

Radiancia nocturna y desigualdad lumínica en Ciudad Juárez–El Paso: una lectura regional transfronteriza

Nighttime Radiance and Light Inequality in Ciudad Juárez–El Paso: A Cross-Border Regional Analysis

Vladimir Hernández Hernández*

 <https://orcid.org/0000-0003-0206-9768>

César Fuentes Flores**

 <https://orcid.org/0000-0002-7224-5723>

Recibido: 23 de agosto de 2025. Aceptado: 5 de marzo de 2026. Liberado: 9 de abril de 2026.

* Autor para correspondencia. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte. Av. del Charro no. 450 Nte., Col. Partido Romero, C.P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. vladimir.hernandez@uacj.mx

** El Colegio de la Frontera Norte, Departamento de Estudios Urbanos y del Medio Ambiente. Av. Insurgentes 3708, Fraccionamiento Los Nogales, C.P. 32350, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. cfuentes@colef.mx



RESUMEN

Objetivo: analizar la radiancia nocturna para describir desigualdades lumínicas en la frontera Ciudad Juárez–El Paso. Metodología: a partir de una serie temporal mensual de imágenes satelitales (2013–2023) se aplicaron técnicas de suavizado y estudio espacial para evaluar patrones de radiancia asociados a distintos usos del suelo y gradientes centro–periferia. Resultados: evidencian contrastes significativos de radiancia entre zonas industriales, comerciales y residenciales, así como efectos divergentes tras la pandemia por COVID-19 y cambios en su distribución geográfica. Limitación: no se incorporan variables socioeconómicas directas. Valor: se introduce la radiancia nocturna como un insumo para la investigación urbana en Latinoamérica con datos modestos, ofreciendo un marco metodológico transferible. Conclusiones: la radiancia nocturna, procesada estratégicamente, permite representar flujos ciudadanos y brechas estructurales a escala regional.

■ **Palabras clave:** radiancia nocturna; región transfronteriza; análisis espacial.

ABSTRACT

Objective: To examine how nighttime radiance can be used to describe light inequalities in the Ciudad Juárez–El Paso cross-border area. Methodology: Based on a monthly time series of satellite imagery (2013–2023), smoothing techniques and spatial analysis were applied to evaluate radiance patterns associated with land use categories and center–periphery gradients. Results: The research reveals significant radiance contrasts across industrial, commercial, and residential areas, as well as divergent effects following the COVID-19 pandemic and shifts in their geographical distribution. Limitation: Although the study does not incorporate direct socioeconomic variables. Value: The article presents nighttime radiance as an input for analysis in Latin American settings with limited data, offering a transferable methodological framework. Conclusions: Strategically processed nighttime radiance can represent urban dynamics and structural gaps at the regional scale.

■ **Keywords:** Nighttime radiance; Cross-Border region; Spatial analysis.

Citar como: Hernández Hernández, V., y Fuentes Flores, C. (2026). Radiancia nocturna y desigualdad lumínica en Ciudad Juárez–El Paso: una lectura regional transfronteriza. *región y sociedad*, 38, e2046. <https://doi.org/10.22198/rys2026/38/2046>



INTRODUCCIÓN

Este artículo propone una lectura regional de la conurbación Ciudad Juárez, México y El Paso, Estados Unidos a través del análisis de imágenes satelitales de radiancia nocturna obtenidas por el Radiómetro de Imágenes en el Infrarrojo Visible, Banda Día/Noche (VIIRS-DNB, por sus siglas en inglés), destacando su valor como indicador exploratorio para identificar heterogeneidades espaciales asociables a desigualdades lumínicas en contextos transfronterizos. La propuesta combina herramientas de teledetección con un enfoque geográfico orientado a interpretar contrastes regionales en infraestructura, planificación y acceso a servicios. Este estudio no se limita al aspecto técnico, también se adentra en lo que aquí se denomina una epistemología de la radiancia nocturna, entendida como un marco interpretativo que concibe los patrones de luz y oscuridad como huellas espaciales de procesos sociales, económicos y políticos. Se formula, esta perspectiva teórica mediante la siguiente proposición: la radiancia nocturna permite observar patrones de continuidad/discontinuidad de infraestructura y actividad nocturna (nodos, corredores y gradientes), pero no identifica por sí misma mecanismos socioeconómicos o institucionales, cuyo análisis requiere una verificación posterior.

En este sentido, la huella lumínica nocturna que miden los satélites, cuando se procesa de manera estratégica, se convierte en un recurso analítico capaz de representar flujos urbanos y mostrar brechas territoriales potenciales a escala regional. Al mismo tiempo, ofrece una vía para reconocer fracturas —contradicciones— de ciudades separadas por fronteras, aunque unidas por dinámicas geográficas comunes.

Las imágenes obtenidas mediante el sensor VIIRS-DNB han demostrado su utilidad en el análisis de contextos urbanos donde los datos censales o administrativos son escasos o se encuentran desactualizados (Levin et al., 2020). En áreas fronterizas como la de Ciudad Juárez–El Paso, la radiancia nocturna permite observar su expansión, pero también visibiliza la desigualdad. Contribuyen a identificar contrastes en la dotación de infraestructura, diferencias socioeconómicas y patrones dispares de inversión pública (Pandey, Brelsford y Seto, 2022; Staudt y Vera, 2006).

A diferencia de otras regiones metropolitanas, los núcleos urbanos en la frontera enfrentan retos analíticos adicionales: distintos marcos normativos, niveles asimétricos de planeación y contrastes drásticos en sus tejidos. Este trabajo se suma a esfuerzos recientes que utilizan las imágenes VIIRS-DNB como *proxy* (indicador indirecto) para explorar no solo expansión de las localidades, sino también la segregación espacial y disparidades territoriales (Rueda-Espinosa, Guerrero-Guio, Vargas-Dominguez, Vinasco-Téllez y Goez-Théran, 2023; Doria, Amaral y Monteiro, 2016). En la región de Ciudad Juárez y El Paso, coexisten zonas industriales



de alta radiancia con asentamientos periféricos de baja intensidad lumínica nocturna, constituye un caso paradigmático de urbanización desigual y fronteriza.

La radiancia nocturna no puede entenderse únicamente como resultado de la infraestructura; puede leerse, desde un enfoque complementario, como un dispositivo socioespacial que organiza regímenes de visibilidad y opacidad en el territorio (Pløger, 2008; Ebbensgaard, 2019). En el caso de la frontera México–Estados Unidos, ciertos patrones de la señal VIIRS-DNB son consistentes con jerarquías funcionales (logística, industria, comercio, residencial) y con accesos diferenciados a servicios públicos. Bajo esta premisa, la radiancia nocturna captada por sensores remotos se interpreta como una expresión espacial observable, en la que las zonas de alta y baja radiancia configuran las geografías urbanas y económicas de la conurbación Ciudad Juárez y El Paso. En consecuencia, el análisis no se limita a describir intensidades lumínicas, sino que discute algunas de sus implicaciones territoriales con un alcance exploratorio.

Desde el punto de vista metodológico, se emplea una serie mensual de imágenes VIIRS-DNB correspondientes al periodo 2013–2023, procesadas en Google Earth Engine (GEE). Para mejorar la legibilidad espacial y temporal se aplicaron distintas técnicas de suavizado: percentil 50, filtro gaussiano, media móvil, umbral mínimo y promedio temporal. La combinación de estos procedimientos permitió distinguir estructuras persistentes de radiancia, variaciones vinculadas al uso de suelo —industrial, comercial y residencial—, así como alteraciones derivadas de la pandemia de COVID-19. El objetivo central fue identificar patrones espaciales consistentes de la intensidad lumínica observada por el satélite que sirvieran como base para lecturas territoriales y formulación de hipótesis sobre la dinámica urbana.

En este sentido, los resultados permiten identificar tres hallazgos principales: 1) la existencia de una jerarquía de radiancia nocturna coherente con funciones urbanas y patrones de uso del suelo; 2) contrastes espaciales sistemáticos entre las dos ciudades, compatibles con asimetrías en la dotación de infraestructura y servicios urbanos; y 3) dinámicas diferenciadas antes y después de la pandemia, con disminución de radiancia en zonas logísticas de El Paso y aumentos en corredores industriales de Ciudad Juárez.

Este artículo contribuye a la discusión sobre desarrollo urbano regional en tres niveles: metodológico, al adaptar técnicas satelitales al estudio de heterogeneidad de la radiancia y desigualdad territorial; empírico, al representar asimetrías transfronterizas con detalle espacial, y aplicado, al ofrecer una base diagnóstica potencial para orientar preguntas e intervenciones en regiones con alta interdependencia funcional.



A partir de este enfoque, se busca responder a la siguiente pregunta: ¿Cómo se configuran los patrones de radiancia nocturna en la conurbación transfronteriza que forman Ciudad Juárez y El Paso y qué contrastes territoriales permiten describir, particularmente en el período de la pandemia por COVID-19 y su etapa posterior (2022-2023)?

El objetivo es analizar los contrastes de la intensidad lumínica observada por el satélite en relación con los distintos usos del suelo, evaluar la utilidad metodológica de las imágenes VIIRS-DNB en contextos regionales con datos limitados, y documentar los cambios temporales registrados en el periodo 2013–2023. Con ello, se propone una aproximación crítica al estudio de las desigualdades territoriales en una región transfronteriza marcada por dinámicas estructurales de interdependencia económica y social. El texto se organiza en cinco secciones: marco teórico, metodología, resultados, discusión con enfoque regional y conclusiones.

Este artículo adopta un enfoque exploratorio-descriptivo. Su propósito es caracterizar patrones y gradientes de radiancia nocturna y discutir su utilidad como proxy territorial en una región binacional conectada. En consecuencia, las interpretaciones sobre desigualdad, segregación, vigilancia o abandono institucional se presentan como lecturas analíticas e hipótesis plausibles derivadas de los patrones observados, que deberán contrastarse en investigaciones posteriores mediante triangulación socioeconómica, institucional y/o trabajo de campo.

