



Análisis de la movilidad poblacional inter e intramunicipal mediante Luces Nocturnas (DMSP/OLS y NPP/VIIRS): Aplicación metodológica al caso del huracán Otis en Guerrero

Analysis of Inter- and Intramunicipal Population Mobility Using Night Lights (DMSP/OLS and NPP/VIIRS): Methodological Application to Hurricane OTIS in Guerrero

Andrés Jerson Millán López
jerson.millan@cucea.udg.mx
Universidad de Guadalajara
ORCID: 0000-0003-4112-8302

Hiram Abel Ángel Lara
hiram.angel@cucea.udg.mx
Universidad de Guadalajara
ORCID: 0000-0003-1802-4206

Resumen

El uso de luces nocturnas como proxy para la movilidad humana es una herramienta complementaria para entender y monitorear los flujos poblacionales al nivel microrregional. Los datos obtenidos a través de los sensores DMSP/OLS (Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System) y NPP/VIIRS (National Polar-orbiting Partnership/Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) permiten una observación precisa de la luminosidad nocturna desde el punto de vista geográfico, la cual se ha correlacionado con la densidad poblacional para analizar patrones de evolución espacio-temporal de los flujos de población inter e intramunicipales en el estado de Guerrero. La metodología utilizada estima la migración de corto plazo de la población en dos escenarios: antes y después del huracán Otis, y en distintos niveles de desagregación geográfica. Los resultados obtenidos evidencian un impacto significativo en los flujos de movilidad poblacional debido al huracán, manifestado por la disminución de luces nocturnas en los municipios costeros en comparación con los del interior del estado. En particular, el modelo predice que los municipios costeros más afectados, como Petatlán, Acapulco de Juárez, Tecpan de Galeana, Benito Juárez y Coyuca de Benítez, experimentaron una disminución conjunta de su población total, estimada entre 11 886 y 12 621 personas.

Palabras clave: migración, imágenes satelitales, movilidad poblacional, luces nocturnas, huracanes, NPP/VIIRS, DMSP/OLS.

Abstract

The use of night lights as a proxy for human mobility is a complementary tool to understand and monitor population flows at a microregional level. Data obtained through the DMSP/OLS (Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System) and NPP/VIIRS (National Polar-orbiting Partnership/Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) sensors provide precise geographic observations of nighttime luminosity, which has been correlated with population density to analyze spatiotemporal patterns of inter- and intramunicipal population flows in the state of Guerrero. The methodology estimates short-term population migration under two scenarios: before and after Hurricane Otis, at various levels of geographic disaggregation. The results demonstrate a significant impact on population mobility flows due to Hurricane Otis, evidenced by a reduction in night lights in coastal municipalities compared to those inland. Specifically, the model predicts that the most affected coastal municipalities, such as Petatlán, Acapulco de Juárez, Tecpan de Galeana, Benito Juárez, and Coyuca de Benítez, experienced a combined decrease in total population, estimated between 11,886 and 12,621 people.

Keywords: migration, satellite imagery, population mobility, night lights, hurricanes, NPP/VIIRS, DMSP/OLS.

JEL Classification: R23, Q54, C01

Fecha de recepción: 12 de noviembre de 2024.

Fecha de aceptación: 20 de enero de 2025.

1. Introducción

En la primera década del presente siglo, el uso de datos de luces nocturnas ha emergido como una herramienta poderosa para el análisis de la movilidad humana y la distribución poblacional, así como para la observación de la dinámica de la actividad humana con aplicaciones concretas en la demografía, el urbanismo y la economía (Elhors, 2010). Actualmente, han surgido aplicaciones concretas, en particular en estudios de migración, especialmente en el análisis de desplazamientos forzados de núcleos de población causados por fenómenos meteorológicos de grandes dimensiones como los huracanes. Estos datos son obtenidos principalmente a través de los sensores DMSP/OLS (Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System) y NPP/VIIRS (National Polar-orbiting Partnership/Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), que permiten una observación detallada y continua de la luz proyectada por las ciudades al espacio exterior al nivel global, comúnmente conceptualizada en la literatura como luces nocturnas o luminosidad.

Recientemente, estudios como los de Bagan y Yamagata (2015), Lu et al., (2021) y Liu et al. (2022) han planteado la correlación entre la luminosidad y la densidad poblacional, demostrando estadísticamente que es un proxy efectivo para estudiar patrones de evolución espaciotemporal de los flujos de población, especialmente en regiones donde los datos demográficos tradicionales pueden ser escasos o desactualizados.

Algunos casos de aplicabilidad de estas metodologías en estudios demográficos se han expuesto bajo escenarios de eventos disruptivos, por ejemplo, el del huracán María en Puerto Rico desarrollados por Román et al. (2019) y Huang et al., (2019), en áreas propensas a huracanes en las costas del Atlántico y del Golfo de Estados Unidos. Estos trabajos, además de identificar consecuencias diversas cuando ocurren estos fenómenos, también robustecen la fiabilidad de los estudios que se realizan bajo los enfoques de análisis de luminosidad, como por ejemplo el de Román et al. (2019); en este no solo identificaron que los desastres son mayores, más frecuentes, con impactos de larga duración y que la densidad poblacional determina el nivel de vulnerabilidad en los espacios urbanos, sino también que “dan forma a las disparidades en la capacidad de resiliencia de las comunidades”. Además, estos autores señalan que los “datos satelitales se pueden utilizar para mapear de manera confiable y precisa la electricidad en tiempo real” (2019, p. 1), así como la restauración de los cortes eléctricos después de un

desastre. Por su parte, a través de las luces, Huang et al. (2019) pudieron identificar el proceso de crecimiento urbano en zonas costeras propensas a huracanes y su vulnerabilidad. Ambos estudios nos permiten validar que la metodología de análisis de luminosidad y densidad poblacional puede servir para identificar el desplazamiento de poblaciones después de un huracán, en tanto que el restablecimiento de la energía eléctrica en zonas golpeadas por estos fenómenos naturales pueden ser un indicativo de la permanencia de un grupo poblacional en una zona de desastre natural: allí donde la luminosidad desaparece parcialmente o por completo, probablemente se deba a que el grupo familiar se ha movido dado que su hogar ha desaparecido y no puede permanecer en él. Si la luminosidad regresa a los niveles previos al huracán puede asumirse que las familias permanecen en sus hogares y no han sido desplazadas de forma forzada.

