024 a enero 2025.
- Validación: juicio de 3 expertos y prueba piloto (noviembre de 2023).
- Ética: consentimiento informado, anonimato, confidencialidad y uso ético de la información (Disponibles en el Anexo 3 y Anexo 4).

4.3.2 Componente cuantitativo

Este componente está detallado en el Capítulo II.

Monitoreo de radiancia:

- Imágenes satelitales VIIRS (2012-2021) a fin de evaluar los niveles de radiación nocturna en los asentamientos.
- Área focal: asentamiento urbano Francisco Zarco (identificado como “urbano” por el INEGI en función de su población mayor de 2,500 habitantes).
- Métricas: radiancia ($nW\ cm^{-2}\ sr^{-1}$) e intensidad radiante ($nW^* sr^{-1}$).
- Herramientas: QGIS, Google Earth Engine y Microsoft Excel.

4.4 Resultados y Discusión

Se presentan dos resultados obtenidos: 1) del cuestionario en el marco del estudio de percepción del cielo nocturno y, 2) el monitoreo de la contaminación lumínica en el asentamiento urbano Francisco Zarco utilizando la información satelital VIIRS.

4.4.1 Percepción del cielo nocturno

Los resultados están divididos de acuerdo con la agrupación de las preguntas relacionadas con los cuatro aspectos que fueron cuestionados, además de las características sociodemográficas: relación con la iluminación pública y sus cambios, vinculación con el cielo nocturno, percepción de la contaminación lumínica, conocimiento normativo y compromisos.

4.4.1.1 Características sociodemográficas de los entrevistados (Tabla IV-2)

Se aplicaron 35 cuestionarios, de los cuales el 40% se realizaron en El Porvenir, 37% en Francisco Zarco y 23% en San Antonio de las Minas. El perfil destacado:

- Género: predominio femenino (74%)
- Grupos etarios: mayor concentración en 31-50 años (51.5%)
- Educación: 62.9% con educación básica y secundaria, con una baja proporción de personas con estudios universitarios o de posgrado
- Diversidad étnica: 20% se identificó como parte de un grupo indígena de diferentes áreas de la República Mexicana: P'urhépechas (adyacencias de Paracho y costa de Michoacán), Triquis (Oaxaca) y Zoques.

Estos datos contextualizan las percepciones en una población adulta, mayoritariamente femenina, multiétnica, pluricultural y con heterogeneidad educativa.

Tabla IV-2. Características sociodemográficas. Fuente: elaboración propia.

Características	Clasificación	El Porvenir	Francisco Zarco	San Antonio de Las Minas	Total general
	Tipo de Asentamiento*	Rural	Urbano	Rural	
Género	Femenino	n=13 (37.1%)	n=9 (26%)	n=4 (11.4%)	26 (74.3%)
	Masculino	n=1 (2.7%)	n= 4 (11.4%)	n= 4 (11.4%)	9 (25.7%)
Total general		40.00%	37.14%	22.86%	35 (100%)
Edad	18 – 25	0.0%	2.9%	2.9%	5.7%
	26 – 30	8.6%	0.0%	0.0%	8.6%
	31 – 40	14.3%	5.7%	2.9%	22.9%
	41 – 50	11.4%	11.4%	5.7%	28.6%
	51 – 60	2.9%	11.4%	0.0%	14.3%
	61 – 70	2.9%	5.7%	8.6%	17.1%
	> 70	0.0%	0.0%	2.9%	2.9%
Total general		40.0%	37.1%	22.9%	100.0%
Educación	Primaria	14.3%	14.3%	0.0%	28.6%
	Primaria trunca	0.0%	0.0%	5.7%	5.7%
	Secundaria	14.3%	11.4%	2.9%	28.6%
	Preparatoria	8.6%	2.9%	2.9%	14.3%
	Estudiante universitario	0.0%	0.0%	2.9%	2.9%
	Universitaria	0.0%	2.9%	5.7%	8.6%
	Posgrado	0.0%	2.9%	2.9%	5.7%
	Sin estudios	2.9%	2.9%	0.0%	5.7%
Total general		40.0%	37.1%	22.9%	100.0%
Miembro de grupo indígena	No	28.57%	31.43%	20.0%	80%
	Si	11.43%	5.71%	2.86%	20%
Total general		40.00%	37.14%	22.9%	100%

4.4.1.2 Relación con la iluminación pública y sus cambios

En este análisis vinculamos las preferencias y experiencia con la iluminación pública en los lugares de residencia. Está asociado con las preguntas sobre el tipo de iluminación pública o color de la luz y cómo se siente con el tipo de iluminación actual.

Los residentes reconocen en la iluminación pública un sistema mixto con presencia de luz amarilla de sodio a alta presión (37.1%), luz blanca de LED (34.3%) y fluorescente (3%). También reportan que algunos sectores no presentan alumbrado público (20%) y otros no saben qué tipo de iluminación existe (5.7%). En el alumbrado público se reportan la

ausencia de cambios (46%), desconocimiento de algún cambio (20%) y diferentes cambios (4%) entre los que se destacan los siguientes:

- Aumento de número de lámparas y cambio de tecnología de luz amarilla a blanca en el alumbrado público desde hace tres a cuatro años en El Porvenir.
- Cambio de tecnología de luz amarilla a blanca y la instalación de un poste hace aproximadamente tres meses. Convivencia de un sistema mixto de iluminación mixto con luz amarilla y blanca LED en Francisco Zarco.
- Inicio de la iluminación pública en 1990, un cambio importante hace 7 años (posiblemente hace referencia al proyecto de modernización del alumbrado público del año 2016) y hace dos años se incrementó el número de postes de alumbrado público. Destacan la que ya se observa iluminación en la carretera principal del pueblo y en los camellones con un incremento de la iluminación en las calles, al igual que la presencia de algunos anuncios luminosos privados en San Antonio de las Minas.

Asimismo, reconocen como responsable del servicio de iluminación pública al municipio de Ensenada, aunque se reportó la existencia del servicio privado en El Porvenir (Guadalupe) y Francisco Zarco. En cuanto a la evaluación del servicio de iluminación pública el 51.43% lo consideró de insuficiente a poco, 37.14% suficiente y 11.43% no lo evaluó porque no existe alumbrado público en el sector que habita.

Las expresiones de la percepción de los pobladores para el alumbrado público se pueden agrupar en las categorías bien, más o menos y deficiente.

- Bien: “Buena”, “Bien en donde existe”, “Buena en donde existe”, “Suficiente”, “Un poco más buena que mala”, “Falta la luz cuando llueve”.
- Más o menos: “Del parque bien, oscuro en la colonia”, “Ni tan buena”, “Hay tramos oscuros cerca de la escuela Rebsamen”, “Término medio”.
- Deficiente: “Mala”, “Escasa”, “No hay iluminación”, “No existe alumbrado público”.

En líneas generales podemos resumir la percepción con las expresiones: “Buena en algunas calles porque está bien iluminada”, “suficiente donde existe, deficiente en mi sector” (porque no posee alumbrado público, nota de la investigadora). Esta consideración de alumbrado público se reafirma en la identificación de los lugares más iluminados del sector, donde destacan las vías/calles principales (Benito Juárez, Tercera de Francisco Zarco, entrada a San Antonio de las Minas), el centro o cuadrícula urbana, lugares con restaurantes y negocios (iluminadas por seguridad privada), campo deportivo El Porvenir (Guadalupe) cuando hay juego, algunas colonias (Atardecer en El Porvenir, Mixteca en

San Antonio de las Minas), el parque de El Porvenir, las calles más cercanas a la vía principal, algunas calles (Ágata y Aguas marinas).

Considerando las áreas identificadas y las características de la iluminación pública, la percepción de cómo se sienten con el sistema de iluminación reportadas de los habitantes se agruparon en las categorías bien (54%), inconforme/insegura (40%) y no contestó (5.71%). Destacan las siguientes percepciones (Figura IV-5):

- Bien: “Bien, segura”, “Bien con seguridad”, “Conforme”, Segura/Seguro. Las razones de estas apreciaciones están relacionadas con que “todos se conocen”, “Más confiado”, “Seguro porque soy de aquí”, “No salgo de noche”, “Seguro en la calle principal”
- Inconforme/insegura: “Bien, pero a unas calles les falta iluminación”, “Debe mejorar un poco más hacia dentro, en calles no pavimentadas”, “Depende de la calle”, “En la calle hay muy poca iluminación”, “Estaría conforme si hubiera iluminación en las calles”, “Falta un poco en el centro”, “Hace falta iluminación”, “Hace falta un poco más de luminarias, las lámparas son amarillas y no alumbran tanto”, “Insatisfecha”, “Insegura/inseguro”, “Insegura, no hay mucha iluminación”, “inseguro para salir de noche”, “podría mejorar especialmente donde no hay. Inseguro”



Figura IV-5. Percepción de la iluminación pública. Elaboración propia con la aplicación <https://wordart.com/>

Entre las zonas menos iluminadas destacan la periférica urbana (calles secundarias) descritas por las personas consultadas como las laterales, a orillas del centro urbano, hacia adentro del centro urbano, las casas que están a las orillas, el arroyo y sus adyacencias, el cerro y sus adyacencias y las zonas más rurales (rancherías). Específicamente los sitios destacados son los siguientes:

- Francisco Zarco: arroyo, calle 17, calle segunda, adyacencias a la tienda Castro, puente, calles pegadas al cerro.
- San Antonio de las Minas: calle cerca de la colonia Mixteca, calle Guillermo Prieto, calles aledañas a la Delegación, calles con tránsito (detrás de la principal).
- El Porvenir: última calle, calles alrededor y lejos del centro, por el parque viejo y el panteón, el parque.