LA CONURBACIÓN TRANSFRONTERIZA DE CIUDAD JUÁREZ Y EL PASO: ASIMETRÍAS EN INFRAESTRUCTURA LUMÍNICA

Desde el establecimiento de la frontera entre México y Estados Unidos en 1848, la población Paso del Norte quedó dividida en dos comunidades: en el lado mexicano de la frontera se ubicó la actual Ciudad Juárez y en la zona estadounidense el asentamiento de El Paso. Desde ese momento, ambas urbes han experimentado patrones de crecimiento y niveles de dotación de infraestructura desiguales, producto de la asimetría económica entre ambos países.

Ciudad Juárez se caracteriza por un acelerado crecimiento urbano y poblacional debido a su localización como puerto fronterizo, que condujo a la atracción de flujos migratorios que buscaban llegar a Estados Unidos y, al no poderlo hacer, se



quedaban en la ciudad. Además, de ser una de las localidades en donde se generó la mayor cantidad de empleo en las maquiladoras, que se convirtieron en un imán para personas en búsqueda de trabajo (Fuentes, 2001). Lo anterior, condujo a un rápido desarrollo que se caracteriza por ser descontrolado y con un bajo nivel de planificación. Ante la imposibilidad de los distintos niveles de gobierno de realizar grandes inversiones en este rubro, este proceso dio lugar a la expansión de amplias zonas de la ciudad con bajos niveles de infraestructura (Fuentes, 2001). Aunado a esto, el modelo de planeación ha sido poco institucionalizado y ha operado mediante mecanismos formales e informales. Estos últimos se concentran en la periferia del poniente de la ciudad, donde se presentan déficits de equipamiento básico, como el alumbrado público.

Por su parte, El Paso ha implementado un proceso de planificación institucionalizado, que responde en mayor medida a criterios técnicos que políticos. Por lo anterior, su expansión se ha orientado hacia zonas previamente destinadas para ello y dotadas de equipamiento, con excepción de algunos asentamientos humanos llamados colonias, que están desprovistos de servicios públicos. En este marco, el límite internacional y los puertos de entrada destacan también por sus altos niveles de radiancia nocturna, vinculados a su papel como espacios estratégicos de cruce fronterizo y a la concentración de infraestructura urbana y medidas de seguridad.

LA HUELLA LUMÍNICA NOCTURNA COMO ESPEJO DE DESIGUALDADES URBANAS

Las imágenes satelitales de radiancia nocturna han trascendido su uso técnico para convertirse en herramientas críticas en estudios urbanos y regionales, especialmente en contextos de integración binacional con marcadas asimetrías (Levin et al., 2020). En la frontera México-Estados Unidos, este enfoque permite representar cartográficamente la infraestructura y las jerarquías espaciales que suelen relacionarse con accesos diferenciados a servicios, inversión pública y oportunidades económicas (Pandey et al., 2022; McDonald y Grineski, 2012).

En este sentido, la señal VIIRS-DNB revela patrones espaciales y condensa, en su distribución e intensidad, procesos de inclusión, exclusión y diferenciación territorial que resultan especialmente visibles en contextos como el de Ciudad Juárez–El Paso. Así, la intensidad lumínica observada por el satélite reproduce las jerarquías funcionales de las ciudades, además de materializar formas de control,



exclusión y vigilancia que definen las geografías morales y políticas del espacio fronterizo.

Más que asumir que la radiancia equivale a “iluminación” en sentido estricto, se propone leer la señal satelital como un indicador de regímenes de visibilidad nocturna: dónde se concentran la actividad y la infraestructura que hacen posible ver, circular y operar durante la noche. En este punto, la noción *foucaultiana* de dispositivo disciplinario ofrece una referencia interpretativa útil para pensar espacios donde la visibilidad se organiza de forma jerárquica. Foucault (2002):

[Un] espacio cerrado, recortado, vigilado, en todos sus puntos, en el que los individuos están insertos en un lugar fijo, en el que los menores movimientos se hallan controlados, en el que todos los acontecimientos están registrados, en el que un trabajo ininterrumpido de escritura une el centro y la periferia, en el que el poder se ejerce por entero, de acuerdo con una figura jerárquica continua, en el que cada individuo está constantemente localizado, examinado y distribuido entre los vivos, los enfermos y los muertos —todo esto constituye un modelo compacto del dispositivo disciplinario— (p. 182).

La radiancia extrema en los cruces fronterizos, especialmente en Paso del Norte-Santa Fe es consistente con una operación logística las 24 horas los siete días de la semana y también configura un régimen de alta visibilidad. Desde una lectura *foucaultiana*, esta intensificación puede interpretarse como un paisaje de observación y control territorial, en el que ciertos nodos se vuelven visibles y operables durante la noche.

Esta composición dialoga con la idea de *bypass* infraestructural de Graham y Marvin (2001), entendida como: “una red de infraestructura paralela que conecta eficazmente a usuarios y lugares valorizados, mientras simultáneamente elude a usuarios y lugares no valorizados” (p. 167). En la región Ciudad Juárez-El Paso, la concentración de radiancia en cruces fronterizos internacionales y corredores industriales sugiere la formación de una red nocturna de alta intensidad asociada a flujos estratégicos. En contraste, los valores bajos observados en periferias residenciales abren la hipótesis de rezagos en la provisión y calidad de infraestructura lumínica (incluido el alumbrado público), cuestión que requiere contrastación posterior con indicadores de servicio y de condiciones socioeconómicas.

Esta dicotomía no es meramente técnica; puede leerse como una materialización de injusticia espacial asociada a “geografías de poder sobreimpuestas” (Soja, 2014, p. 66). Cuando un bien público como el alumbrado se distribuye de forma desigual, tiende a normalizar jerarquías socioterritoriales y a producir paisajes de



vulnerabilidad. En este sentido, la baja visibilidad nocturna en colonias periféricas puede incrementar riesgos cotidianos y reforzar experiencias de exclusión; no obstante, como se mencionó previamente, sostener mecanismos específicos exige evidencia institucional y socioeconómica adicional.

Iluminación y segregación socioespacial en América Latina

Desde una perspectiva regional, estudios como los de Rueda-Espinosa et al. (2023) en Colombia y Doria et al. (2016) en Brasil han explorado como los patrones de luz artificial nocturna —y en ciertos casos, su vínculo con la contaminación lumínica— se relacionan con dinámicas de urbanización desigual. En estos términos, la radiancia nocturna puede leerse como una huella espacial de infraestructura y actividad que se distribuye de forma heterogénea, abriendo una vía para aproximar contrastes territoriales asociados a exclusión y marginación (Doria et al., 2016; Rueda-Espinosa et al., 2023).

En Ciudad Juárez, estas discusiones se vuelven relevantes por la dispersión de asentamientos periféricos y por la recurrencia de demandas públicas en torno al alumbrado como servicio. Organizaciones empresariales y civiles han señalado carencias de iluminación en zonas del norponiente de la ciudad —habitada mayormente por trabajadores de la línea de producción de las maquiladoras— y han advertido que estos déficits pueden incrementar vulnerabilidades para quienes laboran en turnos nocturnos (Meza, 2023). Esta evidencia documental es compatible con la hipótesis de una inversión pública desigual, donde corredores principales tienden a privilegiarse frente a áreas periféricas, reforzando procesos de marginación urbana (Doria et al., 2016; Rueda-Espinosa et al., 2023).

En contraste, en El Paso se ha documentado una planificación urbana orientada a reducir disparidades espaciales (Peach y Williams, 1994). En esa línea, la radiancia nocturna también se ha utilizado como indicador proxy de marginalidad: Chen (2014) reporta asociaciones entre baja radiancia y condiciones de pobreza en contextos subdesarrollados, lo que respalda su utilidad como insumo exploratorio para lecturas comparativas.



Fronteras y asimetrías de radiancia: más allá de la infraestructura

A diferencia de Europa o Asia, donde estudios como los de Bennie, Davies, Duffy, Inger y Gaston (2014) analizan eficiencia energética, en regiones fronterizas el reto analítico es interpretar la radiancia nocturna como indicio de interdependencia económica y fragmentación social (Staudt y Vera, 2006). Por ejemplo, la alta señal VIIRS-DNB en cruces internacionales como el de Paso del Norte–Santa Fe, es consistente con infraestructura de control y operación intensa, así como con los flujos comerciales formales que sostienen las economías locales (Fuentes, 2022). Esto coincide con los hallazgos de Coscieme, Sutton, Anderson, Liu y Elvidge (2017) para la frontera Estados Unidos–México, donde los patrones de iluminación nocturna permiten visibilizar dinámicas geopolíticas que suelen ser difusas a escalas nacionales.

La distribución desigual de la iluminación también se expresa en impactos diferenciados sobre la experiencia urbana. Yadav y Kumari (2024) documentan que la falta de iluminación en pasos subterráneos y banquetas constituye una preocupación importante para mujeres y niñas en Kanpur, India, al asociarse con percepciones negativas de seguridad y restricciones de movilidad peatonal. En Ciudad Juárez, esta dimensión puede discutirse como hipótesis situada —en diálogo con Staudt y Vera (2006)— para interpretar cómo la baja visibilidad observada por la noche en periferias puede reforzar experiencias de vulnerabilidad. En este marco, la radiancia nocturna se presenta como un dato técnico y como un insumo para discutir justicia espacial, siempre explicitando su alcance exploratorio.

Bajo esta perspectiva, el análisis de la radiancia nocturna entre Ciudad Juárez–El Paso permite describir la organización espacial del territorio y discutir lógicas diferenciales asociadas a desigualdad urbana en regiones transfronterizas, delimitando que la radiancia funciona como proxy y que la identificación de mecanismos socioeconómicos o institucionales requiere evidencia adicional.



METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio abarca las zonas urbanas de Ciudad Juárez y El Paso, con una población estimada de más de 2.1 millones de habitantes en el año 2020. Para el análisis, se construyó un polígono envolvente basado en esa densidad poblacional y los límites actualizados (City of El Paso Open Data, 2025; Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020), al que se añadió una banda perimetral del 20%. Esta zona de amortiguamiento captura tanto áreas en transición como posibles efectos de expansión territorial más allá de los límites formales, permitiendo analizar dinámicas metropolitanas e interacciones espaciales en sus bordes.