México se encuentra en una región particularmente vulnerable al impacto de huracanes y tormentas tropicales, como lo muestran Pielke et al. (2003), quienes identifican mayor probabilidad de ocurrencia de huracanes en regiones más alejadas del Ecuador, por ejemplo, el aumento alcanza hasta un “20% al noroeste de Bahamas”. Dentro de las zonas de riesgo la costa occidental del Golfo de México es considerada zona de riesgo moderado (entre el 5% y 10% de probabilidad de impacto anual) y la costa de la Bahía de Campeche, una zona de menor riesgo (entre el 1% y el 5% de probabilidad de impacto). Sin embargo, estos comportamientos no siempre son constantes, sino que pueden modificarse a lo largo del tiempo y convertir a estos lugares en más o menos activos por factores asociados con “las temperaturas de las superficies del mar, los patrones de circulación atmosférica y las series temporales de los propios huracanes” (Pielke et al., 2003, p. 103). Esto explica la aparición de fenómenos meteorológicos imprevistos con un potencial devastador, como fue el caso del huracán Otis, que afectó la costa de Guerrero, México, en el Océano Pacífico en octubre de 2023.

El estado de Guerrero presenta una geografía diversa y una dinámica poblacional compleja, derivadas de las condiciones socioeconómicas que posee, existiendo geográficamente distintos puntos del estado susceptibles a huracanes. Romero y León Cruz (2023) lo han identificado con una probabilidad de ocurrencia de al menos una tormenta tropical durante la temporada de huracanes. De acuerdo con su clasificación, es parte de las zonas de rango alto y con índices de peligro que varían de alto a muy alto, coexistiendo con zonas costeras con índices de peligro de huracanes bajo. En cuanto a sus niveles de vulnerabilidad, Guerrero se encuentra entre los estados considerados altamente vulnerables por contar con alto

porcentaje de viviendas consideradas como endeble, altos niveles de analfabetismo y bajo acceso a educación posbásica y a servicios de salud, con un porcentaje importante de población menor de 5 años y mayor de 65, y una mayor porción de población femenina.

Dado el incremento de fenómenos meteorológicos de gran envergadura —como huracanes y tormentas tropicales— se vuelve perentorio identificar sus efectos sobre los movimientos de población y el desplazamiento de personas. Por ello, este estudio se centra en la evaluación de la movilidad poblacional inter e intramunicipal en Guerrero, utilizando datos de luminosidad nocturna para identificar y cuantificar estos flujos. Para ello se aplican técnicas de análisis espacial y temporal a fin de correlacionar la luminosidad con la densidad poblacional, permitiendo así una comprensión detallada de cómo los eventos climáticos extremos influyen en la movilidad humana. Los resultados de este análisis no solo muestran un impacto significativo del huracán Otis en los municipios costeros, evidenciado por una disminución notable en la luminosidad, sino que también predicen una disminución poblacional significativa en áreas específicas.

Consideramos que el análisis de eventos extremos como el huracán Otis ofrece una oportunidad para obtener información que permita identificar la relación entre desastres naturales de gran envergadura y el desplazamiento y la distribución de la población en el corto plazo. Los cambios en la luminosidad nocturna antes y después del huracán proporcionan una medida indirecta pero reveladora de las alteraciones en los patrones de asentamiento y migración de los habitantes, lo cual resulta útil para predecir los movimientos poblacionales ocasionados por desastres o fenómenos naturales.

Es importante mencionar que incluso instancias como el Internal Displacement Monitoring Centre (IDMC) no reportan datos de desplazamientos por desastres naturales, mostrando solo datos de viviendas destruidas, un indicador que no refleja todo el espectro de situaciones de desplazamiento por desastres, en particular aquellas en las que las personas se ven obligadas a abandonar sus viviendas, aunque no se hayan visto afectadas estructuralmente.

Por lo anterior, el uso de luces nocturnas como proxy para medir la movilidad poblacional cobra una relevancia significativa en México.

2. Algunas consecuencias del huracán Otis sobre la zona afectada

Las consecuencias de un huracán son diversas y afectan los asentamientos humanos en distintas magnitudes, debido a la intensidad del evento,¹ los niveles de vulnerabilidad de las comunidades afectadas (Romero y León Cruz, 2023), las previsiones previas a su impacto al tocar tierra y la capacidad de resiliencia de la población que ha sido afectada. El huracán Otis tocó tierra el 25 de octubre de 2023 en la costa del Pacífico, y tuvo algunas características que lo hicieron único en relación con otros huracanes que lo precedieron. En primer lugar, fue considerada como una de las tormentas más fuertes dentro de los registros históricos. En segundo lugar, la velocidad de transformación de tormenta tropical a un huracán de categoría 5 en un poco más de 12 horas, sorprendió a las comunidades costeras, no permitiéndoles tomar acciones de prevención, generando así un mayor impacto.