Al preguntar específicamente acerca de si considera que la seguridad mejoraría con mayor iluminación, el 77.14% de las personas consultadas respondió afirmativamente, el 17.14% considera que no y el 5.71% lo considera probable. Adicionalmente, las personas reportaron la coincidencia entre los sitios identificados como de mayor iluminación con los sitios en donde se percibe mayor seguridad (calles principales, el centro y algunas colonias). Estas afirmaciones coinciden con la literatura que plantea que la seguridad está asociada a una mayor iluminación (Chalfin *et al.*, 2017; Gill, 2023; Cadena-Urzúa *et al.*, 2025).

Adicionalmente, los entrevistados describieron otras características de los lugares donde se sienten más seguros, entre las que se destacan además de la iluminación, la presencia de vigilancia y la circulación de personas. Un ejemplo es el parque de El Porvenir (Guadalupe) donde a pesar de la poca iluminación, su ubicación frente a la delegación (oficina local de policía municipal) genera mayor percepción de seguridad en algunos pobladores. Otras descripciones fueron: "Donde hay más luz y más personas", "Calle principal por la iluminación y la continua vigilancia", "El parque porque está la delegación", "Francisco Zarco está más alumbrado".

En contraste, otras personas reportaron no sentirse seguras en ningún lugar, incluyendo sus hogares debido a los tipos de actividades delictivas en el entorno y que incluye el secuestro de personas, actividades reseñadas en la prensa local y por algunos pobladores: "Ninguno. Me levantaron el hijo en casa (de noche)", "Ya no hay lugar seguro más que en la casa y quien sabe con tanta cosa que pasa".

Expresiones similares se encontraron con relación a los lugares con menos iluminación y los lugares donde perciben más inseguridad, ya que se considera que la seguridad mejoraría debido a las siguientes razones: "Donde está oscuro. Sin luz hay más posibilidad

de inseguridad”, “En donde no hay alumbrado público hay vandalismo”, “En los menos iluminados (han ocurrido robos)”, “En todos lados. La luz moviliza la gente, si hay luz hay más tránsito (de personas, nota de la investigadora)”.

Asimismo algunos pobladores consideran en la seguridad otros aspectos relacionados con la naturaleza del delito y la vigilancia pública, por ejemplo: “No hay relación de la inseguridad y la ausencia de luz”, “Mejoraría la seguridad con mayor número de policías y mayor vigilancia”, “Porque no hay robos en la calle, ni asaltos. Hay delitos de organizaciones delictivas”, “Se requiere más seguridad pública”, “Hay asesinatos hasta de día”, “Porque la inseguridad es muy alta”. Estas afirmaciones de los habitantes coinciden con los reportes de seguridad oficiales (INEGI, 2024) y las noticias en la prensa local acerca del Valle de Guadalupe (notas de prensa de Cortez, 2025; Ramírez, 2025 en Anexo 3), en las que se expresa un incremento de la inseguridad y que genera una percepción de ausencia de lugares seguros en algunos pobladores.

Estos hallazgos contradicen la afirmación inicial de que a mayor iluminación mayor percepción de seguridad y reducción de la criminalidad (Chalfin *et al.*, 2017; Gill, 2023; Cadena-Urzúa *et al.*, 2025) lo cual podría estar relacionado a las características adicionales seguridad. Además, si se considera la realidad mexicana en lo que respecta a la tipología de los delitos e impunidad para realizarlos, amerita otros enfoques en esa materia (por ejemplo, los secuestros o “levantamientos” ocurren con más frecuencia que lo reportado por las autoridades oficiales, a cualquier hora y lugar, incluyendo los hogares. Al respecto un residente expresó en El Porvenir (Guadalupe) que a pesar de la poca iluminación en el parque, lo percibe seguro porque está frente a la delegación policial.

En líneas generales los pobladores perciben y valoran el sistema de iluminación pública de su sector como insuficiente, sin mayor variación entre los asentamientos rurales y urbanos. A diferencia de los resultados obtenidos por Coogan *et al.* (2020) acerca de la ubicación geográfica (urbano o rural) influye en cómo las personas perciben la contaminación lumínica y sus efectos. Posiblemente, este resultado se debe a que el asentamiento urbano Francisco Zarco es un núcleo relativamente pequeño enmarcado en un gran contexto rural y dónde la iluminación pública es deficiente, con el mismo tipo de funcionamiento y distribución en los tres asentamientos, destacando sólo la iluminación parcial de las vías principales. Lo mismo aplica para las pantallas de iluminación las cuales son casi inexistentes y se reporta apenas un par en la vía principal de entrada a San Antonio de las Minas.

En cuanto a cómo perciben y valoran los pobladores los cambios en la iluminación pública y su sector, destaca la poca referencia al plan masivo de modernización del alumbrado

público de Ensenada del año 2016 donde se incluyó la sustitución de algunas luminarias en el Valle de Guadalupe, principalmente vapor de sodio a alta presión por LED. Algunos recuerdan los cambios/sustituciones en el alumbrado público de hace tres y siete años, lo cual podría coincidir con labores de mantenimiento, ya que la empresa a la cual se le concesionó el alumbrado público del municipio recurrentemente se le llamaba la atención por las fallas en el sistema de iluminación tal como fue presentado a nivel público en los medios de comunicación local.

Es importante destacar que el sistema de iluminación pública del municipio de Ensenada ha sido concesionado en dos momentos: la primera, en el año 2016 en el marco del proyecto de modernización del alumbrado público en el que se emprendió un plan masivo de sustitución del alumbrado público de sodio de alta presión por LED que incluyó principalmente las calles principales de los asentamientos.

El segundo a finales del año 2024, con el inicio de la sustitución del alumbrado público en algunos sectores y la colocación de nuevas luminarias públicas en vías principales de acceso. Por lo tanto, la evaluación del alumbrado público por parte de los pobladores coincide con los pocos cambios que se realizaron en el año 2016 y está estrechamente relacionado con los problemas persistentes con el servicio de alumbrado público prestado por la empresa a la que se le otorgó la licitación para ese momento y que fue tema recurrente, público y comunicacional en la prensa regional.

4.4.1.3 Vinculación con el cielo nocturno

En esta sección se realizaron varias preguntas para indagar la existencia de la vinculación de los habitantes con la observación del cielo nocturno a partir de sus experiencias de observación sin iluminación artificial, emociones y recuerdos que despierta la observación del cielo nocturno.

La experiencia de observar el cielo nocturno sin iluminación señala una actitud positiva de los habitantes ante esta actividad, reflejada en los adjetivos valorativos estéticos y emocionales para describir su belleza “el cielo aquí todavía se ve bonito” y “de niño me gustaba ver las estrellas”. Adicionalmente, se reconoció y se logró diferenciar la observación del cielo nocturno sin contaminación lumínica.

El cielo nocturno genera en los observadores sentimientos y emociones de admiración, belleza, serenidad, paz, tranquilidad, comunicación trascendental y espiritual. El cielo nocturno natural es considerado como un agujero negro donde se pueden observar las cosas,” se miran más de cerca las estrellas” y “es muy bonito”, que “sorprende”, “permite observar todo” y los hace sentir a “gusto”. Además les permite vincularse con la naturaleza

escuchando coyotes y otros animales. También resaltan sus dinámicas de cambio que son evidentes porque distinguen a la distancia “algo brillante con un domo de luz” y la diferencia de oscuridad las áreas rurales y “en las grandes ciudades la contaminación no te deja observar las estrellas”.

Con respecto a la pregunta de si les gustaba observar en el cielo nocturno, el 11% manifestó que no le gustaba porque “Casi no salgo”, “No veo muy bien de noche” y “Me da miedo salir” (Figura IV-6). Por otro lado, el 89% manifestó que entre los aspectos que le gusta observar en el cielo nocturno destacan las estrellas, la luna y los satélites (Figura IV-7).