Como resultado, se definió un área de interés de 429 467 hectáreas para el análisis de radiancia nocturna (véase figura 1), que incluye tanto núcleos ciudadanos densos como áreas circundantes en proceso de transformación territorial. Esta delimitación facilita la observación de gradientes lumínicos entre zonas consolidadas y periferias en desarrollo.

Datos y preprocesamiento

En este estudio se emplearon datos de radiancia nocturna del producto VIIRS-DNB, capturados por el sensor Suomi NPP entre enero de 2013 y diciembre de 2023. Las imágenes mensuales se obtuvieron de la colección pública NOAA/VIIRS/DNB/MONTHLY_V1/VCMSLCFG en GEE, previamente corregidas por efectos de nubosidad y variaciones lunares (Earth Observation Group [EOG], 2021).

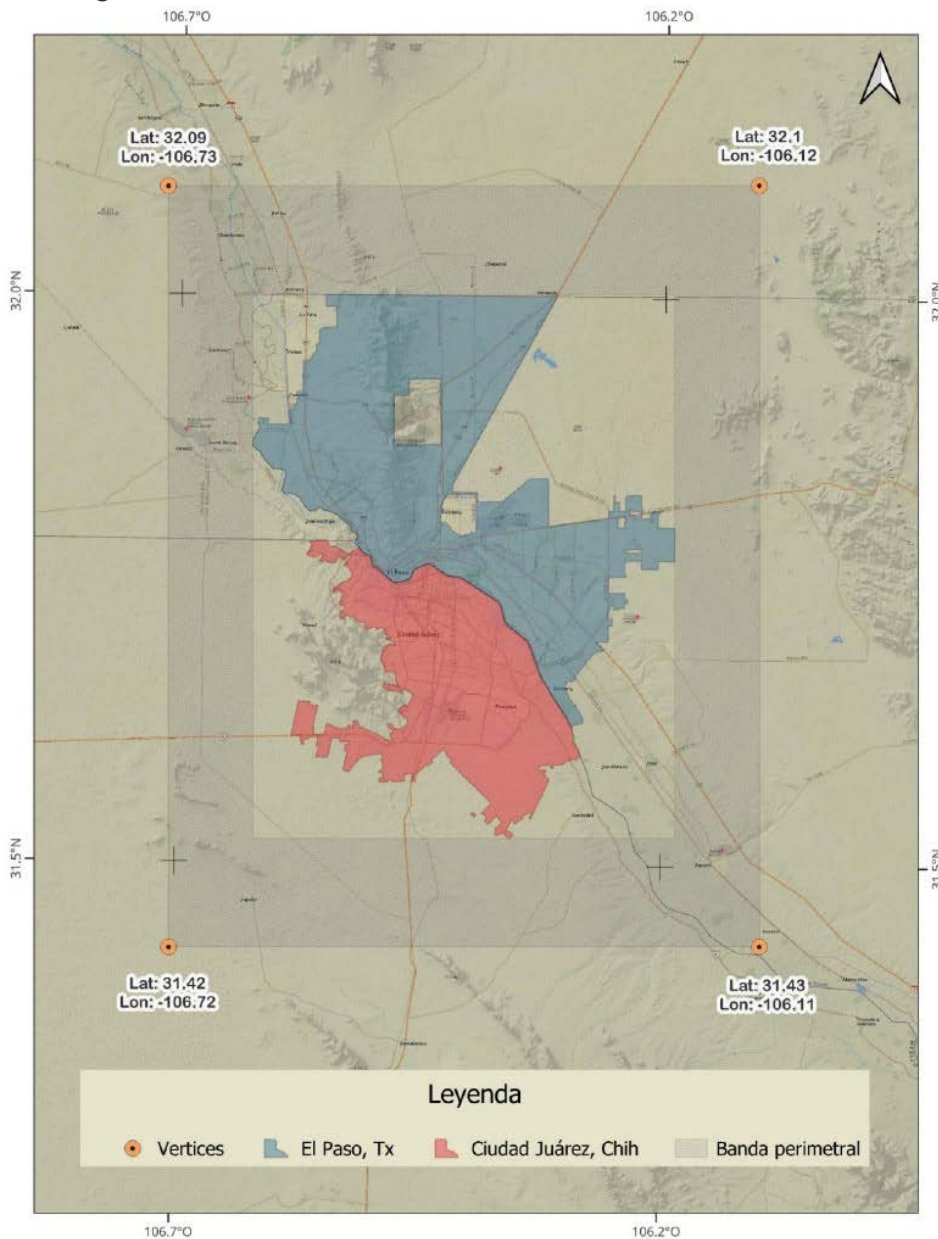
La utilidad de estos datos para análisis urbanos cuenta con respaldo académico (Bagan y Yamagata, 2015; Goldblatt et al., 2018; He et al., 2006), incluyendo aplicaciones en estudios transfronterizos similares (Zhang y Seto, 2013; Zheng, Tang y Wang, 2021). Si bien el producto incluye correcciones básicas para reducir artefactos (Chen, Zhang, Du y Liu, 2020; Elvidge, Baugh, Zhizhin, Hsu y Ghost, 2017), en este trabajo se implementaron técnicas adicionales de suavizado que permiten una identificación más precisa de patrones lumínicos observados por el satélite, generando representaciones espacialmente robustas para el análisis de dinámicas intraurbanas.

Comparado con las series DMSP-OLS,¹ el producto VIIRS-DNB presenta ventajas técnicas significativas: mayor resolución espacial (alrededor de 500 m), calibración a bordo que minimiza problemas de brillo elevado y saturación (Elvi-

¹ Los datos del Programa de Satélites Meteorológicos de Defensa, Sistema Operacional de Escaneo Lineal (DMSP-OLS), que tiene una serie temporal relativamente larga publicada de 1992 a 2013 (Chen et al., 2020).



Figura 1. Área de interés: Ciudad Juárez, Chihuahua - El Paso, Texas



Fuente: elaboración propia con datos del INEGI (2020) y City of El Paso (2025).

dge et al., 2017), y unidades estandarizadas de radiancia: nanovatios por centímetro cuadrado por estereorradián ($\text{nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$), que garantizan consistencia en las mediciones. A diferencia del producto *Black Marble* de la National Aeronautics and Space Administration, VIIRS-DNB no incorpora correcciones atmosféricas



avanzadas ni correcciones por reflectancia bidireccional (BRDF, por sus siglas en inglés), pero su disponibilidad inmediata en GEE, resolución espacial consistente y preprocesamiento básico (incluyendo filtrado de nubes, incendios y fases lunares extremas) lo hacen idóneo para análisis exploratorios a escala metropolitana.

La selección del período 2013-2023 se fundamenta en tres criterios metodológicos: primero, 2013 marca el inicio de datos VIIRS-DNB completos y estables en GEE; segundo, este lapso incluye eventos socioeconómicos relevantes como el inicio de la pandemia COVID-19 (2020-2021), permitiendo comparaciones previas y posteriores al evento, y tercero, 2023 corresponde al último año con datos disponibles del producto VIIRS-DNB al momento de iniciar la investigación, accesible a través de GEE. Esta ventana temporal de diez años proporciona una base para analizar transformaciones en los patrones de radiancia asociados a procesos de desarrollo urbano, actividad industrial y cambios territoriales en la región transfronteriza Ciudad Juárez-El Paso.

Si bien la resolución espacial del VIIRS-DNB (alrededor de 500 m) imposibilita el análisis a escala vecinal, esta misma característica ofrece una ventaja analítica para el estudio de dinámicas conurbadas y regionales. La imposibilidad de distinguir entre alumbrado público y luz comercial o industrial en un píxel individual se reconoce como una limitación inherente al sensor; sin embargo, resulta útil para analizar la huella lumínica agregada de la zona. El píxel se convierte así en una unidad de análisis que sintetiza la intensidad resultante de actividades e infraestructura (pública y privada) y permite describir heterogeneidad lumínica intrarregional, sin atribuir por sí sola causalidad social.

Procesamiento y análisis de la información

El enfoque metodológico combinó el procesamiento en GEE con análisis geoespacial en QGIS 3.42, aprovechando las ventajas de cada plataforma: la primera para el manejo eficiente de grandes volúmenes de datos VIIRS-DNB y la segunda para operaciones geoespaciales detalladas. El proceso inició con la delimitación del área de estudio (conurbación Ciudad Juárez-El Paso) y la obtención de imágenes con valores de radiancia nocturna. Mediante *scripts* personalizados en JavaScript (GEE), se extrajeron estadísticas de la señal VIIRS-DNB (media, máximos y percentiles 90/95) y se exportaron imágenes anuales en formato GeoTIFF para el período 2013-2023. Estas se reproyectaron a coordenadas WGS84-UTM 13 Norte para homogenizar el análisis (véase tabla 1).



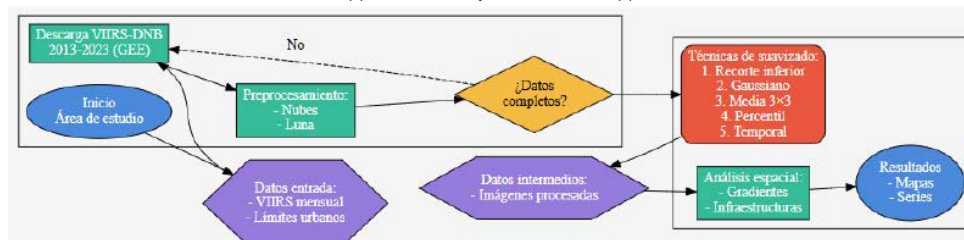
Tabla 1. Técnicas de suavizado aplicadas a las imágenes VIIRS y sus propósitos analíticos

Técnica	Tipo	Propósito principal	Referencia
Recorte inferior	Espacial (umbral)	Aislar áreas de alta radiancia; eliminar ruido de baja intensidad.	Chen et al. (2020) Zhang et al. (2017)
Filtro gaussiano	Espacial (convolución)	Preservar patrones urbanos globales; suavizar bordes sin distorsión.	Elvidge et al. (2017) Grasso (2021)
Media móvil 3×3	Espacial (ventana)	Reducir variabilidad píxel a píxel; destacar configuraciones regionales.	Liu et al. (2020) Ajmar, Arco y Eusebio (2022)
Percentil	Espacial (robusto)	Capturar persistencia de la huella lumínica; minimizar efecto de valores atípicos.	Aisy et al. (2023) Hessel et al. (2023) Listyawati et al. (2024)
Media temporal (3 años)	Temporal	Identificar cambios estructurales (pre/post pandemia); suavizar fluctuaciones.	Zhou et al. (2015) Ajmar et al. (2022)

Fuente: elaboración propia.