Según datos de Unicef (2023) la región afectada por Otis dejó más de un millón de personas con necesidades de atención humanitaria en siete municipalidades de Guerrero, de los cuales 323 mil fueron niños; algún tipo de afectación en 273,844 hogares; 4685.20 ha del área costera afectadas; 865 km de carreteras con daños; 2287.3 ha construidas, entre los que encontraron 120 hospitales en la ciudad de Acapulco, 33 escuelas en el estado y el 80% de la infraestructura hotelera. Por otra parte, algunos estudios como el de Zea Ortiz et al. (2024) identificaron que, después del paso del huracán, hubo un incremento en los niveles de pobreza de la entidad (ya de por sí considerada una de las más pobre del país), debido a un grave deterioro en la calidad y los espacios de la vivienda en las zonas que fueron afectadas. La afectación fue mayor en las comunidades más pobres y en los espacios con mayor densidad de población.

Es normal esperar que, en el corto, mediano o largo plazos, el daño en las viviendas después de un desastre natural lleve a sus habitantes a desplazarse de sus hogares por ser inhabitables, o encontrarse en zonas de riesgo por potenciales derrumbes en el entorno o ante otro tipo de afectaciones directas a la propiedad. El desplazamiento también puede deberse a afectaciones o destrucción de las fuentes de empleo. Por ejemplo, en zonas turísticas como en la ciudad de Acapulco o la costa de Guerrero, daños a la infraestructura hotelera implican la pérdida

¹ La intensidad de huracán se mide en la escala Saffir-Simpson a partir de las velocidades de vientos sostenidos por un minuto. Una tormenta tropical alcanza al menos vientos de 63km/h y los huracanes como mínimo de 118km/h (Romero y León Cruz, 2023).

de trabajos para la población, que en un mediano plazo llevará a que se desplacen a zonas donde puedan encontrar un nuevo empleo.

Por lo anterior, sabemos que los huracanes son, con mayor frecuencia, el origen de grandes desplazamientos humanos. Por ello, en este trabajo proponemos el análisis de las luces nocturnas como una herramienta que permita relacionar la ocurrencia de un desastre natural con la posibilidad de movilidad humana.

3. Aplicaciones y uso de datos satelitales ante eventos disruptivos

Desde hace algunos años ha surgido una corriente interesante de estudios que a través del uso de luces nocturnas analizan los asentamientos humanos antes y después de la ocurrencia de un huracán, como una herramienta útil que puede ayudar a medir el comportamiento de los desplazamientos y las movilidades humanas después de un fenómeno meteorológico de gran intensidad.

Un ejemplo de lo anterior es el trabajo de Huang et al. (2019), quienes mediante el uso de datos de luces nocturnas (*Night Time Lights*, NTL) del sistema DMSP/OLS, analizaron el comportamiento de asentamientos humanos en áreas con distintos niveles de exposición a huracanes entre 1992 y 2013 en la zona conocida como el North Atlantic Basin. Estos autores encontraron diferencias en la dinámica de los asentamientos humanos en las zonas norte-sur e interior-costas, así como que la extensión y la tasa de incremento de los asentamientos humanos se correlacionaban positivamente con los niveles de exposición a huracanes. Esto destaca la necesidad de prestar mayor atención a la resiliencia costera en áreas de alta exposición a huracanes.

Por su parte, Zhao et al. (2020) modelaron y analizaron las observaciones de la luminosidad nocturna (NTL) capturadas por el sensor VIIRS del Suomi National Polar-orbiting Partnership (S-NPP) en el caso de los huracanes Irma y María en Puerto Rico. Observaron cambios significativos en la luminosidad y monitorearon la recuperación de los asentamientos humanos posterior al desastre. Siguiendo con esta línea relacionada con la resiliencia y la recuperación de los asentamientos humanos afectados por huracanes, Zheng et al. (2019) encontraron fuertes correlaciones entre la densidad de la luz NTL y la densidad poblacional ($R^2 = 0.83$) al nivel de prefectura (municipio). Además, desarrollaron un método para predecir la población afectada, logrando una precisión del 83.2% en la detección de la población afectada, e identificando una tasa de recuperación

a situaciones pretifón del 86.9% en la tercera semana posterior al mismo. Este estudio demuestra que el método de detección de cambios basado en imágenes NTL es simple y efectivo para evaluar rápidamente las áreas y poblaciones afectadas por desastres de tifones y cuantificar oportunamente el grado de recuperación a gran escala espacial.

También el análisis de luz nocturna se ha utilizado para tener una medida de cuantificación de afectaciones por apagones en zonas que han sido golpeadas por un huracán, tal y como lo han analizado Cao et al. (2013), para observar el número de apagones de luz ocasionados en el área metropolitana de Washington DC, en junio de 2012, por tormentas tropicales que, sin poder ser consideradas huracanes, alcanzaron velocidades superiores a los 100km/hr, así como para cuantificar los efectos del huracán Sandy a finales de octubre de 2012 en la costa este de Estados Unidos.

También el uso de luces ha sido útil para analizar las consecuencias de otros fenómenos naturales que han tenido afectaciones sobre las poblaciones. Por ejemplo, Zhao et al. (2018) aplicaron el uso de los datos diarios del NPP-VIIRS DNB en China al nivel de ciudades para evaluar el impacto de tres tipos de desastres naturales: terremotos, inundaciones y tormentas. Los resultados fueron consistentes con los registros administrativos de consumo de electricidad y otras fuentes de imágenes satelitales, describiendo sus resultados como un instrumento robusto para detectar y evaluar el impacto de eventos desastrosos a corto plazo.