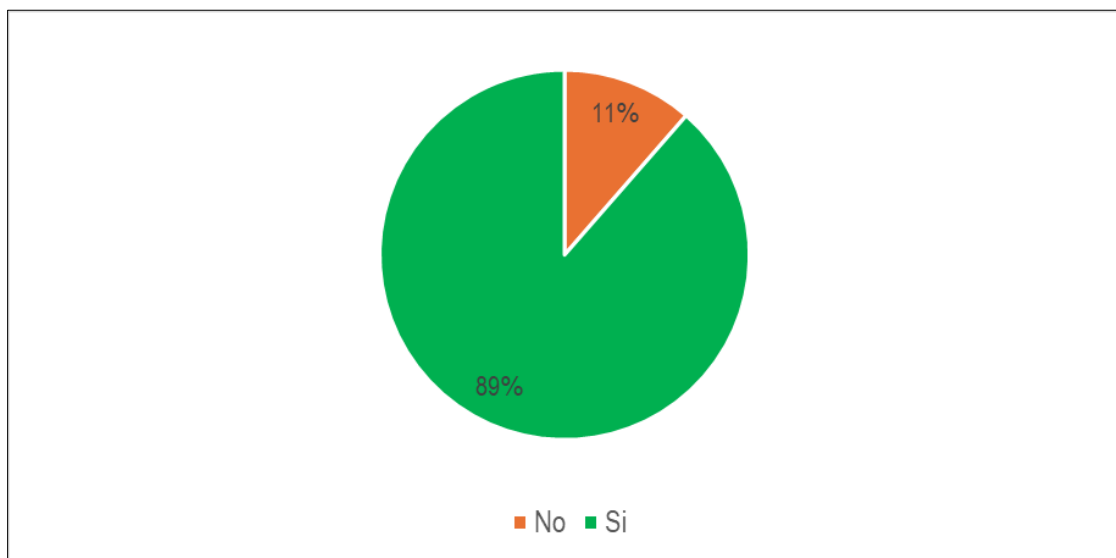


Figura IV-6. Preferencia por observar en cielo nocturno. Elaboración propia



Figura IV-7. Elementos del cielo nocturno observables por la población. Elaboración propia con aplicación Microsoft Word

Las descripciones de las sensaciones y emociones de las habitantes asociadas a la observación del cielo nocturno revelan palabras con una carga espiritual, emocional y estética. Los habitantes mencionaron sentimientos como paz, tranquilidad, admiración, felicidad y asombro. También surgen expresiones de gratitud, nostalgia, placer y reflexión existencial, además de una percepción estética de lo bonito o majestuoso del cielo. En algunos casos, se asocia esta experiencia con lo divino o con recuerdos personales generando una conexión casi familiar con el entorno nocturno (Figura IV-8).



Figura IV-8. Sensaciones y emociones que genera la observación del cielo nocturno. Elaboración propia con información de los cuestionarios

4.4.1.3.a Recuerdos asociados a la observación del cielo nocturno

Además de las emociones expresadas, la observación del cielo nocturno también evoca a los habitantes recuerdos personales y colectivos vinculados con la infancia, la vida familiar, las costumbres tradicionales y experiencias estéticas. Estos recuerdos constituyen una dimensión temporal y afectiva que genera una conexión simbólica con el paisaje nocturno.

Muchas anécdotas remiten al momento de convivencia familiar donde mirar el cielo era parte de actividades cotidianas o lúdicas. Algunos ejemplos incluyen:

- Acostarnos en el zacate a observar y contar estrellas para ver quien contaba más.
- Mi familia acostada en el suelo observando el movimiento del tráfico en el cielo”.
- Reunión familiar para contemplar el cielo.
- Veo a mi nieto en las estrellas.
- Armonía familiar, charla, misterio

- Ver las estrellas con mi familia.
- Mi infancia, cuando no había tanta contaminación lumínica en la Ciudad de México.

Estos recuerdos no solo se refieren a la práctica de la observación, sino que integran emociones positivas como armonía, sentirse a gusto, paz, romance, amor familiar y comunicación con Dios. También aparecen menciones a experiencias particulares, como ver estrellas fugaces, observar el cielo desde un mirador con la familia o asistir al Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir.

- “Recordar a mis padres y abuelos: comíamos afuera, fogatas (alumbradas) en San Antonio de las Minas”.
- “Mi infancia aquí y ver el cielo nocturno del valle. Convivencia con la familia observando las estrellas”.
- “Cuando era novia, veíamos estrellas”.
- “Muchos. Cuando estoy en comunicación con Dios”.

Otras anécdotas recuerdan vivencias extraordinarias como haber presenciado la lluvia de estrellas o incluso la caída de un meteorito. Estas anécdotas están ligadas a la experiencia sensorial del cielo, el trabajo de campo y en las condiciones rurales que facilitan la observación sin contaminación lumínica. “Fuimos al mirador de Mazatlán con la familia. Vimos estrellas fugaces”, “Buscar o velar el viejito para ver donde nace el año nuevo”.

4.4.1.3.b Recuerdos del cielo nocturno de personas de origen indígena

Los testimonios de personas de origen indígena también muestran una alta sensibilidad hacia el cielo nocturno, donde los recuerdos personales, la valorización del entorno natural y la dimensión espiritual están fuertemente entrelazadas.

Un hombre P’urhépecha recordó su primera experiencia observando el cielo nocturno sin contaminación lumínica en un rancho, donde asoció el cielo a la nostalgia de su niñez.

Una mujer Triqui expresó “Que todo es más bonito” y señaló que el cielo nocturno es importante porque si desaparece no podríamos mirarlo.

Una informante de P’urhépecha (Michoacán) compartió: “Mi familia se acostaba en el suelo a ver las estrellas”, lo que le generaba sensaciones de tranquilidad, relajamiento y sueño. Valoró positivamente la observación sin contaminación lumínica, describiéndola como una experiencia muy bonita y que se observaba todo. Considera que el paisaje nocturno es importante y debe ser protegido porque es algo que le gusta.

Un hombre de origen P'urhépecha relató vivencias de su observación relacionadas con su trabajo en el campo y su infancia, incluyendo una lluvia de estrellas en El Porvenir (Guadalupe) y la caída de un meteorito en el Valle de Guadalupe, recordando con detalle eventos que ocurrieron hace más de cinco décadas. Observa “todo lo que se ve en el cielo”, “Mirar cómo caminan las estrellas y se apagan, tranquilidad. No tengo palabras”. Además destacó el vínculo entre el cielo y la vida silvestre: “Es importante para la diversidad de animales: tejones, zorros, conejos. “Protegerla para afectar lo menos posible el planeta”.

Un hombre procedente de P'urhépecha (costa) recuerda: “Mis padres cuando hacían fogatas a la orilla de la playa en Michoacán y veía el cielo, el mar”. Con relación a la sensación de observar el cielo nocturno le da “gusto verlo”. Considera que el cielo nocturno “es importante porque es distracción, saber conocer, debe ser protegido”.

Una mujer que se identifica indígena su recuerdo asociado al cielo nocturno en la belleza “se ve muy bonito”, en cuanto a la experiencia de observar el cielo nocturno considera que dónde vive (un rancho) se ve mucho mejor que allí (El Porvenir).

Estos recuerdos revelan que la observación del cielo nocturno está profundamente arraigada en la memoria afectiva, los vínculos familiares, la vida rural y las prácticas tradicionales, destacando como la etnoastronomía enriquece la comprensión del cielo nocturno (Mudrik 2024). También permite identificar un sentido de pertenencia al territorio así como una valorización del paisaje nocturno como parte integral del entorno natural y cultural. En el caso de los pueblos originarios se evidencia una conciencia ecológica y un sentido de responsabilidad hacia la conservación del cielo nocturno.

Los entrevistados manifestaron que el paisaje nocturno es importante y debe ser protegido; se resalta su valor como paisaje en sí mismo y la estética de éste, su valor biológico, recreacional por aportar relax para disfrutar tiempo libre tanto a nivel personal como familiar, estético, cultural, familiar, espiritual y como fuente de conocimiento.

Los resultados muestran diversas relaciones de los individuos con los cielos nocturnos oscuros destacando las estrellas los astros y sus dinámicas. Adicionalmente, reportan la observación de nuevos objetos en el cielo cómo son las constelaciones de satélites artificiales. Ello adiciona, nuevas interpretaciones, percepciones y representaciones del espacio celeste, coincide con algunos planteamientos de Mudrik (2024), al reflexionar y cuestionar sobre la categoría de patrimonio establecido por la UNESCO para privilegiar la conservación estática y sin cambios. Sin duda, la presencia de la contaminación lumínica y la nueva dinámica satelital plantea una nueva dinámica en la observación de los rasgos del cielo nocturno.