En la fase final se generaron mapas de gradientes lumínicos mediante álgebra de mapas en QGIS, superponiendo capas vectoriales de usos de suelo (Instituto Municipal de Investigación y Planeación, 2025) para identificar coincidencias y asociaciones espaciales. Por ejemplo, en corredores como el Libramiento Regional Sur, la señal lumínica capturada por el satélite mostró un aumento observado del 18% en zonas industriales (2013–2023), mientras que en las periféricas la variación fue menor a 5%. Esta integración metodológica (véase figura 2) permitió identificar patrones espaciales difíciles de detectar con técnicas individuales.

Figura 2. Flujo metodológico



Fuente: elaboración propia.



OPERACIONALIZACIÓN DE LA DESIGUALDAD LUMÍNICA Y GRADIENTE CENTRO–PERIFERIA

Con el fin de operacionalizar de manera explícita el concepto de “desigualdad lumínica”, además de los estadísticos descriptivos convencionales se estimaron indicadores distributivos de radiancia por unidad territorial y año. En términos descriptivos, la banda de radiancia nocturna captura la energía luminosa detectada por el sensor como radiancia ascendente agregada a escala de píxel (alrededor de 500 m), lo que permite aproximar patrones persistentes de infraestructura y actividad nocturna a escala regional. Esta medición, sin embargo, no equivale a iluminación a nivel de calle ni distingue de forma directa entre alumbrado público, iluminación comercial o industrial; por ello, las inferencias sobre provisión de servicios, seguridad o vigilancia se formulan como lecturas analíticas e hipótesis plausibles, no como relaciones causales demostradas.

Los indicadores de desigualdad lumínica se calcularon sobre los grupos anuales (2013–2023) y se reportaron como: percentiles (P_{10} , P_{50} , P_{90} y P_{95}) para describir la estructura de la distribución; razones interpercentiles (P_{90}/P_{10}) y diferencias ($P_{90}-P_{10}$) para captar contraste relativo y absoluto; coeficiente de variación ($CV = \text{desviación estándar}/\text{media}$) como medida de heterogeneidad; coeficiente de Gini como resumen de desigualdad distributiva, y participación del 10% de píxeles más iluminados en la radiancia total concentrada en el decil superior ($\text{radiancia} \geq P_{90}$).

Para evaluar la dimensión morfológica de la desigualdad (gradiente centro–periferia) se construyeron anillos concéntricos (0–2, 2–5, 5–10, 10–20 y 20–40 km) a partir de centros funcionales definidos por coordenadas geográficas. Para la región, el centro se ancló al cruce Paso del Norte–Santa Fe (–106.4869, 31.7477), por su papel nodal en la operación fronteriza; en las delimitaciones urbanas se emplearon puntos representativos de centralidad (Juárez: –106.4858, 31.7390; El Paso: –106.4872, 31.7587). Para cada anillo se estimó la radiancia media anual y se derivaron métricas sintéticas: la razón centro/periferia (0–2 km / 20–40 km) y la pendiente radiancia–distancia como descriptor complementario del gradiente.



Métricas de evaluación del suavizado

Estas métricas se utilizaron para las técnicas de suavizado gaussiano y percentil, ya que se podían comparar directamente con la imagen original. La desviación estándar residual cuantifica la reducción del ruido local: valores más bajos indican una mayor efectividad del suavizado. Por otro lado, el error cuadrático medio (RMSE) evalúa el grado de conservación de los patrones espaciales originales, de modo que una menor puntuación refleja una distorsión global reducida.

RESULTADOS

Dinámicas lumínicas en una conurbación asimétrica

El análisis de radiancia nocturna en la región Ciudad Juárez-El Paso muestra patrones coherentes con trayectorias urbanas divergentes. Ciudad Juárez marcada por una rápida expansión urbana y un crecimiento periférico disperso, presenta discontinuidades y vacíos lumínicos más pronunciados; mientras que El Paso exhibe gradientes más homogéneos, con focos de alta intensidad en corredores viales, áreas industriales y nodos fronterizos.

Los resultados obtenidos en El Paso son reflejo de su planificación institucional, aunque con focos de alta intensidad en sus áreas limítrofes vestigio de los patrones de autoconstrucción descritos por Wood (2001). El desarrollo urbano en ambas ciudades a principios del siglo XX planteó desafíos críticos en vivienda adecuada. En El Paso esto se manifestó en la proliferación de asentamientos periféricos, llamados colonias, caracterizados por la autoconstrucción de casas y acceso limitado a servicios básicos (Wood, 2001), un patrón que persiste décadas después. En Ciudad Juárez, el crecimiento poblacional vía migración encontró donde vivir mediante mecanismos irregulares, como las invasiones, sobre todo en el poniente (Fuentes, 2001). Hacia el suroeste se localizaron los programas habitacionales económicos, para los grupos empleados en el sector formal de la economía (Fuentes y Hernández, 2014).

Técnicas de suavizado como diagnóstico urbano

El análisis comparativo de las técnicas de procesamiento mostró su utilidad para hacer más legibles los contrastes en la franja. El filtro gaussiano (desviación residual = 2.78) destacó por identificar transiciones abruptas en la periferia juarense,



donde la expansión urbana genera patrones de radiancia nocturna fragmentada. Por contraste, el percentil 50 reveló con claridad la distribución de parques industriales maquiladores, cuya huella lumínica intensa pero localizada es consistente con el modelo de subcentros de empleo “en archipiélago” descrito por Chaparro y Hernández (2020).

Los valores promedio de radiancia ($9.91 \pm 18.74 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) muestran la marcada heterogeneidad del espacio transfronterizo (véase tabla 2). La desviación estándar elevada (18.74) sugiere la coexistencia de extremos lumínicos: desde los $178.21 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ en cruces fronterizos y zonas industriales, hasta los $0.33 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ en áreas rurales. Esta variabilidad quedó registrada en la imagen original promedio 2013-2023, donde se observa la concentración de máximos en infraestructuras estratégicas y la presencia de mínimos en espacios no urbanizados.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de radiancia nocturna (VIIRS-DNB) en la conurbación Ciudad Juárez-El Paso (imagen original promedio 2013-2023)

Métrica	Valor*	Interpretación
Máximo	178.21	Asociado a zonas industriales, comerciales y cruces fronterizos.
Media	9.91	Sintetiza el nivel medio de radiancia en el área de estudio.
Mínimo	0.33	Identifica áreas prácticamente sin huella lumínica.
Desviación estándar	18.74	Medida de variabilidad espacial de la intensidad de radiancia observada por el satélite.

*Nota: valores expresados en $\text{nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$.

Fuente: elaboración propia con datos del EOG, Payne Institute for Public Policy (2021).

La aplicación de cuatro técnicas de suavizado demostró comportamientos diferenciados con implicaciones analíticas particulares. El filtro gaussiano mantuvo prácticamente inalterados los valores originales, preservando la distribución espacial a escala local. Los percentiles, por su parte, lograron una reducción moderada (~1.4%) al eliminar valores extremos, mostrando especial eficacia en zonas periurbanas, aunque con limitaciones en áreas de alta variabilidad lumínica como señalan Ma y Li (2018).

La técnica de media móvil (3×3 píxeles) evidenció dinámicas contrastantes entre ambas ciudades. En Ciudad Juárez, los valores de radiancia oscilaron entre -40.96 y $130.55 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$: las disminuciones se concentraron en sectores peri-



féricos, mientras que los incrementos más altos se localizaron en el área urbana consolidada, posiblemente asociados a cambios en la intensidad de actividad y a procesos de densificación. En El Paso, la reducción de radiancia en el entorno aeroportuario, particularmente en el parque industrial Butterfield Trail, alcanzó hasta $-128.05 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, lo que podría relacionarse con ajustes operativos durante la pandemia o con mejoras en eficiencia energética.

El umbral fijo ($70 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) identificó núcleos estratégicos con precisión: en El Paso destacó el corredor de la carretera Interestatal I-10, mientras que en Ciudad Juárez resaltaron dos agrupamientos principales —el eje norte (Zona Centro-Pronaf) y el polo sur (Avenida de Las Torres)—. El cruce fronterizo Paso del Norte-Santa Fe emergió consistentemente como el punto de máxima radiancia, en un contexto de infraestructura en operación las 24 horas los siete días de la semana y de control fronterizo.

Estos hallazgos subrayan que la elección de la técnica debe responder al objetivo analítico específico, ya que cada método evidencia dimensiones complementarias de la dinámica urbana fronteriza. La combinación de filtros aplicados a la imagen de satélite ofrece así una visión más integral de las complejidades lumínicas en este espacio binacional.