Respecto a otros tipos de eventos disruptivos, recientemente se han realizado estudios que analizan los efectos de la pandemia de SARS-CoV-2 utilizando diversas variables relacionadas con la actividad humana aproximadas mediante el uso de luces nocturnas. Estos estudios han demostrado que la reducción de la actividad económica y humana durante los confinamientos se reflejó en los cambios en la luminosidad nocturna observada desde el espacio. Por ejemplo, Venter et al. (2020), Xu et al. (2021), Beyer et al. (2023), Elvidge et al. (2020) y Millán (2021) han investigado diferentes aspectos del impacto de la pandemia en las actividades humanas identificando al cambio en las luces nocturnas como una herramienta robusta y eficiente para monitorear y analizar los impactos de eventos disruptivos. La capacidad de detectar cambios en tiempo real y a gran escala proporciona información valiosa para la formulación de políticas y la gestión de crisis.

4. Los datos de luces nocturnas (luminosidad) y datos poblacionales

El producto de datos NASA Black Marble proporciona mapas diarios de radiación global, centrados en asentamientos humanos con iluminación eléctrica con una cobertura espacial de 500 m² por pixel. El marco de referencia espacial para los límites del estado y municipios se definió con base en el marco geostadístico nacional, abarcando 144 localidades urbanas en 81 municipios del estado de Guerrero (INEGI, 2020).

Los datos provienen del sistema NASA “Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System” (LAADS). Los datos de luminosidad provienen del sensor VIIRS DNB en el satélite Suomi-NPP y pertenecen a la colección V001, constituyendo un producto Nivel 3 que abarca series temporales desde 2012 hasta la actualidad. Estos datos se procesan rápidamente, en un plazo de tres a horas horas después de su adquisición, gracias al sistema “Land, Atmosphere Near real-time Capability for EOS” (LANCE) de la NASA, permitiendo su uso en aplicaciones de respuesta rápida en contextos científicos diversos.

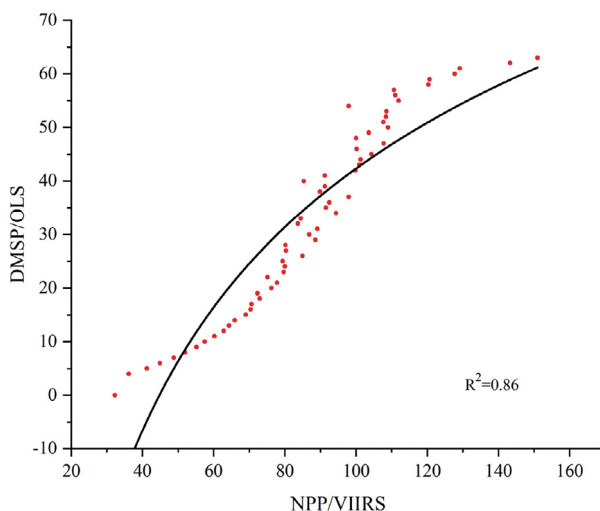
Para este estudio se recopiló información diaria de luminosidad durante la semana anterior al impacto del huracán Otis en octubre de 2023, y durante los 15 días posteriores, cuando la Comisión Federal de Electricidad (CFE) confirmó la restauración completa del servicio eléctrico. También se incluyeron datos de los días 5, 20 y 23 de diciembre de ese mismo año, seleccionando aquellos sin nubosidad. Las imágenes utilizadas son del producto NASA Black Marble VPN046, específicamente las bandas VIIRS Day/Night Band (DNB), que capturan radiancia de luz visible y son correspondientes a las plantillas H07V06 y H08V06, que cubren el área de estudio con una resolución espacial de 500 m² por pixel, geolocalizados con el sistema de coordenadas WGS84.

Se introduce también el cálculo de la densidad poblacional al nivel municipal en el estado de Guerrero, con el objetivo de correlacionar este indicador con las luces nocturnas. Para este análisis, se utilizaron datos obtenidos del sistema DMSP/OLS, cuya cobertura temporal y frecuencia anual se alinean con los años censales en México. Estudios como el de Liu et al. (2022) demuestran que ambos sensores son estadísticamente muy similares, proporcionando resultados comparables y confiables para este tipo de análisis (Gráfica 1).

El producto DMSP/OLS es gestionado por la Fuerza Aérea de Estados Unidos, la que ha estado operando satélites que circunvalan la Tierra 14 veces al día desde la década de 1970, registrando la intensidad de las luces en la superficie terrestre con sus sensores OLS. Inicialmente diseñados para detectar nubes iluminadas por la luna, estos sensores también capturan luces de asentamientos humanos como un subproducto.

Los datos son procesados por el Centro Nacional de Datos Geofísicos (NGDC) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Estos conjuntos de datos se distribuyen al público en forma de cuadrículas que reportan la intensidad de las luces como un número digital de seis bits para cada pixel de 30 segundos de arco (aproximadamente 0.86 km² en el Ecuador). La información se codifica con valores que van de 0 (sin luz) a 63 (máxima luz), permitiendo la representación de la intensidad de las luces nocturnas en cada pixel.

Imagen 2. Resultados del ajuste de regresión de luces nocturnas VIIRS y DMSP



Fuente: Liu et al. (2022).

La densidad poblacional $DenPob_j$ se calcula dividiendo la población total de cada j municipio entre su superficie en km^2 . Los datos poblacionales se obtienen del censo general de población y vivienda 2010, mientras que las superficies municipales se extraen del marco geostadístico 2010. Este indicador ofrece una medida directa de la cantidad de personas viviendo por km^2 , proporcionando un panorama claro de la distribución poblacional en Guerrero.