La experiencia de la observación de los cielos oscuros nos brinda vinculaciones con la belleza y placeres pasivos, como plantea Gallaway (2010), nos aporta beneficios y bienestar al conectarnos y vincularnos con la belleza misma y con el entorno. Esta experiencia y valor es afectada por la contaminación lumínica colocándolos algunos dilemas éticos sobre el progreso y la preservación de la belleza natural para nuestro bienestar y conexión con el entorno. Las respuestas obtenidas en los 3 asentamientos independientemente del origen de los recuerdos (familiares, amorosos, filosóficos, religiosos) o el sencillo placer de la contemplación de la belleza natural, es afectada por la contaminación lumínica. Una forma de preservación de esos placeres pasivos es la protección del cielo nocturno.

4.4.1.6 Percepción de la contaminación lumínica

El 66% de las personas declararon no conocer el término “contaminación lumínica”, pero el 34% ofreció definiciones intuitivas acertada cómo: “luces que producen daño”, “demasiada luz que impide ver el cielo”, “es lo que mata el cielo y no te deja ver las estrellas”, “la luz de las ciudades que se refleja en el cielo”. "Debido al exceso de iluminación no podemos observar eclipses y estrellas fugaces. Porque hay contaminación lumínica hay que ir a lugares lejanos, lugares oscuros para observar la Vía Láctea".

Las ideas expresadas por los pobladores para definir la contaminación lumínica son las siguientes:

- Cuando hay muchas luces y no se puede ver el cielo
- Donde no se ve
- Contaminación por exceso de luces en un sitio
- Exceso de luz
- Con más luz ya no se puede observar el cielo
- Afecta al Observatorio astronómico San Pedro Mártir
- Demasiada luz que impide apreciar el cielo
- Es lo que impide ver con claridad el cielo nocturno
- Que hay demasiada luz, como en la ciudad con anuncios y letreros (no conocen el cielo de noche)
- Toda contaminación que afecta el ambiente

4.4.1.7 Conocimiento normativo y compromisos

El 89% de las personas consultadas reportó desconocer la existencia de alguna norma y sólo el 9% reportó que tal vez existe una Norma Oficial Mexicana sobre el tema (NOM). Al preguntar específicamente por el conocimiento del Reglamento para la Prevención de la

Contaminación Lumínica en el Municipio de Ensenada y su contenido el 94% lo desconoce y el 6% no sabe o no contestó.

No obstante, el 49% de las personas propusieron acciones concretas para mitigar la contaminación lumínica, las cuales se agruparon en cuatro categorías relacionadas con:

a) Regulaciones a través de “reglamentación que permita medir la iluminación municipal en anuncios y eventos” y que a su vez sea respetada, “Eliminar focos que hacen mal”;

b) Cambio de hábitos de consumo en los hogares con un uso responsable y moderado de la iluminación: “Limitar que la intensidad de la luz para que sea suficiente”, “Apagar los focos que nunca se apagan... todo el día prendidos”;

c) Diseño urbano y tecnologías en la iluminación pública cumpliendo con un rango espectral, orientación e intensidad de un sistema de alumbrado público ecológico y eficiente: “Sensores de movimiento como en Michoacán”, Restringir el tipo de luces (colores), “Iluminar hacia abajo (pantallas) para que no se distribuya la luz a los lados”, “Que no hubiera tantas luces”, “Reducir las luces para que no estén tan fuertes”;

d) Cambio de hábito en los establecimientos comerciales:” En la ciudad apagar las luces de los negocios cuando están cerrados”, “Eliminar los excesos de iluminación de los Oxxo y otros”, “No hubiese tantos letreros iluminados. Horarios de funcionamiento”;

e) Sensibilización ciudadana y formación técnica: “Conciencia en hogares, eliminar uso excesivo de la luz en el alumbrado”, “Conocer cómo dirigirla, saber de qué manera se aprovecha y perjudica”, “Estudios para bajar la intensidad a la luz. Sería más ahorrativo”.

Estos aspectos se complementan con la pregunta de los compromisos que estaría dispuesto a adquirir para disminuir la contaminación lumínica en su colonia, en la cual el 51% de los participantes planteó acciones orientadas a:

Cambio de hábitos de consumo en los hogares con un uso responsable y moderado de la iluminación: “ Usar la luz cuando es necesario y cambiar focos”, “Apagar focos en horarios”, “... la luz de afuera”, “No encender tantas luces, encender sólo cuando se utiliza”, “Bajar la intensidad a la luz”

Este contexto nos muestra el grado de compromiso que presentan los ciudadanos en el Valle de Guadalupe, al respecto de la iluminación y los problemas que pudiera generar, planteando alternativas que están a su alcance para mitigar/ reducir el problema entre las que se destacan” Disminuir los focos afuera de las casas en donde exista alumbrado público al frente” y “Alumbrado público con luces que no dañen el cielo”.

Sin embargo, la responsabilidad del alumbrado público y por tanto el del cumplimiento de sus características ecológicas y eficientes es del municipio de Ensenada, en concordancia

con la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y considerando las propuestas del Comité Técnico para la aplicación del reglamento de prevención de la contaminación lumínica. Normas que no se cumplieron en el proyecto de modernización del alumbrado público de 2016 (Puro, 2019). En cuanto al proyecto de modernización del alumbrado público iniciado a finales del año 2024, si bien se ha cambiado la temperatura de color de las luminarias, algunas muestras una elevada intensidad (nota de la autora con base en las instalaciones realizadas en Ensenada).

4.4.2 Monitoreo de la radiancia con imágenes VIIRS: asentamiento urbano

Francisco Zarco (Valle de Guadalupe)

El monitoreo de la radiancia con imágenes satelitales VIIRS revela patrones distintivos en el asentamiento urbano Francisco Zarco (Valle de Guadalupe). A pesar de que el polígono urbano definido por el INEGI (2020) abarca una superficie relativamente pequeña (2.73 km²). El área ha experimentado un crecimiento poblacional acelerado y una rápida ocupación del espacio, lo que lo convierte en uno de los focos de transformación territorial más significativos del municipio de Ensenada y del Estado de Baja California durante el periodo considerado.

El análisis conjunto de la radiancia y la intensidad permite observar una tendencia de aumento sostenido de ambos indicadores. La radiancia presenta una fase de aceleración particularmente marcada entre 2015 y 2018, y supera por primera vez los 10 nW cm⁻² sr⁻¹ en 2020, lo que representa un umbral importante reportado en los estudios de contaminación lumínica (Falchi *et al.*, 2016, Kyba, 2015). Esto es un umbral se considera como pérdida significativa de la visibilidad estelar.

Entre 2014 y 2021, Francisco Zarco presenta un incremento del 59% de las radiancias, el más alto registrado en el municipio de Ensenada. Este crecimiento está posiblemente relacionado con la expansión en la actividad turística, mejoras en la infraestructura vial y el aumento de instalaciones comerciales y habitacionales (Tabla IV-3, Figura IV-9 y Figura IV-10).