Análisis de la radiancia nocturna por tipo de actividad

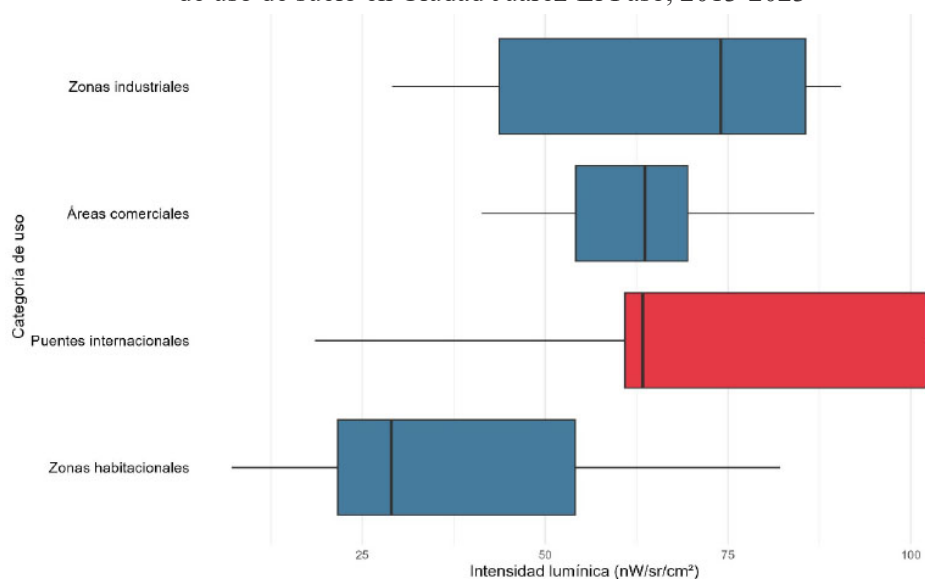
La interpretación del análisis evidencia una marcada estratificación lumínica vinculada al uso de suelo en la región transfronteriza. Como muestra la figura 3, los puentes internacionales presentan los valores promedio más altos ($69.70 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$), pero con una notable variabilidad (rango: $18.54\text{--}103.56$), destacando el cruce Paso del Norte-Santa Fe como punto excepcionalmente iluminado ($103.56 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) en un contexto de operación continua e infraestructura fronteriza (véase figura 4). Las zonas industriales exhiben la mediana más elevada (74.06), asociada a la operación continua de maquiladoras, mientras que las áreas comerciales mantienen niveles consistentes (media: 62.61 ± 14.03).

En contraste, las zonas residenciales registran la menor intensidad VIIRS-DNB (media: 37.56) y mayor dispersión (rango: $7.14\text{--}82.15$), mostrando una distribución desplazada hacia valores bajos respecto a cruces fronterizos, zonas industriales y comerciales (figura 3). Esta diferencia se aprecia de forma consistente en medidas de tendencia central y dispersión por categoría, y debe interpretarse como una evidencia descriptiva de estratificación lumínica por tipo de actividad.



El amplio rango de valores en zonas habitacionales sugiere homogeneidad interna. Los valores mínimos, cercanos a la penumbra, se concentran en periferias con baja radiancia; mientras que los máximos se asocian a áreas de mayor densidad y equipamiento. Este patrón plantea la hipótesis de desigualdad en provisión de infraestructura y servicios urbanos (Wacquant, 2007, p. 247), a contrastar en trabajos posteriores con indicadores socioeconómicos, de población, inversión pública y evidencia institucional.

Figura 3. Distribución de la radiancia nocturna por categoría de uso de suelo en Ciudad Juárez-El Paso, 2013-2023



Fuente: elaboración propia con datos del EOG, Payne Institute for Public Policy (2021).

Jerarquía lumínica en cruces fronterizos

El análisis de la media anual de radiancia (2013-2023) identificó el cruce Paso del Norte-Santa Fe como el punto de máxima radiancia ($103.56 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$), valor que supera en un 25% al segundo más iluminado (Lerdo-Stanton con 102.11). Para contextualizar estos valores, se implementó un buffer de 1 600 m (una milla) alrededor de cada cruce, permitiendo evaluar el píxel central y su entorno urbano inmediato. Este enfoque reveló que los núcleos lumínicos más intensos coinciden con las



zonas centro tradicionales de ambas ciudades, donde se concentra infraestructura característica de cruces fronterizos.

El análisis con buffers de 1 600 m identificó tres niveles distintivos (véase figura 4):

1. Núcleos máximos ($>100 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$): Paso del Norte-Santa Fe y Lerdo-Stanton, con infraestructura de control migratorio y vigilancia durante las 24 horas los siete días de la semana.
2. Nivel intermedio ($60\text{-}64 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$): Córdova-Américas y Zaragoza-Ysleta, asociados a corredores comerciales binacionales.
3. Nivel mínimo ($18.54 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$): Santa Teresa-San Jerónimo, reflejo de su ubicación periférica y menor actividad.

Figura 4. Intensidad de la iluminación nocturna en cruces fronterizos Ciudad Juárez-El Paso, 2013-2023



Fuente: elaboración propia con datos del EOG, Payne Institute for Public Policy (2021).



Patrones lineales conurbados

A escala regional, se identificaron ejes lumínicos diferenciados (figura 4):

- El Paso: Red continua a lo largo de la carretera Interestatal 10, Ruta 62 y Loop 375.
- Ciudad Juárez: Estructura vial menos definida radiométricamente, con discontinuidades que coinciden con usos mixtos, áreas de autoconstrucción.

Estos hallazgos subrayan cómo la radiancia capturada por el satélite sintetiza contrastes en la zona: desde la hiperiluminación de espacios fronterizos estratégicos hasta la baja radiancia en periferias residenciales. La lectura regional de estos gradientes permite ubicar nodos, corredores y discontinuidades que son relevantes para discutir asimetrías urbanas en un territorio binacional.

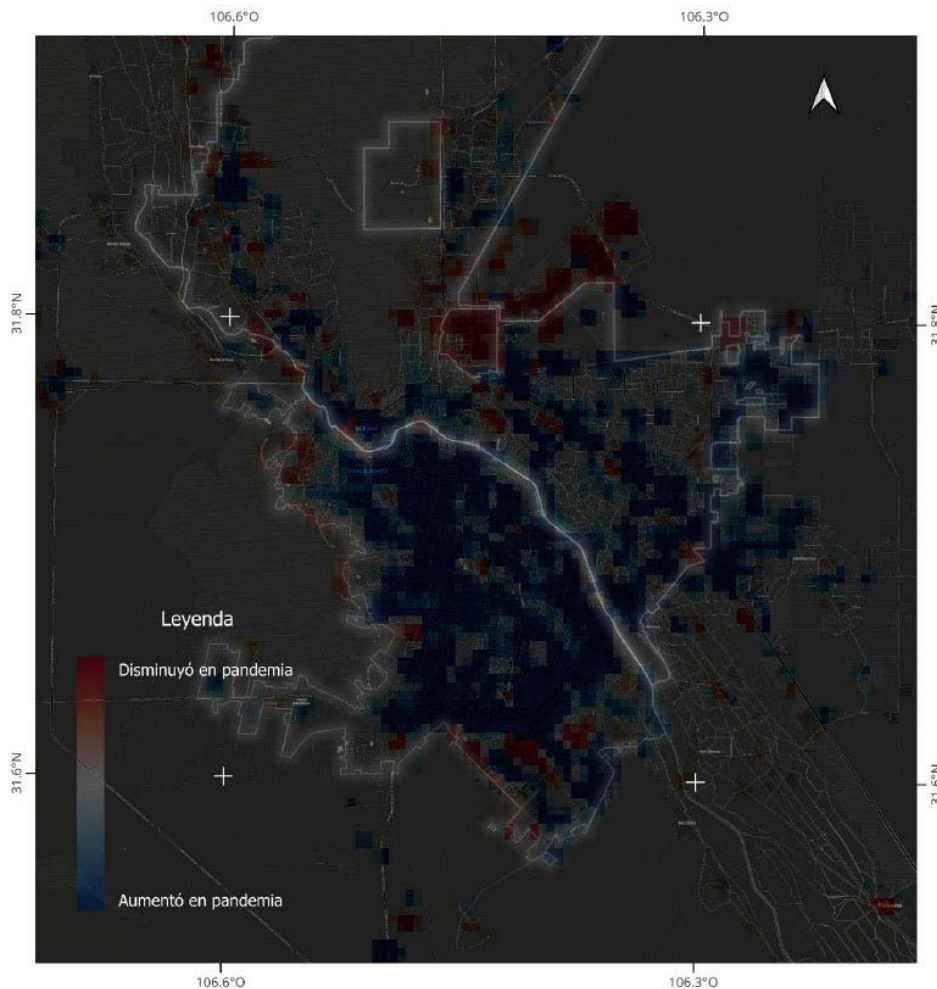
Análisis de cambios temporales

El estudio comparativo de los periodos 2016–2019 (prepandemia) y 2020–2023 (pandemia y transición pospandémica) reveló dinámicas contrastantes en la evolución lumínica (véase figura 5). Ciudad Juárez registró incrementos sustanciales (hasta $+98 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) en corredores industriales clave como el Libramiento Sur y áreas aledañas al puente Zaragoza–Ysleta, compatibles con la continuidad y reconfiguración del sector maquilador durante las restricciones sanitarias. En contraste, El Paso mostró reducciones pronunciadas (hasta $-103 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) en corredores logísticos próximos al aeropuerto internacional y la carretera Interestatal 10, lo que podría asociarse con ajustes operativos y cambios de actividad en las mismas etapas temporales analizadas.

Las áreas estables correspondieron mayormente a zonas residenciales consolidadas, mientras que las pérdidas lumínicas en periferias juarenses podrían asociarse a cambios de actividad y variaciones en servicios. En conjunto, la comparación sugiere que la pandemia pudo amplificar asimetrías preexistentes: donde El Paso contrajo su huella lumínica industrial, Ciudad Juárez expandió la suya. Estas lecturas deben considerarse como hipótesis plausibles y deben complementarse con información de ambos lados de la frontera.



Figura 5. Cambios en la radiancia nocturna (VIIRS-DNB) promedio entre los periodos prepandemia, pandemia y transición pospandémica (2016–2019 versus 2020–2023)



Fuente: elaboración propia con datos del EOG, Payne Institute for Public Policy (2021).

Desigualdad lumínica y gradiente centro–periferia (2013–2023)

Más allá de los contrastes por usos de suelo y por nodos estratégicos, la serie anual permite caracterizar la distribución de la radiancia en el conjunto regional mediante indicadores sintéticos de concentración y gradiente centro–periferia (véase tabla 3).



En el periodo 2013–2023 se observa un aumento de la radiancia media, acompañado por una reducción gradual de la concentración: tanto el coeficiente de Gini como el cociente P90/P10 y la participación del decil superior disminuyen. En conjunto, el patrón sugiere que el incremento de radiancia no se explica únicamente por la intensificación de unos pocos enclaves muy brillantes, sino también por una expansión parcial hacia valores intermedios.