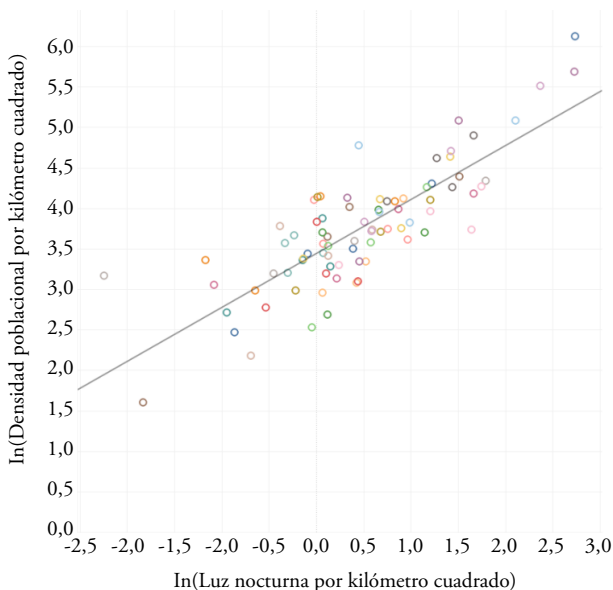
De esta forma, el indicador resultante es:

$$DenPob_j = \frac{Población\ total_j}{Superficie_j}$$

4.1 Correlación entre densidad poblacional y luces DMSP/OLS

Para explorar la relación entre la densidad poblacional y la luminosidad (luz nocturna por km^2) por DMSP/OLS se calcula el coeficiente de correlación entre los valores en su transformación logarítmica de densidad y la luminosidad registradas en los mismos municipios. Este análisis permite identificar patrones y posibles dependencias entre la densidad poblacional y las observaciones satelitales de luz. Se encontró que el coeficiente de correlación entre ambas variables es de 0.81 para el periodo analizado.

Imagen 3. Correlación entre luces nocturnas DMSP/OLS y densidad poblacional por municipio



Fuente: Elaboración propia con datos de DMSP/OLS del NGDC de la NOAA (NCEI, 2023) y el INEGI, 2020.

5. Midiendo cambios en la densidad poblacional a través de los cambios de luminosidad

Con base en la correlación establecida, se desarrolla un modelo de regresión simple para analizar cómo los cambios en la intensidad de la luz nocturna pueden predecir variaciones en la densidad poblacional al nivel municipal. Utilizando datos del sensor DMSP/OLS, el modelo incorpora la elasticidad obtenida para predecir variaciones poblacionales con las variaciones de luces captadas por NPP/VIIRS.

El propósito de este modelo es proporcionar una herramienta analítica para monitorear y prever cambios demográficos en tiempo real, empleando datos de observación satelital.

$$DenPob_j = \beta_0 + \beta_1 luminosidad_j + u_j \quad (1)$$

En este modelo, $DenPob_j$ es el logaritmo natural de la densidad poblacional del municipio j y $luminosidad_j$ es el logaritmo natural de la luz nocturna por km^2 del mismo municipio.

En este sentido, la varianza común resultante muestra qué proporción de la densidad de población se asocia con la luminosidad de los municipios y, como resultado, el predictor modela la variable estimada de la densidad poblacional (\widehat{DenPob}_j).

$$\widehat{DenPob}_j = \beta_0 + \beta_1 luminosidad_j \quad (2)$$

La elasticidad está definida por:

$$\frac{\partial DenPob_j}{\partial luminosidad} = \beta_1$$

Aquí, β_1 representa la tasa de variación de la densidad poblacional respecto a las variaciones de la luminosidad en términos porcentuales. La varianza común resultante observada por el coeficiente de determinación $\left(R^2 = 1 - \frac{SCR}{SCT}\right)$ muestra la robustez del modelo.

El tamaño de la población del municipio j se estimó multiplicando la densidad estimada en la ecuación (2) por la superficie del municipio j . Cabe mencionar que emplear la elasticidad de la regresión obtenida con base en la ecuación 1 para estimar la densidad poblacional en Guerrero requiere tomar en cuenta que las diferencias tanto tecnológicas como el procesamiento de datos pueden afectar la comparabilidad y la precisión de las estimaciones de densidad poblacional.²

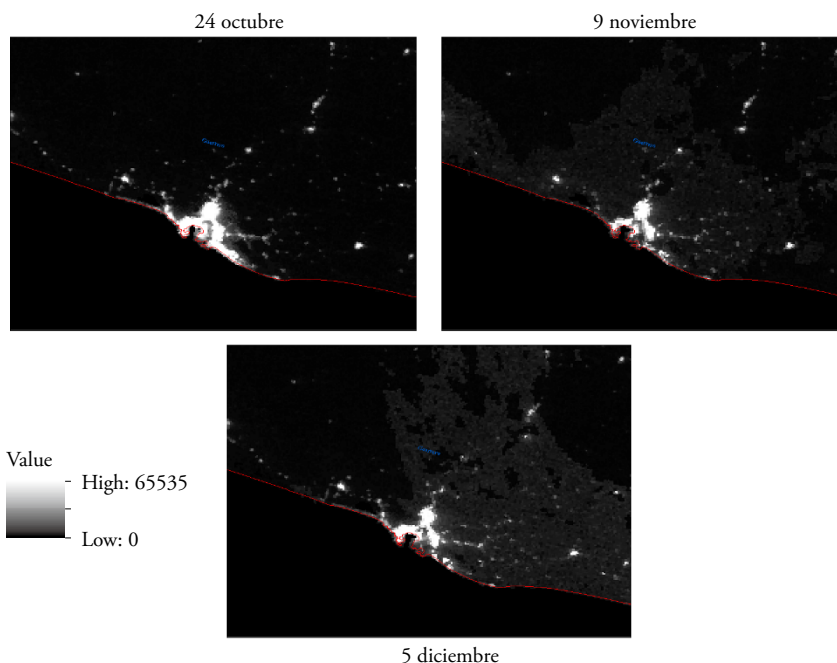
² Aunque la validación cruzada, el análisis de sensibilidad y la integración de datos adicionales podrían aumentar la precisión y la fiabilidad de los modelos predictivos basados en obser-

6. Comportamiento de las luces nocturnas por municipio en el estado de Guerrero antes, durante y después del impacto de Otis

Este apartado se enfoca en analizar el comportamiento de las luces nocturnas en los municipios del estado de Guerrero antes del impacto del huracán Otis, y en los días y meses posteriores. Para lograr esto se utilizaron datos de luminosidad, que permiten una observación detallada de las variaciones en la intensidad de la luz nocturna en diferentes periodos.