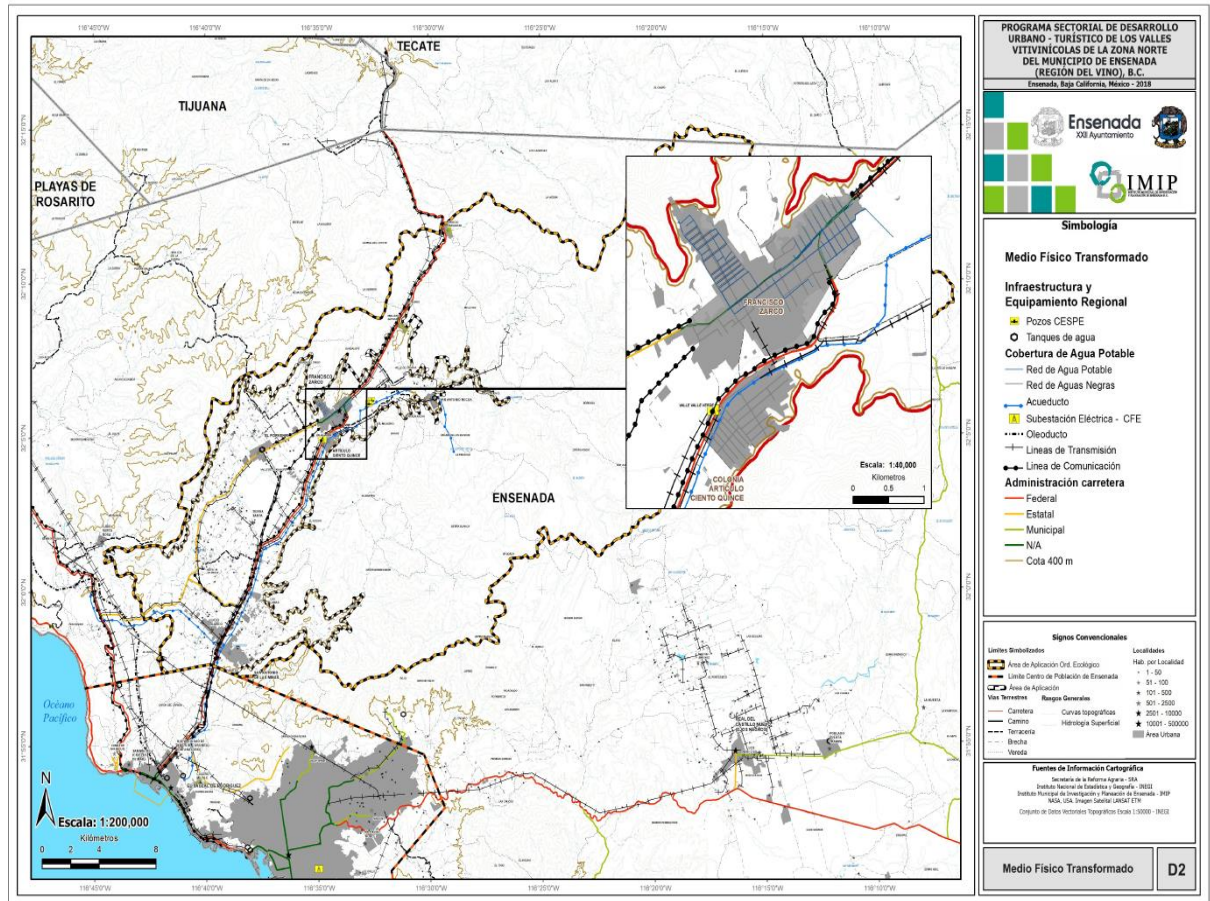


Figura IV-9. Asentamiento urbano Francisco Zarco en el Valle de Guadalupe. Fuente: IMIP (Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2018).

Tabla IV-3. Radiancia e intensidad anual en Francisco Zarco (2012-2021). Fuente: elaboración propia con imágenes VIIRS.

Año	Radiancia ($nW\ cm^{-2}\ sr^{-1}$)	Intensidad ($*10^{12}nW.sr^{-1}$)
2012	6.950	0.1900
2013	6.922	0.1892
2014	6.872	0.1878
2015	7.598	0.2077
2016	8.551	0.2338
2017	9.341	0.2554
2018	9.628	0.2632
2019	9.586	0.2620
2020	10.202	0.2789
2021	11.043	0.3019

El aumento celebrado de la radiancia e intensidad radiante implica una pérdida progresiva de la visibilidad del cielo nocturno, fenómeno que puede pasar desapercibido debido al entorno rural adyacente, pero que sin duda afecta a procesos ecológicos sensibles a la luz artificial.

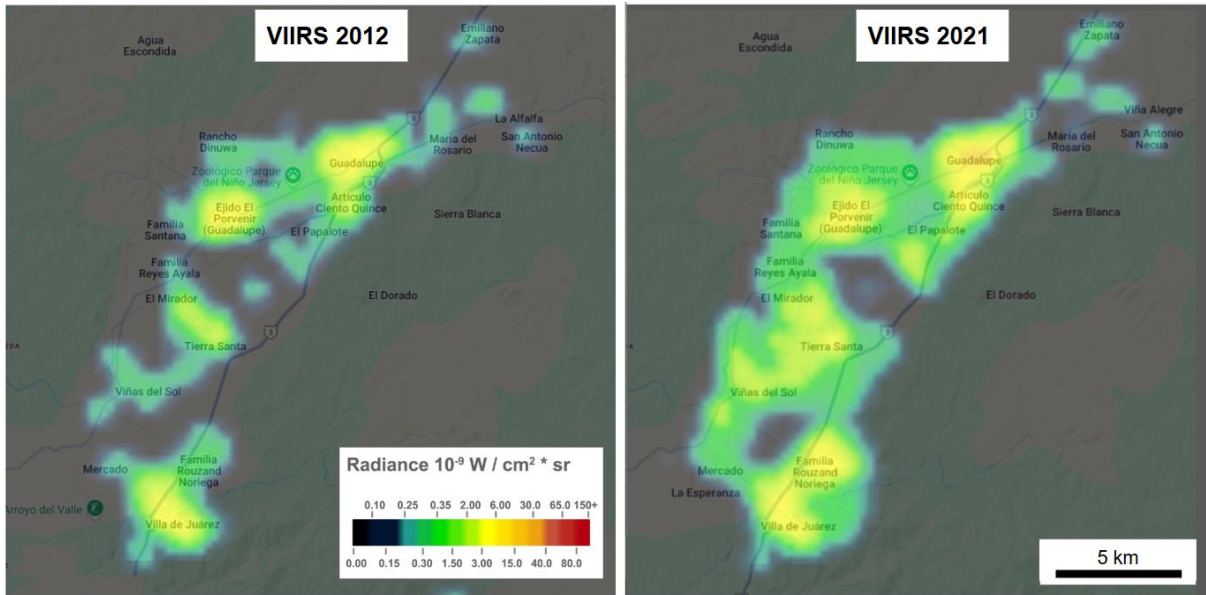


Figura IV-10. Cambios en la radiancia 2012-2021. Fuente: imágenes VIIRS de <https://www.lightpollutionmap.info/>

Estos asentamientos están incluidos en dos áreas de importancia:

- 1) Ubicarse en el área de influencia del Parque Nacional Constitución de 1857.
- 2) Está sujeto al ámbito de aplicación del Reglamento para la Prevención de la Contaminación Lumínica en el municipio de Ensenada (2006), lo cual les otorga relevancia normativa en términos de protección del cielo nocturno.

4.5 Conclusiones sobre la percepción de la contaminación lumínica

El análisis conjunto de los datos de radiancia, intensidad lumínica y percepciones de los habitantes de Francisco Zarco, El Porvenir (Guadalupe) y Villa de Juárez (San Antonio de las Minas) confirma que el aumento cuantitativo de la contaminación lumínica es perceptible en el cuadrante urbano de los centros poblados. Para la observación del cielo nocturno oscuro, es necesario desplazarse a los entornos rurales que todavía persisten en el Valle de Guadalupe. Este panorama nos presenta un entorno con transformaciones espaciales del paisaje nocturno y desigualdad en el acceso y disfrute del entorno nocturno.

Desde la gestión territorial este análisis proporciona un punto de partida herramientas para:

- Diseñar estrategias que promuevan un alumbrado ecológico, eficiente y menos invasivo
- Proponer el reconocimiento y la incorporación de áreas diferentes al OAN en las futuras modificaciones del Reglamento de Prevención de la Contaminación Lumínica del Municipio de Ensenada y otras normas y leyes relacionadas. Ya que representan la diversidad ambiental y cultural del estado que ameritan ser protegidas ampliando el texto normativo existente.
- Proponer zonificaciones lumínicas que consideren las necesidades urbanas, las áreas de conservación y los territorios rurales en desarrollo.

En cuanto a la percepción social, la población mantiene un fuerte vínculo emocional con el cielo nocturno en las historias familiares, añoranzas compartidas y creencias culturales que subrayan su valor simbólico.

Se identificó un desconocimiento generalizado de la normativa de alumbrado lo cual es preocupante ante la combinación de tres factores: los datos satelitales de aumento de la iluminación en el asentamiento urbano Francisco Zarco, un incremento de las actividades delictivas y un incremento de las actividades nocturnas que pueden llevar a una pérdida del cielo nocturno. Ello implica perder su condición de sitio privilegiado para la observación astronómica y la preservación del medio ambiente sano.