Tabla 3. Indicadores sintéticos de desigualdad lumínica y gradiente centro–periferia (2013→2023)

Unidad	Radiancia media	Gini	Participación del 10% de píxeles más iluminados	P90/P10	Razón centro/periferia (0–2 km / 20–40 km)
Región	14.97 - 18.75	0.705 - 0.674	0.472 - 0.438	82.33 - 77.28	14.28 - 12.12
Ciudad Juárez	17.54 - 21.83	0.707 - 0.687	0.418 - 0.410	96.27 - 87.55	11.96 - 9.18
El Paso	15.05 - 18.91	0.662 - 0.618	0.452 - 0.399	67.06 - 37.03	12.83 - 10.86

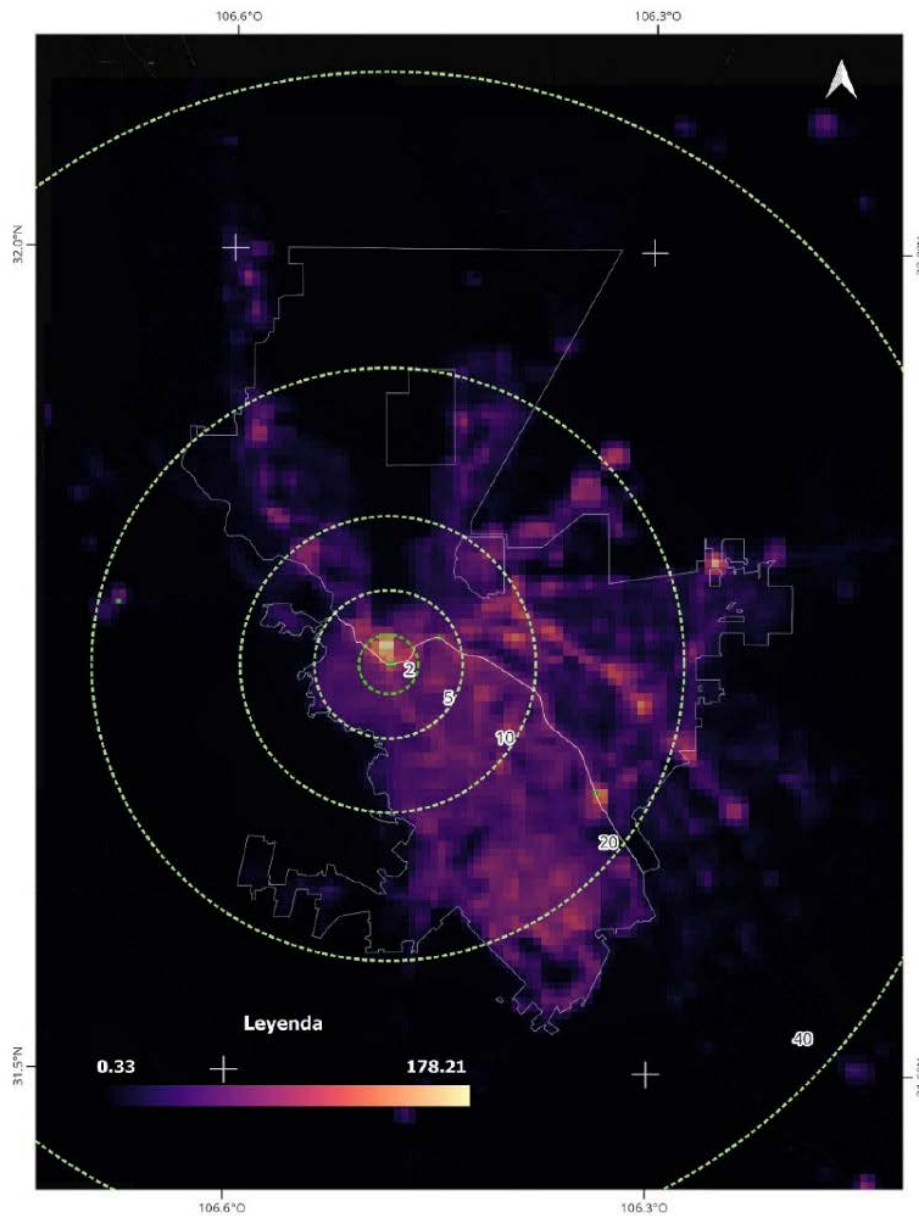
Fuente: elaboración propia con datos del EOG, Payne Institute for Public Policy (2021).

A escala local se mantiene la misma dirección general, aunque con magnitudes diferenciadas. Ciudad Juárez combina un aumento de la radiancia con una desconcentración moderada, mientras que El Paso registra una reducción más marcada de la concentración relativa (tabla 3). Este comportamiento es consistente con una mayor homogeneización espacial de la huella lumínica en la localidad estadounidense y con un gradiente centro–periferia que, aunque persiste en ambos lados, tiende a atenuarse en el periodo analizado.

El análisis centro–periferia complementa la lectura distributiva al mostrar cómo cambia el gradiente espacial de radiancia (véase figura 6). Entre 2013 y 2023, la razón entre el núcleo (0–2 km) y la periferia (20–40 km) disminuye en las tres delimitaciones (región Ciudad Juárez y El Paso), lo que sugiere un aplanamiento del gradiente. En términos generales, el patrón es consistente con un crecimiento proporcionalmente mayor en los anillos externos: la radiancia aumenta en el centro, pero la periferia también se intensifica, reduciendo la distancia relativa entre los dos extremos. Así, la desigualdad lumínica no se agota en la existencia de “islas brillantes”; también involucra la forma en que la radiancia se redistribuye gradualmente en el espacio.



Figura 6. Gradiente centro-periferia de radiancia nocturna (VIIRS-DNB), conurbación transfronteriza Ciudad Juárez-El Paso



Fuente: elaboración propia con datos del EOG, Payne Institute for Public Policy (2021).



En los cruces fronterizos se observan perfiles contrastantes. En 2023, Paso del Norte–Santa Fe y Lerdo–Stanton operan como núcleos de alta radiancia con desigualdad interna baja, consistente con nodos logísticos intensamente iluminados en buena parte de su entorno inmediato. En cambio, Santa Teresa–San Jerónimo presenta una radiancia media menor, pero una concentración interna alta, compatible con un enclave de alta iluminación inserto en un contexto de baja radiancia. Esta diferencia indica que la disparidad lumínica puede expresarse tanto como intensificación relativamente extendida (nodos logísticos) como concentración extrema localizada en áreas periféricas.

DISCUSIÓN: RADIANCIA NOCTURNA Y ASIMETRÍAS TRANSFRONTERIZAS EN CIUDAD JUÁREZ-EL PASO

Este estudio no se limita a la validación técnica de métodos de suavizado; propone una lectura regional de la heterogeneidad de radiancia nocturna entre Ciudad Juárez–El Paso y discute sus implicaciones para la desigualdad urbana. Como señalan diversos estudios (Ma, Zhou, Pei, Haynie y Fan, 2012; Zhang et al., 2017; Zhang y Seto, 2013), el valor de estos métodos no reside en la búsqueda de una imagen perfecta, sino en la capacidad de seleccionar la técnica más adecuada para documentar dimensiones específicas de la organización ciudadana. La aplicación del percentil 50 (RMSE = 0.28) y el filtro gaussiano (DE = 2.78) mostró su utilidad operativa —coincidiendo con hallazgos previos (Chen et al., 2020; Zhang y Seto, 2013)— y permitió comparar patrones divergentes en ambos lados de la frontera.

El análisis permite proponer tres dimensiones interpretativas de la heterogeneidad de radiancia nocturna con implicaciones para la desigualdad socioespacial:

1. Radiancia nocturna, interdependencia y (des)integración fronteriza

La claridad y continuidad lumínica de la carretera Interestatal 10 en El Paso contrasta con la fragmentación y precariedad vial de Ciudad Juárez, en consonancia con trayectorias de planeación divergentes: centralizada e institucionalizada frente a expansión más desregulada y mercantilizada (Fuentes, 2022; Pandey et al., 2022; Stokes y Seto, 2019). Esta divergencia es visible con más notoriedad en los cruces fronterizos, donde la alta radiancia en Paso del Norte–Santa Fe (103.56 nW·c-



$\text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) es compatible con un proceso de tecnificación y operación intensiva en estos espacios binacionales. En esta lectura, la radiancia elevada se asocia con la facilitación de flujos y con un régimen de visibilidad vinculado a infraestructura de operación y control.

La resiliencia lumínica de las maquiladoras juarenses durante la pandemia ($+98 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) frente a la contracción observada en parques industriales de El Paso ($-103 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) es consistente con lo que Fuentes y Peña (2010) caracterizan como “capitalismo de frontera”: un modelo donde la integración productiva funcional coexiste con asimetrías laborales y ambientales. En esta interpretación, la divergencia sugiere que las crisis globales pueden amplificar diferencias preexistentes en regiones transfronterizas, hipótesis que requiere contrastarse con evidencia productiva e institucional de ambas ciudades.

En conjunto, los resultados son compatibles con la idea de un “urbanismo fragmentado” (Graham y Marvin, 2001), que produce contrastes agudos entre enclaves intensivos y periferias rezagadas, en una configuración que recuerda la lectura de Davis (1990) para Los Ángeles.

2. Periferias de baja radiancia y producción de desertificación urbana

Las zonas residenciales muestran la mayor heterogeneidad (rango: 7.14–82.15), en consonancia con patrones históricos de segregación socioespacial documentados para la región (Wood, 2001). Sin embargo, dado el alcance exploratorio del estudio, esta relación debe leerse como una hipótesis: que la baja radiancia periférica ($<5 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) se asocia con déficits de infraestructura y servicios, y que los contrastes internos se relacionan con densidad, equipamiento y diferenciación socioeconómica.