Los datos de luminosidad utilizados provienen de las imágenes satelitales NPP/VIIRS tomadas en varios puntos temporales clave: una semana antes del impacto de Otis (24 de octubre), y en fechas posteriores seleccionadas (9 de noviembre, 5, 20 y 23 de diciembre de 2023). Estos periodos fueron escogidos con el fin de capturar tanto el estado previo de la infraestructura de iluminación como las fases de recuperación y reconstrucción.

Imagen 4. Luces nocturnas desde el día cero (24 de octubre) hasta el 9 de noviembre, y los días 5, 20 y 23 de diciembre de 2023, Acapulco



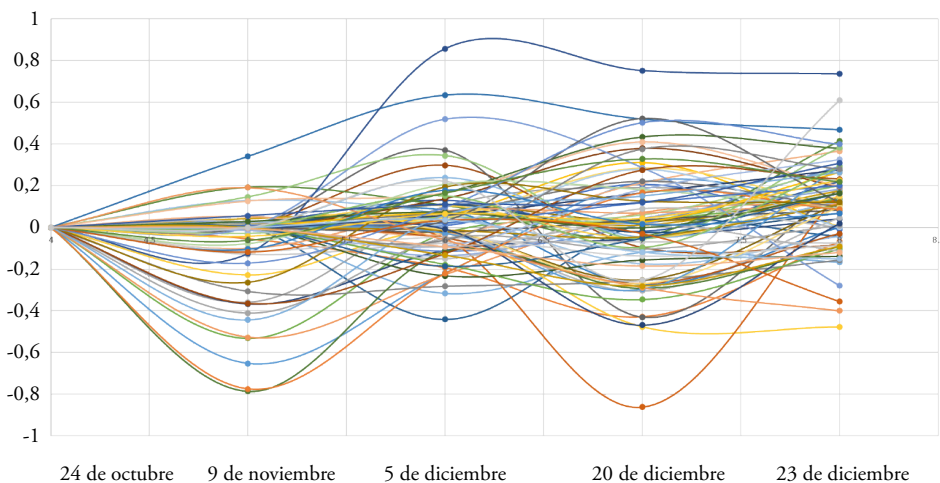
Fuente: Elaboración propia con datos de NASA Black Marble NPP/VIIRS (NASA, 2023).

vaciones satelitales, estos pasos exceden los alcances de este trabajo, quedando para futuras extensiones.

En la Imagen 4 se ilustra claramente cómo el huracán Otis afectó la iluminación eléctrica en las áreas urbanas y rurales. Las imágenes permiten observar las zonas que experimentaron pérdidas de luz y aquellas que mostraron una recuperación gradual en los días y meses siguientes.

En este mismo sentido con datos agregados al nivel municipal la Imagen 5 muestra las variaciones en la intensidad de las luces nocturnas en los municipios del estado de Guerrero, capturada en varios momentos clave alrededor del impacto del huracán Otis. El “día cero” se refiere al 24 de octubre, que es la fecha en que el huracán tocó tierra. La Imagen 5 compara la luminosidad nocturna desde esa fecha hasta el 9 de noviembre, y luego en los días 5, 20 y 23 de diciembre de 2023.

Imagen 5. Cambios en las luces nocturnas desde el día cero (24 de octubre) hasta el 9 de noviembre, y los días 5, 20 y 23 de diciembre de 2023, por municipio



Fuente: Elaboración propia con datos de NASA Black Marble NPP/VIIRS (NASA, 2023).

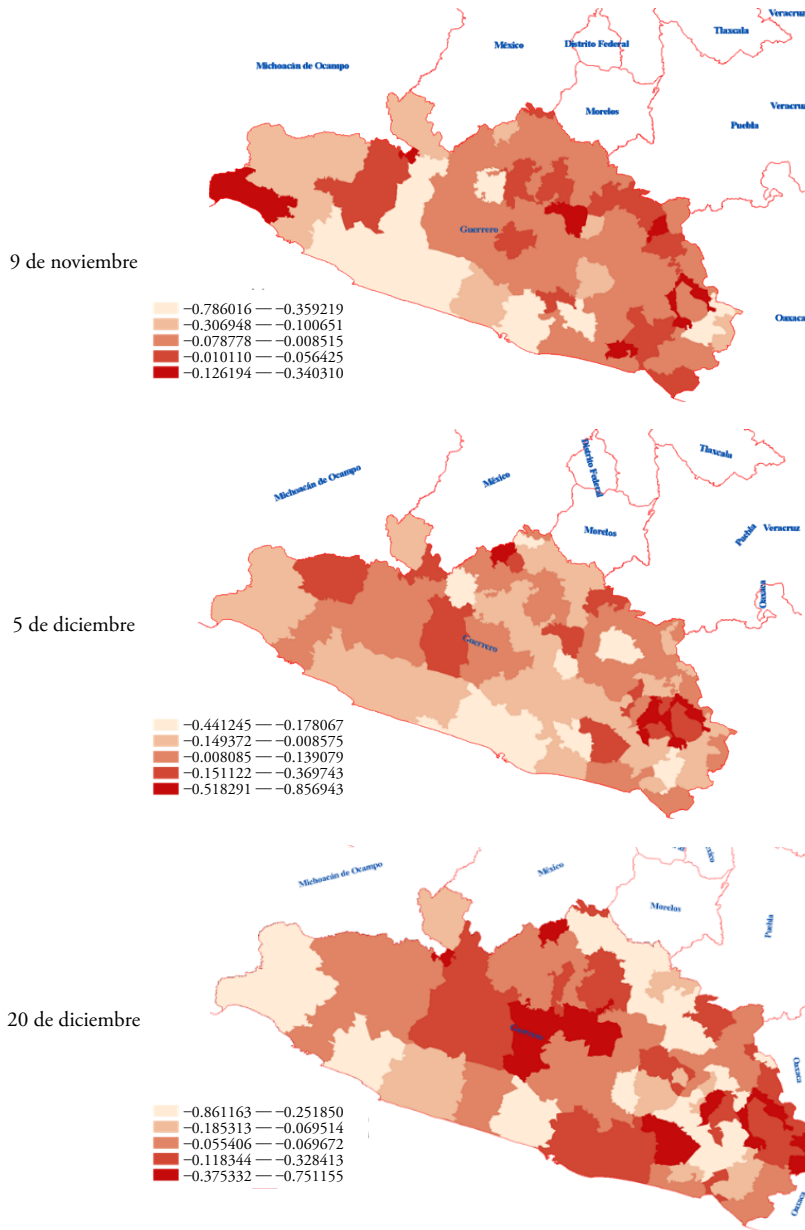
La visualización proporciona una perspectiva detallada y gradual de los cambios en los niveles de luz nocturna. Muestra los municipios que experimentaron una disminución en su proyección lumínica y aquellos que registraron un incremento en la misma. Cada línea representa un municipio, y la variación en la intensidad de la luz nocturna, partiendo del día cero, permite evaluar tanto los impactos negativos como positivos del huracán.