4.6 Referencias

- Bará, S. & Lima, R., 2018. Photons without borders: quantifying light pollution transfer between territories. *International Journal of Sustainable Lighting* 20, 51–61. <https://doi.org/10.26607/ijsl.v20i2.87>
- Bará, S., Bao-Varela, C., & Falchi, F. (2022). Light pollution and the concentration of anthropogenic photons in the terrestrial atmosphere. *Atmospheric Pollution Research*, 13(9), 101541. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101541>
- Bará, S., & Falchi, F. (2023). Artificial light at night: A global disruptor of the night-time environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 378(1892), 20220352. <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0352>
- Bekele, W. & Ago, F. (2022). Sample Size for Interview in Qualitative Research in Social Sciences: A Guide to Novice Researchers. *Research in Educational Policy and Management*, 4(1), 42-50. <https://doi.org/10.46303/repam.2022.3>
- Bennett, N. (2018). Using perceptions as evidence to improve conservation and environmental management. <https://doi.org/10.1111/cobi.12681>
- Coogan, A., Cleary-Gaffney, M., Finnegan, M., McMillan, G., González, A. & Espey, B. (2020). Perceptions of Light Pollution and its Impacts: Results of an Irish Citizen Science Survey. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 17. 5628. [10.3390/ijerph17155628](https://doi.org/10.3390/ijerph17155628).
- Cortés, D. (04 de abril de 2025). Welcome to Baja... Y a encomendarse a Dios. *Diario El Vigía*. <https://www.elvigia.net/columnas/2025/4/4/welcome-to-baja-encomendarse-dios-467009.html>
- Chalfin, A., Hansen, B., Parker, L., & Lerner, J. (2017). *The Impact of Street Lighting on Crime in New York City Public Housing* [Program/ Project Evaluation]. <https://www.ojp.gov/library/publications/impact-street-lighting-crime-new-york-city-public-housing>
- Espejel, I. (7 de septiembre de 2022). Salvemos el escaso suelo fértil del Valle de Guadalupe. *Nexos*. <https://bit.ly/3St6yqN>
- Falchi, F., & Bará, S. (2023). Light pollution is skyrocketing. *Science*, 379(6629), 234-235. <https://doi.org/10.1126/science.adf4952>
- Gagik, T., Hernández, M., Ochoa, J., 2016. Astroclimatic characterization of Vallecitos: A candidate site for CTA at San Pedro Mártir. *Astronomical Society of the Pacific*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1601.02383>
- Gallaway, T. (2010). On light pollution, passive pleasures, and the instrumental value of beauty. *Journal of Economic Issues*, 44(1), 71-88. <https://doi.org/10.2753/JEI0021-3624440104>
- Gaston, K. J., Bennie, J., Davies, T. W., & Hopkins, J. (2013). The ecological impacts of nighttime light pollution: A mechanistic appraisal. *Biological Reviews*, 88(4), 912-927. <https://doi.org/10.1111/brv.12036>
- Gill, S. (2023). Illuminate: Relationship Between Light Pollution, Quality of Life, and Innovation in Selected US Cities. *International Journal of Social Science Research and Review*. 6(4), 629-637. <https://ijssrr.com/journal/article/view/1140>
- Hölker, F., Moss, T., Griefahn, B., Kloas, W., Voigt, C., Henckel, D., Hänel, Kappeler, Völker, Schwöpe, Franke, Uhrlandt, Fisher, Klenke, Wolter, & Tockner. (2010). The dark side of light: A transdisciplinary research agenda for light pollution policy. *Ecology and Society*, 5(4), 13. <https://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss4/art13>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2020. *Censo de Población y Vivienda 2020. México*
- INEGI (2024). Encuesta Nacional de Victimización y Percepción sobre Seguridad Pública (ENVIPE) 2024. Principales resultados Baja California. Septiembre 2024 <https://www.inegi.org.mx/programas/envipe/2024/>
- Kim, K. Choi, J., Lee, E. et al. A study on the risk perception of light pollution and the process of social amplification of risk in Korea. *Environ Sci Pollut Res* 22, 7612–7621 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4107-5>
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-015-4107-5>
- Kyba, C. C., Pritchard, S. B., Ekirch, A. R., Eldridge, A., Jechow, A., Preiser, C., ... & Straw, W. (2020). Night matters—why the interdisciplinary field of “Night Studies” is needed. *J*, 3(1), 1-6. <https://doi.org/10.3390/j3010001>
- Marchant, P. & Norman, P. (2022). To determine if changing to white light street lamps improves road safety: A multilevel longitudinal analysis of road traffic collisions during the relighting of Leeds, a UK city. *Applied Spatial Analysis and Policy*. 15. 1-26. [10.1007/s12061-022-09468-w](https://doi.org/10.1007/s12061-022-09468-w).
- Marchant, P. (2010). What is the contribution of street lighting to keeping us safe? An investigation into a policy, *Radical Statistics*, 102, <https://www.radstats.org.uk/journal.102>.
- Markvica, K., Richter, G., & Lenz, G. (2019). Impact of urban street lighting on road users' perception of public space and mobility behavior. *Building and Environment*, 154, 32-43. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.009>
- Moreno-Corral, M., Costero R., and Schuster, W. (1994). High Atop the Baja, The National Observatory of Mexico. *Astronomical Society of the Pacific*, (January-February 1994).
- Mudrik, A. (2024). “Contaminación lumínica y su percepción en contextos rurales del centro-norte de Santa Fe, Argentina”. *Cosmovisiones/Cosmovisões* 5 (1): 65-75. DOI: <https://doi.org/10.24215/26840162e004> Recibido: 20/04/2023, aceptado: 16/05/2024.
- Navarro, J. & Salazar, S. (2022). El valor de un cielo estrellado. Una aplicación del método de Valoración Contingente y una revisión bibliográfica
- Nucamendi, A., Bringas-Rábago, N., Verduzco, B. (2023). Conflictos socioterritoriales en el Valle de Guadalupe, Baja California, México: Un acercamiento desde las redes de confianza. *Frontera norte*, 35, 1-25. <https://doi.org/10.33679/rfn.v1i1.2347>
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2006). Reglamento para la prevención de la contaminación lumínica en el Municipio de Ensenada, Baja California. Publicado en el Periódico Oficial del Estado de Baja California el 29 de septiembre de 2006.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2017). Reforma a diversos Artículos del Reglamento para la prevención de la contaminación lumínica en el Municipio de Ensenada, Baja California. Publicado en el Periódico Oficial del Estado de Baja California el 03 de febrero de 2017. http://legismex.mty.itesm.mx/estados/ley-bcn/BC-RM-Ensenada-PrevConLum-Dec2017_02.pdf
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2018). Actualización del Programa Sectorial de Desarrollo Urbano-Turístico de los Valles Vitivinícolas de la Zona Norte del Municipio de Ensenada. Publicado en el Periódico Oficial del Estado de Baja California el 14 de septiembre de 2018. <https://imipens.org/caja-1/psduvvzne/>
- Periódico Oficial del Estado de Baja California (2019). Reglamento de Zonificación y Usos para el Programa Sectorial de Desarrollo Urbano-Turístico de los Valles Vitivinícolas de la Zona Norte del Municipio de Ensenada (Región del Vino), BC. Publicado en el Periódico Oficial del Estado de Baja California el 13 de diciembre de 2019. N° 61.

j/https://imipens.org/wp-content/uploads/2024/04/20191213_Reglamento_PSDUTVVZNME.pdf

- Plauchu-Frayn, I., Richer, M.G., Colorado, E., Herrera, J., Córdova, A., Ceseña, U., Ávila, F., 2017. Night Sky Brightness at San Pedro Mártir Observatory. *PASP* 129, 035003. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/129/973/035003>
- Ramírez, L. (18 de marzo de 2025). Continúa la búsqueda de joven desaparecido. *Diario El Vigía*. <https://www.elvigia.net/general/2025/3/18/continua-la-busqueda-de-joven-desaparecido-465395.html>
- Robles, J. (2022). The Evolution of light pollution using measurements of night sky brightness and color in Madrid [Universidad Complutense de Madrid]. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/3680>
- Sandelowski, M. (1995). Sample size in qualitative research. *Research in Nursing & Health*, 18(2), 179-183. <https://doi.org/10.1002/nur.4770180211>
- Sanders, D., Frago, E., Kehoe, R., Patterson, C., & Gaston, K. J. (2020). A meta-analysis of biological impacts of artificial light at night. *Nature Ecology & Evolution*, 5(1), 74-81. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01322-x>
- Scott, N. & Liu, B. (2024). Sensation and Perception. En N. Scott, B. Moyle, A. C. Campos, L. Skavronskaya, & B. Liu, *Tourism Social Science Series* (pp. 59-72). Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/S1571-504320240000027006>
- Shaflik, C. (2007). Light pollution. Environmental effects of roadway lighting. Technical paper prepared for CIVL 582- Transportation Engineering.
- Silva, R., Medrano, F., Tejada, I., Terán, D., Peredo, R., Barros, R., Colodro, V., González, P., González, V., Guerra-Correa, C., Hodum, P., Keitt, B., Luna-Jorquera, G., Malinarich, V., Mallea, G., Manríquez, P., Nevins, H., Olmedo, B., Páez-Godoy, J., ... Toro-Barros, B. (2020). EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA SOBRE LAS AVES MARINAS EN CHILE: DIAGNÓSTICO Y PROPUESTAS. *Ornitología Neotropical*, 31(1), 13-24. <https://doi.org/10.58843/ornneo.v31i1.575>
- Smith, M., 1979. Report and recommendations of IAU commission 50, Reports on Astronomy. *IAU Transactions XVIIIA* 218–222.
- Steinbach, R., Perkins, C., Tompson, L., Johnson, S., Armstrong, B., Green, J., Grundy, C., Wilkinson, P., & Edwards, P. (2015). The effect of reduced street lighting on road casualties and crime in England and Wales: Controlled interrupted time series analysis. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 69(11), 1118-1124. <https://doi.org/10.1136/jech-2015-206012>
- Tapia, M., Hiriart, D., Richer, M.G., Cruz-González, I., 2007. Site testing at San Pedro Mártir. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* 31, 47–60. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57103108>

4.7 Anexos

Anexo 1: Notas de prensa local

Archivo de noticias

Ver Noticias de Última hora

el Vigía

viernes 1 de Agosto 2025 10:05 Hs.