3. Vivir en baja visibilidad: colonias en sombra y experiencia urbana

En este modelo, las islas de alta radiancia industrial y comercial —que concentran la visibilidad asociada a flujos de capital— contrastan con áreas residenciales de baja radiancia. Desde una lectura crítica, este contraste se interpreta como un signo material de jerarquías urbanas; sin embargo, aquí se presenta como una lectura analítica y no como una demostración causal. Una agenda de investigación posterior puede integrar percepción de seguridad, movilidad nocturna, inversión en alumbrado



do y condiciones socioeconómicas para evaluar en qué medida la baja visibilidad nocturna incrementa vulnerabilidades y refuerza experiencias de exclusión.

Lejos de ser un detalle menor, la persistencia de este patrón sugiere una integración transnacional dispar, donde corredores logísticos e industriales concentran infraestructura y visibilidad mientras ciertas periferias habitacionales mantienen rezagos. La noción de desertificación institucional (Wacquant, 2007) funciona aquí como hipótesis interpretativa: que la baja radiancia residencial podría reflejar déficits sostenidos de provisión urbana. En este sentido, la desigualdad lumínica aparece como un síntoma espacialmente explícito de la diferencia fronteriza (Fuentes y Peña, 2010), a contrastar con evidencia socioeconómica e institucional.

Hipótesis derivadas y agenda de investigación

H1. La baja radiancia en periferias residenciales se asocia a déficits sostenidos de infraestructura y servicios urbanos (alumbrado, vialidad, equipamiento).

H2. La alta radiancia en cruces fronterizos y corredores logísticos se vincula con operación durante las 24 horas los siete días de la semana e infraestructura de control, más que con el entorno residencial inmediato.

H3. La heterogeneidad interna se relaciona con densidad de población, diferenciación socioeconómica y desigualdad en provisión urbana.

H4. Los cambios en la pandemia y la transición pospandémica de COVID-19 son compatibles con reconfiguraciones de actividad y logística, mediadas por estructura productiva y respuestas institucionales diferenciadas.

HACIA UNA EPISTEMOLOGÍA DE LA RADIANCIA NOCTURNA: ALCANCES Y POTENCIAL ANALÍTICO

La discusión presentada, aunque sólida en términos espaciales y temporales, debe leerse junto con las limitaciones inherentes al enfoque. Lejos de invalidar el análisis, estas restricciones subrayan el valor heurístico de la radiancia nocturna satelital como proxy para el diagnóstico territorial en contextos donde la información socioeconómica es escasa, heterogénea o se encuentra desactualizada. Una decisión



metodológica de este estudio consistió en no incorporar, en esta etapa, registros socioeconómicos a escala micro, aun cuando existen, con el propósito de identificar primero patrones espaciales y temporales a partir de la señal VIIRS-DNB. En una fase posterior —tal como se plantea en las conclusiones— estos insumos permitirán contrastar hipótesis y articular lecturas más integrales sobre los mecanismos socioeconómicos e institucionales que subyacen a los patrones observados.

Este énfasis inicial en la huella lumínica del territorio no pretende sustituir enfoques estadísticos tradicionales, sino complementarlos mediante una aproximación visual y espacialmente explícita que hace legibles gradientes y discontinuidades difíciles de captar con otras fuentes. En ello reside el núcleo de lo que aquí denominamos una epistemología de la radiancia nocturna: un marco interpretativo que reconoce la parcialidad de su mirada —la radiancia como proxy— y, al mismo tiempo, aprovecha su singularidad para producir comparaciones regionales sobre la urbanización desigual.

Desde esta perspectiva, la radiancia nocturna posibilita identificar zonas de baja visibilidad y discontinuidades espaciales en periferias residenciales, que pueden leerse como indicios de rezagos de infraestructura y servicios urbanos. Asimismo, permite observar reconfiguraciones temporales asociadas a choques externos, como la pandemia por COVID-19, al hacer comparables cambios diferenciales en nodos industriales, corredores y áreas residenciales, un efecto también documentado en estudios recientes sobre iluminación nocturna (Millán y Guízar, 2024).

De forma complementaria, este enfoque contribuye a cartografiar fronteras visibles e invisibles que configuran sistemas urbanos funcionalmente integrados, pero socialmente fragmentados, haciendo perceptible la desigualdad transfronteriza en el plano conceptual y en su materialidad territorial.

En este sentido, la frontera Ciudad Juárez–El Paso deja de concebirse como una línea divisoria para entenderse como un sistema regional desigual, donde políticas nacionales, cadenas globales de producción y condiciones locales de vida producen paisajes de radiancia simultáneamente integrados y fragmentados. La radiancia nocturna se consolida, así como un instrumento analítico que permite mapear y problematizar la producción de territorios urbanos atravesados por desigualdades espaciales.



CONCLUSIONES

Las técnicas de suavizado aplicadas —umbral mínimo, filtro gaussiano, media móvil y percentil— incrementan la utilidad analítica de los datos VIIRS-DNB en contextos urbanos fronterizos, sin introducir distorsiones relevantes ($RMSE \leq 3 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$). La elección del método constituye también una decisión analítica: el umbral mínimo es útil para delimitar nodos de alta intensidad, mientras que el percentil 50 resulta adecuado para analizar heterogeneidad de radiancia al conservar jerarquías y contrastes relevantes para discutir fragmentación urbana. En conjunto, los resultados respaldan el uso de VIIRS-DNB como un insumo ágil para describir asimetrías territoriales en regiones transfronterizas y observar respuestas diferenciadas ante choques como la pandemia.

Más allá de la validación metodológica, el análisis ofrece una lectura exploratoria de la desigualdad en la demarcación Ciudad Juárez–El Paso. Los patrones descritos son compatibles con un urbanismo fragmentado (Graham y Marvin, 2001), en el que la radiancia puede leerse como huella material de jerarquías territoriales. La divergencia entre la resiliencia observada en zonas maquiladoras de Ciudad Juárez y la contracción en corredores logísticos de El Paso tras la pandemia de COVID-19 sugiere asimetrías persistentes vinculadas a estructura productiva y respuestas institucionales diferenciadas. Asimismo, la heterogeneidad en áreas residenciales —desde espacios de baja radiancia hasta enclaves comparables a zonas comerciales— traza un mapa de contrastes que puede asociarse con diferenciación socioeconómica y desigualdad en provisión de equipamiento urbano.

Una limitación deliberada del estudio fue no incorporar indicadores socioeconómicos directos que permitan atribuir mecanismos causales a los patrones observados. Esta decisión refuerza la aportación central: la radiancia nocturna no sustituye los datos tradicionales, sino que funciona como proxy para lectura regional y generación de hipótesis. En ese sentido, la baja radiancia en periferias como Anapra (norponiente) o la alta en cruces como Paso del Norte–Santa Fe (centro) constituyen indicios espaciales de un territorio fragmentado, cuya explicación requiere evidencia adicional.

Implicaciones para política pública

Los hallazgos apuntan a la equidad lumínica como objetivo de intervención y a la necesidad de integrar seguridad vial/peatonal y criterios de reducción de impactos lumínicos en el diseño urbano. En términos operativos, se sugieren cuatro líneas de acción derivadas de indicadores de radiancia:



1. Priorizar colonias periféricas con baja radiancia (percentiles bajos) para inversión y mantenimiento de alumbrado.
2. Realizar auditorías en nodos fronterizos y corredores de alta intensidad (percentiles altos) para equilibrar operación, seguridad y mitigación de efectos lumínicos.
3. Monitorear cambios anuales en corredores industriales y logísticos para identificar reconfiguraciones de actividad y ajustar políticas de movilidad y servicios.
4. Incorporar indicadores de radiancia y gradientes centro-periferia en planes urbanos y, cuando sea viable, en agendas binacionales de infraestructura y espacio público.

En términos de investigación, una ruta inmediata consiste en integrar datos sociodemográficos, para contrastar las hipótesis aquí planteadas, así como desarrollar métricas híbridas que combinen radiancia con variables económicas, ambientales y de seguridad. El aporte del estudio radica en mostrar cómo la radiancia nocturna puede apoyar diagnósticos regionales en contextos de información limitada y abrir líneas de investigación comparativa sobre desigualdad urbana en regiones transfronterizas.

REFERENCIAS

- Aisy, R. R., Iriawan, N., Irhamah, I., Fithriasari, K., y Citraningrum, M. (2023). Electricity Availability Modeling Through Night Time Light Data Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (NTL VIIRS) Using Poisson Point Process in South Sumatera. 2023 8th International Conference on Information Technology and Digital Applications (ICITDA), 1–7. doi: <https://doi.org/10.1109/ICITDA60835.2023.10427028>
- Ajmar, A., Arco, E., y Eusebio, A. (2022). The VIIRS Nighttime Lights average annual global dataset: exploratory and brisk trend analysis on three different domains. 2022 IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), 454–459. doi: <https://doi.org/10.1109/MELECON53508.2022.9842930>



- Bagan, H., y Yamagata, Y. (2015). Analysis of urban growth and estimating population density using satellite images of nighttime lights and land-use and population data. *GIScience & Remote Sensing*, 52(6), 765–780. doi: <https://doi.org/10.1080/15481603.2015.1072400>
- Bennie, J., Davies, T. W., Duffy, J. P., Inger, R., y Gaston, K. J. (2014). Contrasting trends in light pollution across Europe based on satellite observed nighttime lights. *Scientific Reports*, 4(1), 3789. doi: <https://doi.org/10.1038/srep03789>
- Chaparro, I., y Hernández, V. (2020). La reconfiguración de los subcentros de empleo en Ciudad Juárez, Chihuahua, 2004-2014. *región y sociedad*, 32, e1268. doi: <https://doi.org/10.22198/rys2020/32/1268>
- Chen, X. (2014). Making Visible the Invisible: Nighttime Lights Data and the Closing of the Human Rights Information Gap. *Societies Without Borders*, 9(1), 211–223. Recuperado de <https://scholarlycommons.law.case.edu/swb/vol9/iss1/6/>
- Chen, X., Zhang, F., Du, Z., y Liu, R. (2020). An Unsupervised Urban Extent Extraction Method from NPP-VIIRS Nighttime Light Data. *Remote Sensing*, 12(22), 3810. doi: <https://doi.org/10.3390/rs12223810>
- City of El Paso Open Data. (2025). *City Limits [Shapefile]*. Recuperado de <https://City-of-El-Paso-Open-Data-Coepgis.Hub.Arcgis.Com/Search?Tags=-boundaries>
- Coscieme, L., Sutton, P.C., Anderson, S., Liu, Q., y Elvidge, C.D. (2017) Dark Times: nighttime satellite imagery as a detector of regional disparity and the geography of conflict, *GIScience & Remote Sensing*, 54(1), 118-139. doi: <https://doi.org/10.1080/15481603.2016.1260676>
- Davis, M. (1990). *City of Quartz. Excavating the Future in Los Angeles*. London-New York: Verso.
- Doria, V. E. M., Amaral, S., y Monteiro, A. M. V. (2016). Estimativa e distribuicao espacial de populacao urbana com imagens de satelites de luzes noturnas: um estudo para a regio metropolitana de Sao Paulo, Brasil, com o sensor visible/Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS). *Geografia*, 41(3), 527–548. Recuperado de <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/12650>



Earth Observation Group, P. I. for P. P. (2021). *NOAA/VIIRS/DNB/MONTHLY_V1/VCMSLCFG [Dataset]*. Google Earth Engine. Recuperado de https://Developers.Google.Com/Earth-Engine/Datasets/Catalog/NOAA_VIIRS_DNB_MONTHLY_V1_VCMSLCFG.