Partimos de un supuesto que asocia la variación en los niveles de luz nocturna con movimientos poblacionales de corto plazo observados después de que la CFE restableciera la conectividad eléctrica en las zonas afectadas. La disminución de luz en municipios costeros podría indicar una posible migración temporal hacia zonas más seguras o menos afectadas por el huracán, reflejando una baja densidad poblacional temporal debido a los impactos negativos de Otis. Por otro lado, el aumento de la luz en municipios del interior del estado podría sugerir una concentración temporal de población en áreas de refugio o de mayor actividad posdesastre. Este patrón puede observarse en el Mapa 1.

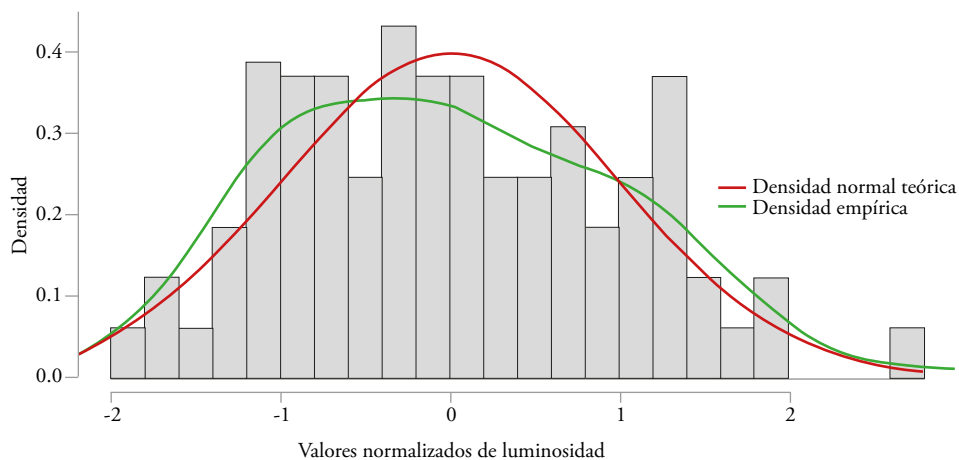
En el Mapa 1, los tonos más claros indican clústeres de cambios negativos de luminosidad en los municipios costeros, mientras que a medida que la escala de color se vuelve más oscura se destacan aquellos con cambios positivos de luminosidad. Este patrón es especialmente notable en los municipios del interior del estado, denotando un retorno de la población a medida que se restablece la infraestructura y las condiciones posdesastre.

Una visión más intuitiva del impacto en la luminosidad puede apreciarse a través de las funciones de densidad basadas en los datos de luz. Estas permiten identificar los cambios en la distribución de la luminosidad nocturna en los municipios de Guerrero. Antes del impacto, como se muestra en la Imagen 6, los datos indican que la luz nocturna se mantenía en un comportamiento relativamente normal.

Mapa 1. Cambio porcentual de luces nocturnas entre el día cero (24 de octubre) y el 9 de noviembre, 5 y 20 de diciembre del 2023, por municipio



Fuente: Elaboración propia con datos de NASA Black Marble NPP/VIIRS (NASA, 2023).

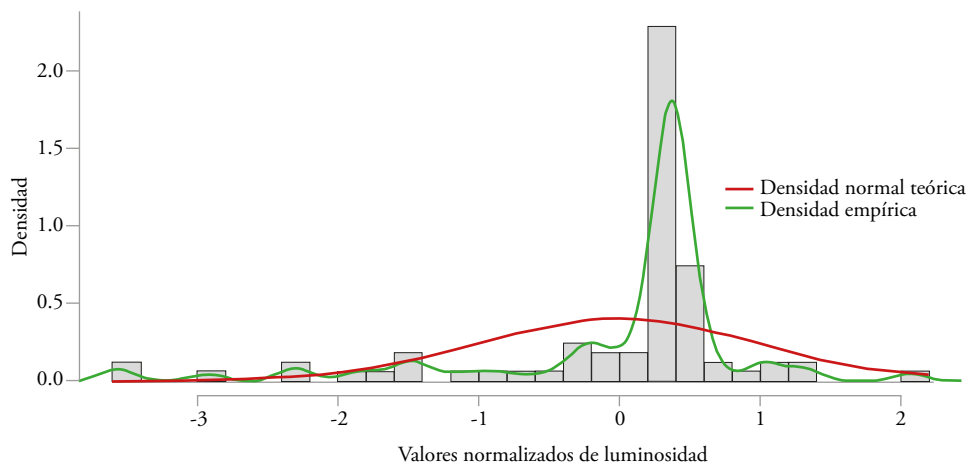
Imagen 6. Función de densidad de los cambios de luz una semana antes del impacto

Fuente: Elaboración propia con datos de NASA Black Marble NPP/VIIRS (NASA, 2023).