El Vigía en tu e-

EDICIÓN IMPRESA

Síganos 9°

AFN POLÍTICO

Welcome to Baja... Y a encomendarse a Dios

Por Dora Elena Cortés

f t a

GENERAL

Continúa la búsqueda de joven desaparecido

Familiares de Ángel Torres García, de 26 años, quien fue visto por última vez la noche del 24 de agosto de 2024, han descrito la indiferencia de las autoridades de dar seguimiento al caso



GENERAL

Por Luis Miguel Ramírez/EL VIGÍA

martes, 18 de marzo de 2025

PRINCIPAL

Ejecutan a hombre en poblado El Porvenir

Desconocidos armados dispararon contra un sujeto apodado "El Diablo", quien alcanzó a llegar a una clínica, pero no logró sobrevivir



GENERAL

Por César Córdova

sábado, 18 de enero de 2025 · 00:48



911



Por César Córdova

martes, 26 de noviembre de

911

Ejecutan a hombre en Francisco Zarco

El cuerpo de la víctima asesinada a balazos fue encontrado en calles de la zona vinícola; en otro hecho, en la colonia 17 de abril hirieron de bala a un varón



Paramédicos indicaron que la víctima tenía heridas de bala en la cabeza.

911

Por Redacción Periodico El Vigia

viernes, 22 de noviembre de 2024 · 02:14

Archivos de noticias

Ver Noticias de Última hora

el Vigia

viernes 1 de Agosto 2025 11:55 Hs.

Síguenos 9° GENERAL EL VALLE META DEPORTIVA NACIONAL EL MUNDO VIDA MIRADA

Columnas Suscripciones Suplementos Clasificados ENLAMIRATV Sab

PRINCIPAL

Instalarán cámaras en el valle de Guadalupe



Humberto Valdés Romero, preside la Fetraex...

GENERAL

Por Redacción Periodico El Vigia
lunes, 4 de noviembre de 2024 · 00:46

Redacción/El VIGÍA
Valle de Guadalupe, B. C.

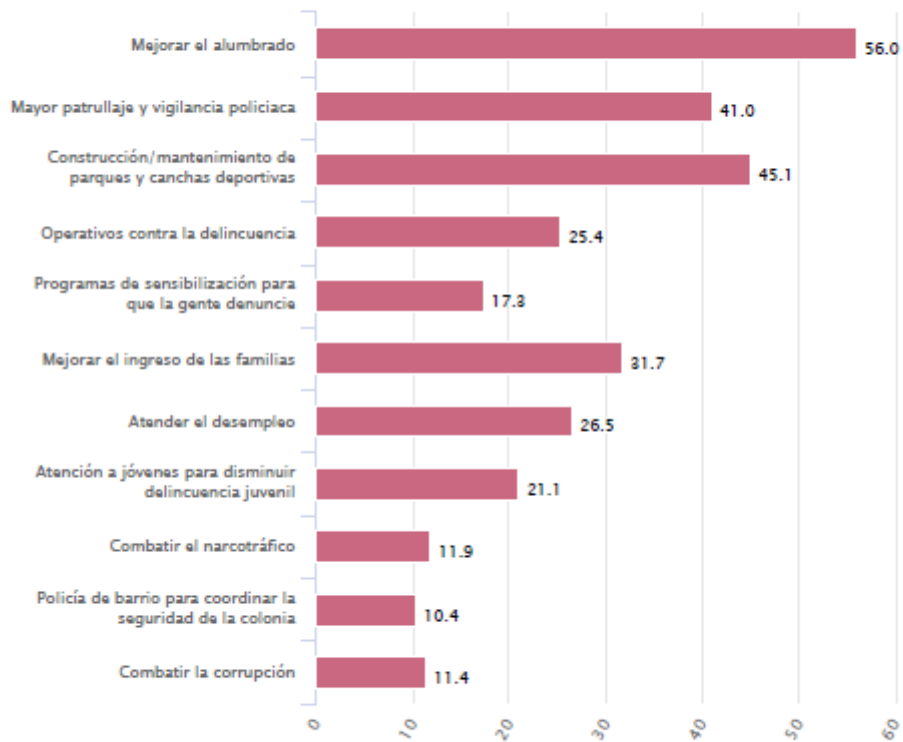
Reunidos el director de Seguridad Pública Municipal, Álvaro Alba Urías, y representantes del sector empresarial del Valle de Guadalupe, se definieron varias estrategias para reforzar la seguridad en la zona. informó Humberto

Anexo 2:

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)

Fecha de consulta: 01/08/2025 19:15:01

Porcentaje
2023



Fuente:
Encuesta Nacional de Victimización y Percepción sobre Seguridad Pública (ENVIPE)
(/programas/envipe/2024/)

Anexo 3: Cuestionario

Este instrumento forma parte de una investigación del doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo de la UABC para el estudio de la percepción social de la contaminación lumínica asociada a la observación de los cielos oscuros y la iluminación pública. La información recabada solo se usará con fines académicos, agrupada y con su consentimiento y siguiendo el código de ética de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Se anexa el consentimiento firmado.

Cuestionario de la percepción social de la contaminación lumínica y la iluminación pública		
Localidad		Fecha
Tipo de localidad: Urbana Rural		Entrevistador:
N°	Características	Clasificación
Aspectos descriptivos/sociodemográficos		
1	Si Ud. se identifica como parte de un grupo indígena indique cual	
2	Género	Masculino
		Femenino
		No binario
		Prefiero no decirlo
3	Edad	18 a 25 años
		26 a 30 años
		31 a 40 años
		41 a 50 años
		51 a 60 años
		61 a 70 años
		mayor de 70 años
4	Educación	Primaria
		Secundaria
		Preparatoria
		Estudiante universitario
		Universitaria
		Posgrado
5	¿A qué se dedica? ¿Cuál es su oficio?	
6	¿Dónde realiza Ud. su trabajo o actividad principal?	
7	¿Cómo se traslada Ud. a sus actividades?	Caminando
		Bicicleta
		Transporte público
		Vehículo personal
		Taxi

8	¿En qué sector/colonia vive?	
9	¿Cómo es el sector donde vive?	Rural Urbana
10	¿Cómo es la calle de su sitio de residencia?	Pavimentada_____ Tierra/terracera____
11	¿Con cuáles servicios públicos cuenta el lugar donde vive?	Transporte público
		Agua: Pipa____ Pozo____ Tubería____
		Electricidad
		Drenaje
		Recolección de residuos
		Alumbrado público____ Funciona: Sí____ No____
		Clínicas de salud/Consultorio
		Seguridad Pública: Soldados____ ¿Con qué frecuencia brinda el servicio?
		Vigilancia de patrullas ¿Con qué frecuencia brinda el servicio?
		Caseta policial/Delegación ¿Con qué frecuencia brinda el servicio?
Relación con la iluminación pública y sus cambios		
12	¿Cómo es la iluminación pública en la colonia donde vive?	Luz blanca
		Luz amarilla
		Otra
		No existe____ No sabe____
13	¿Cómo ha cambiado el alumbrado público de su colonia?	¿Dónde? ¿Cuándo?
14	¿Quién proporciona la iluminación en su calle?	Municipio____ Privada____
15	¿Cómo evalúa el servicio de iluminación pública en su colonia de residencia?	Suficiente
		Deficiente Poco
		No existe
16	¿Por qué considera así su evaluación al servicio de iluminación pública?	
17	¿Cuáles son los lugares más iluminados de su colonia?	
18	¿Cuáles son los lugares menos iluminados de la colonia?	
19	¿Cómo se siente usted con el sistema de iluminación pública?	Seguro____ Inseguro____
20	¿Considera usted que la seguridad mejoraría con mayor iluminación?	Si
		No
		¿Dónde?

21	¿En qué lugares de su colonia se siente más seguro? ¿Por qué?	
22	¿En qué lugares de la ciudad se siente más inseguro? ¿Por qué?	
23	¿Cuál color de la iluminación para los espacios públicos le parece mejor?	Amarilla
		Azul
		Blanca
		Otra
24	¿En qué lugares de la ciudad observa iluminación comercial y ornamental? ¿En qué horarios funciona?	
25	¿La iluminación comercial y ornamental es visible en el interior de su casa? ¿Le causa alguna molestia? ¿En qué forma?	
Conocimiento del cielo nocturno		
26	¿Qué le gusta observar en el cielo nocturno?	
27	¿Qué sensaciones o emociones le genera observar el cielo nocturno?	
28	¿Qué recuerdos tiene Ud. Relacionados con el cielo nocturno?	
29	¿Ha tenido Ud. la oportunidad de observar el cielo nocturno sin iluminación? ¿Cómo fue la experiencia?	
30	¿Le gustaría observar el paisaje nocturno? ¿Qué observaría?	
31	Por favor, mencione algún lugar que considere adecuado para observar el paisaje nocturno	
32	¿Considera Ud. que el paisaje nocturno es importante? ¿Por qué?	
33	¿Considera Ud. que el cielo nocturno puede ser contaminado?	Si _____ No _____ No sabe ____
34	¿Cuáles considera Ud. son los contaminantes del paisaje nocturno?	
35	¿Cuáles de esos contaminantes pueden ser observados a distancia?	