Ebbensgaard, C. L. (2019). Making sense of diodes and sodium: Vision, visibility and the everyday experience of infrastructural change. *Geoforum*, 103, 95–104. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2019.04.009>

Elvidge, C. D., Baugh, K., Zhizhin, M., Hsu, F. C., y Ghosh, T. (2017). VIIRS night-time lights. *International Journal of Remote Sensing*, 38(21), 5860–5879. doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1342050>

Foucault, M. (2002). *Vigilar y castigar: nacimiento de la prisión*. Buenos Aires: Siglo XXI Editores Argentina.

Fuentes, C. (2001). Los cambios en la estructura intraurbana de Ciudad Juárez, Chihuahua, de monocéntrica a multicéntrica. *Frontera norte*, 13(25), 95–118. doi: <https://doi.org/10.17428/rfn.v13i25.1377>

Fuentes, C. (2022). El comercio transfronterizo al menudeo entre Ciudad Juárez, Chihuahua y El Paso, Texas [Cross-border retail trade between Ciudad Juárez, Chihuahua and El Paso, Texas]. *Estudios Fronterizos*, 23, e093. doi: <https://doi.org/10.21670/ref.2209093>

Fuentes, C., y Hernandez, V. (2014). Housing finance reform in Mexico: the impact of housing vacancy on property crime. *International Journal of Housing Policy*, 14(4), 368–388. doi: <https://doi.org/10.1080/14616718.2014.955332>

Fuentes, C., y Peña, S. (2010). Globalization and its Effects on the Urban Socio-Spatial Structure of a Transfrontier Metropolis: El Paso, TX-Ciudad Juárez, Chih.-Sunland-Park, NM. En K. Staud, C. Fuentes, y J. Monárrez (Eds.), *Cities and Citizenship at the U.S.-Mexico Border: The Paso del Norte Metropolitan Region* (pp. 93–117). New York: PALGRAVE MACMILLAN.

Goldblatt, R., Stuhlmacher, M. F., Tellman, B., Clinton, N., Hanson, G., Georgescu, M., Wang, C., Serrano-Candela, F., Khandelwal, A. K., Cheng, W.-H., y Balling, R. C. (2018). Using Landsat and nighttime lights for supervised pixel-based image classification of urban land cover. *Remote Sensing of Environment*, 205, 253–275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.026>



Graham, S., y Marvin, S. (2001). *Splintering Urbanism: Networked Infrastructures, Technological Mobilities and the Urban Condition*. London: Routledge.

Grasso, R. (2021). Gaussian Process Latent Variable Models Applied to Study Maritime Traffic Patterns from VIIRS Data. 2020 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 1447–1451. doi: <https://doi.org/10.23919/Eusipco47968.2020.9287521>

He, C., Shi, P., Li, J., Chen, J., Pan, Y., Li, J., Zhuo, L., y Ichinose, T. (2006). Restoring urbanization process in China in the 1990s by using non-radiance-calibrated DMSP/OLS nighttime light imagery and statistical data. *Chinese Science Bulletin*, 51(13), 1614–1620. doi: <https://doi.org/10.1007/s11434-006-2006-3>

Hessel, C., Morel, J.-M., de Franchis, C., von Gioi, R. G., y Coquet, T. (2023). A-Contrario Detection of Hot Sources in Night-Time Viirs Images. IGARSS 2023 - 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 6557–6560. doi: <https://doi.org/10.1109/IGARSS52108.2023.10282608>

Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP). (2025). Zonificación secundaria, Ciudad Juárez, Instituto Municipal de Investigación y Planeación. Recuperado de <https://www.imip.org.mx/pdus2040/documento/zonificacion.pdf>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Marco Geoestadístico Nacional: Chihuahua [Conjunto de datos geoespaciales]*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?Upc=889463932541>.

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., y Elvidge, C. D. (2020). Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111443. doi: <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.111443>

Listyawati, R. N., Prasetyo, P., y Nurtjahjaningtyas, I. (2024). VIIRS Night-Time Light Image in the Spatial Structure Identification of Banyuwangi Regency. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1353(1), 012038. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1353/1/012038>

Liu, P., Wang, Q., Zhang, D., y Lu, Y. (2020). An Improved Correction Method of Nighttime Light Data Based on EVI and WorldPop Data. *Remote Sensing*, 12(23), 3988. doi: <https://doi.org/10.3390/rs12233988>



- Ma, T., Zhou, C., Pei, T., Haynie, S., y Fan, J. (2012). Quantitative estimation of urbanization dynamics using time series of DMSP/OLS nighttime light data: A comparative case study from China's cities. *Remote Sensing of Environment*, 124, 99–107. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.018>
- Ma, W., y Li, P. (2018). An Object Similarity-Based Thresholding Method for Urban Area Mapping from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day/Night Band (VIIRS DNB) Data. *Remote Sensing*, 10(2), 263. doi: <https://doi.org/10.3390/rs10020263>
- McDonald, Y. J., y Grineski, S. E. (2012). Disparities in access to residential plumbing: a binational comparison of environmental injustice in El Paso and Ciudad Juárez. *Population and Environment*, 34(2), 194–216. doi: <https://doi.org/10.1007/s11111-011-0154-0>
- Meza, J. (2023). Coparmex busca tratar falta del alumbrado público en zonas de Juárez. *El Heraldo de Juárez*. Recuperado de <https://oem.com.mx/elheraldodejuarez/local/coparmex-busca-tratar-falta-del-alumbrado-publico-en-zonas-de-juarez-19006076>
- Millán López, A. J., y Guizar, I. (2024). Imágenes satelitales y COVID-19: Predicción de contagios a través de la luminosidad nocturna. *Análisis Económico*, 39(101), 181–196. doi: <https://doi.org/10.24275/uam/azc/dcsh/ae/2024v39n101/Millan>
- Pandey, B., Brelsford, C., y Seto, K. C. (2022). Infrastructure inequality is a characteristic of urbanization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(15). doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2119890119>
- Peach, J. T., y Williams, J. D. (1994). Demographic change in the El Paso–Juárez–Las Cruces region. *Estudios Fronterizos*, 34, 117–138. doi: <https://doi.org/10.21670/ref.1994.34.a05>
- Pløger, J. (2008). Foucault's dispositif and the city. *Planning Theory*, 7(1), 51–70. doi: <https://doi.org/10.1177/1473095207085665>
- Rueda-Espinosa, K. J., Guerrero-Guio, A. F., Vargas-Dominguez, S., Vinasco-Téllez, M., y Goez-Therán, C. (2023). Iluminando la amenaza: análisis de una década de contaminación lumínica en los principales centros urbanos de Colombia mediante imágenes satelitales. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 47(183), 242–258. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1867>



- Soja, E. (2014). *En busca de la justicia espacial*. Valencia. Tirant Humanidades.
- Staudt, K., y Vera, B. (2006). Mujeres, políticas públicas y política: los caminos globales de Ciudad Juárez, Chihuahua-El Paso, Texas. *región y sociedad*, 18(37). doi: <https://doi.org/10.22198/rys.2006.37.a593>
- Stokes, E. C., y Seto, K. C. (2019). Characterizing urban infrastructural transitions for the Sustainable Development Goals using multi-temporal land, population, and nighttime light data. *Remote Sensing of Environment*, 234, 111430. doi: <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.111430>
- Wacquant, L. (2007). *Los condenados de la ciudad. Gueto, periferias y Estado*. Buenos Aires: Siglo XXI Editores Argentina.
- Wood, A. (2001). Anticipating the Colonias: Popular Housing in El Paso and Ciudad Juárez, 1890-1923. *Journal of the Southwest*, 43(4), 493-504.
- Yadav, A., y Kumari, R. (2024). Gender safety perspective in urban planning: The case of pedestrian mobility in Kanpur city. *Cities*, 147, 104845. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104845>
- Zhang, Q., y Seto, K. (2013). Can Night-Time Light Data Identify Typologies of Urbanization? A Global Assessment of Successes and Failures. *Remote Sensing*, 5(7), 3476-3494. doi: <https://doi.org/10.3390/rs5073476>
- Zhang, Q., Wang, P., Chen, H., Huang, Q., Jiang, H., Zhang, Z., Zhang, Y., Luo, X., y Sun, S. (2017). A novel method for urban area extraction from VIIRS DNB and MODIS NDVI data: a case study of Chinese cities. *International Journal of Remote Sensing*, 38(21), 6094-6109. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1339927>
- Zheng, Y., Tang, L., y Wang, H. (2021). An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI. *Journal of Cleaner Production*, 328, 129488. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129488>
- Zhou, Y., Ma, T., Zhou, C., y Xu, T. (2015). Nighttime Light Derived Assessment of Regional Inequality of Socioeconomic Development in China. *Remote Sensing*, 7(2), 1242-1262. <https://doi.org/10.3390/rs70201242>