36	¿Sabe Ud. que es la contaminación lumínica?	Si. ¿Qué es para ti? No
37	¿Ha tenido Ud. alguna experiencia con la contaminación lumínica?	Si Exceso de iluminación Deslumbramiento Luz externa entrando a su casa Otra No Exceso de iluminación Deslumbramiento Luz externa entrando a su casa Otra
38	¿A que seres vivos considera Ud. afecta la contaminación lumínica?	Personas Aves___ ¿Cuál? Murciélagos Insectos_____ ¿Cuáles? Otro
39	¿Qué sugiere Ud. para disminuir la contaminación lumínica?	
40	¿Qué podría hacer Ud. para disminuir la contaminación lumínica?	
Conocimiento de la normativa existente		
41	¿Considera Ud. que el paisaje nocturno natural debe ser protegido?	No___ Si___ ¿Por qué?
42	¿Conoce Ud. alguna norma para la prevención de la contaminación lumínica?	Si ___ ¿Cuál? No
43	¿Conoce Ud. la normativa para la prevención de la contaminación lumínica en el municipio de Ensenada?	Si No
44	¿Conoce Ud. el contenido de la norma?	Si No
45	¿En caso de organizar alguna actividad sobre el tema le gustaría participar?	Si____ No_____
46	¿Cómo le contactamos?	
47	¿Qué propondría Ud. para mejorar el paisaje nocturno en el Valle de Guadalupe?	

¡Gracias!

Anexo 4: Consentimiento informado

Ensenada, Baja California, México, a ____ de ____ de 2025

CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

Yo, _____, fui convocado (a) para ser entrevistado (a) como parte del estudio: percepción social de la contaminación lumínica asociada a la observación de los cielos oscuros y la iluminación pública, realizado por Elvis Evelyn Puro Coa, estudiante del doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo de la Universidad Autónoma de Baja California.

Se me explicó cuál es el interés en invitarme a participar, así como detalles sobre el manejo de la información que brindé a través de una entrevista realizada el día _____, donde se abordaron distintas temáticas relacionadas con mi conocimiento y percepción de la contaminación lumínica, paisaje nocturno y cielos oscuros.

Declaro estar de acuerdo con que el interesado utilice la información brindada únicamente con fines académicos, la que será manejada de manera profesional, confidencial y sin ningún tipo de lucro.

Es de mi conocimiento que mi participación no es obligatoria y puedo abandonar la entrevista cuando así lo considere y que estoy en libertad de solicitar información adicional, así como los resultados derivados de mi participación en este estudio.

Extiendo la presente para los fines que al interesado convengan.

Nombre y firma de la persona entrevistada

Capítulo V: Conclusiones generales

El análisis de la contaminación lumínica en Baja California basado en datos satelitales del sensor VIIRS (2012-2021), permitió evaluar y caracterizar, por primera vez, la contribución municipal como fuente de contaminación lumínica, sus patrones de radiancia en la región, su impacto en las áreas naturales protegidas y la percepción social del fenómeno. Los hallazgos obtenidos muestran el carácter multidimensional del problema con implicaciones ambientales, tecnológicas, sociales y culturales.

Respecto al primer objetivo, se identificaron tendencias espaciales y temporales que confirman un crecimiento sostenido en los niveles de iluminación artificial directamente vinculado al desarrollo urbano y demográfico, con posibles impactos ecológicos y transfronterizos. Los principales hallazgos incluyen:

- **Patrones de intensificación y expansión:** la contaminación lumínica en Baja California presenta patrones de expansión acelerada y creciente intensidad radiante para el periodo 2012-2021. Se ha detectado un aumento progresivo de la radiancia nocturna en municipios como Tijuana, Playas de Rosarito y Mexicali, este incremento se correlaciona con el crecimiento demográfico y la expansión de la infraestructura urbana, lo que establece una relación directa entre desarrollo urbano y contaminación lumínica. Estos incrementos son relevantes, ya que a pesar de las limitaciones del sensor VIIRS para captar ciertos espectros propios de las tecnologías LED, constituye un claro indicativo de que realmente se están incrementando las fuentes de iluminación. Además, es observable el resplandor urbano que se origina por las continuidades luminosas transfronterizas, como el corredor Rosarito-Tijuana-San Diego y el eje Mexicali-Imperial Valley.
- **Municipios con mayor contribución:** el análisis de la radiancia revela que los municipios con mayor impacto lumínico son aquellos con mayores densidades urbanas y actividades económicas nocturnas prominentes. A nivel estatal, destaca Tijuana como el epicentro de la contaminación lumínica en la región, seguido por Mexicali. Estos hallazgos permiten establecer una jerarquización de los municipios según su contribución al fenómeno y aportando información para la planeación y gestión del territorio.

En el segundo objetivo, los resultados mostraron que las emisiones de luz que se originan principalmente en los centros urbanos se extienden y afectan a las áreas naturales distantes, particularmente los parques nacionales Sierra San Pedro Mártir y Constitución de 1857. Ello implica medidas para prevenir el impacto ecológico de la contaminación lumínica. Es necesario:

- Fortalecer la gestión estatal y municipal en el control de los proyectos de modernización de alumbrado público para que se ajusten a los marcos normativos vigentes. Un ejemplo es la evaluación del municipio Ensenada en 2016, donde la tecnología instalada no cumplía con los requerimientos espectrales establecidos en la reglamentación. Además, el continuo incremento y expansión de la iluminación compromete la implementación de propuestas de iluminación ecológica y eficiente que se intenta fortalecer mediante la LGEEPA.
- Actualizar los reglamentos para la prevención de la contaminación lumínica existentes a fin de incorporar una perspectiva que incluya la conservación ambiental.
- Implementar zonificaciones y regulaciones en materia de iluminación artificial tanto estatales como municipales para proteger la variedad de áreas estratégicas de conservación de ecosistemas y especies migratorias costeras y marinas, así como en áreas de valor astronómico, en territorio con o sin estatus de áreas naturales protegidas.
- Fortalecer la colaboración binacional en el diseño de políticas de mitigación coordinadas en el marco de los acuerdos de la ONU (1979) acerca del efecto transfronterizo de la contaminación ambiental.

En relación con el tercer objetivo, los estudios de percepción social revelaron que:

- Existe una valoración cultural, emocional y espiritual del cielo nocturno, vinculado a actividades de observación de astros, la estética del paisaje y la contemplación del universo. Aunque se reconoce su importancia para la seguridad, movilidad y estética urbana, existe un bajo nivel de conocimientos sobre sus efectos negativos en la salud, el ambiente y calidad del paisaje nocturno.
- Desconocimiento de la existencia de iniciativas para la protección de los cielos oscuros.
- Notable incremento de la intensidad lumínica en el asentamiento Francisco Zarco de un 59% para el periodo 2012-2020, asociado al crecimiento turístico, la vitivinicultura y la realización de eventos. Estos valores afectan significativamente la región con una importante oferta turística basada en la valorización del paisaje.

Este estudio enfrenta algunos desafíos como: escasez de mediciones terrestres, la falta de sensibilidad del instrumento satelital VIIRS a las señales espectrales en el azul, poca disponibilidad de inventarios actualizados de alumbrado público. A ello debemos sumar las dificultades para realizar trabajos de campo diurno y nocturno, por la creciente inseguridad en la zona y durante el periodo de levantamiento de campo. Ello afectó directamente a la

investigadora y la aplicación de entrevistas y cuestionarios, monitoreo de contaminación lumínica y alumbrado público.

Se recomienda la implementación efectiva de las políticas de iluminación establecidas en las normativas para la prevención de la contaminación lumínica en los municipios del Estado de Baja California. Es necesario incorporar aquellos municipios que no cuentan con regulación, promover la aprobación de la norma regulatoria en elaboración por la oficina la ley del cielo y la SEMARNAT, y asignar mayores recursos presupuestales a los municipios responsables del seguimiento, control y aplicación de la norma del cielo.

Futuras investigaciones deberían integrar el uso de imágenes satelitales multiespectrales como el SDGSAT o estación espacial internacional. Adicionalmente, establecer redes de colaboración académica binacional para ampliar la cobertura de las mediciones.

En conclusión, esta investigación proporciona un avance en la comprensión de la problemática y proporciona una línea base científica para la gestión integral de la contaminación lumínica en Baja California.