Sin embargo, en la Imagen 7 se observa una composición distinta de la densidad de la luz nocturna tras el huracán. La distribución tiende a una forma platocúrtica normal con varianzas máximas, extendiéndose hasta más de dos desviaciones estándar por debajo de la media en los valores negativos. Esto proporciona una medida indirecta del impacto en la infraestructura eléctrica y la actividad humana, evidenciando la magnitud del daño y la alteración en el comportamiento poblacional.

Los municipios con mayores cambios negativos son en su mayoría aquellos ubicados en la costa del estado. La Tabla 1 presenta los principales municipios afectados por el huracán Otis, clasificados según el porcentaje de cambio negativo en la luminosidad nocturna. Los municipios mostrados experimentaron una significativa disminución en la intensidad de la luz nocturna/ km^2 , lo cual puede interpretarse como un indicativo del impacto severo en la infraestructura eléctrica y la actividad humana.

Imagen 7. Función de densidad de los cambios de luz 15 días después del impacto



Fuente: Elaboración propia con datos de NASA Black Marble NPP/VIIRS (NASA, 2023).

Tabla 1. Municipios más afectados por el huracán Otis según la reducción en la luminosidad nocturna

Nombre de municipios	Cambio en la luminosidad
Petatlán	-79%
Tecoanapa	-77%
Acapulco de Juárez	-65%
Apaxtla	-53%
Benito Juárez	-53%
Tlapehuala	-44%
Tecpan de Galeana	-41%
Atoyac de Álvarez	-37%
Tlacoachistlahuaca	-36%
Ajuchitlán del Progreso	-36%
Coyuca de Benítez	-31%

Fuente: Elaboración propia con datos de NASA Black Marble NPP/VIIRS (NASA, 2023).

Los cambios de luz reportados en la tabla subrayan la magnitud de la afectación por el huracán Otis, con Petatlán, Tecoaapa y Acapulco, siendo los municipios más impactados. Las reducciones en la luminosidad nocturna reflejan tanto el grado de daño en la infraestructura como la interrupción de actividades económicas en los municipios afectados.

7. Movilidad intra e intermunicipal: resultados y predicción

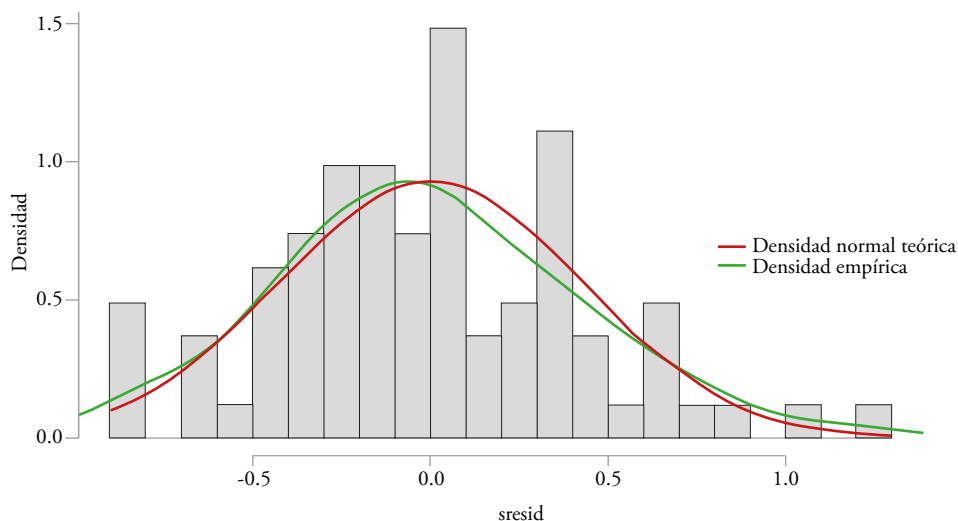
Basado en el modelo de la sección 4, los resultados permiten observar los efectos del huracán Otis en la movilidad poblacional en Guerrero. Los resultados aquí expuestos evalúan la magnitud del impacto en los cambios poblacionales basada en la pérdida y la recuperación de la infraestructura de iluminación, identificándose tanto a los municipios más vulnerables como a aquellos más resilientes, proveyendo así información para el desarrollo de estrategias de planificación y respuesta ante desastres.

De la expresión $DenPob_j = \beta_0 + \beta_1 luminosidad_j + u_j$, al resolver los valores de los estimadores beta, obtenemos la elasticidad de la densidad poblacional respecto a las variaciones de la luminosidad y su intercepto:

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.43 \\ 0.666 \end{bmatrix}$$

El valor de β_1 indica que una variación del 1% en el cambio de luces provoca un efecto en el mismo sentido del 0.66% en la densidad poblacional del municipio de referencia, con un error típico en el estimador β_1 de +/- 0.03%. El poder explicativo del modelo, observado a partir del coeficiente de determinación R^2 muestra que el 66.7% de las variaciones en la densidad poblacional son explicadas por las variaciones en la luminosidad de cada municipio.

Imagen 8. Residuos estandarizados del modelo

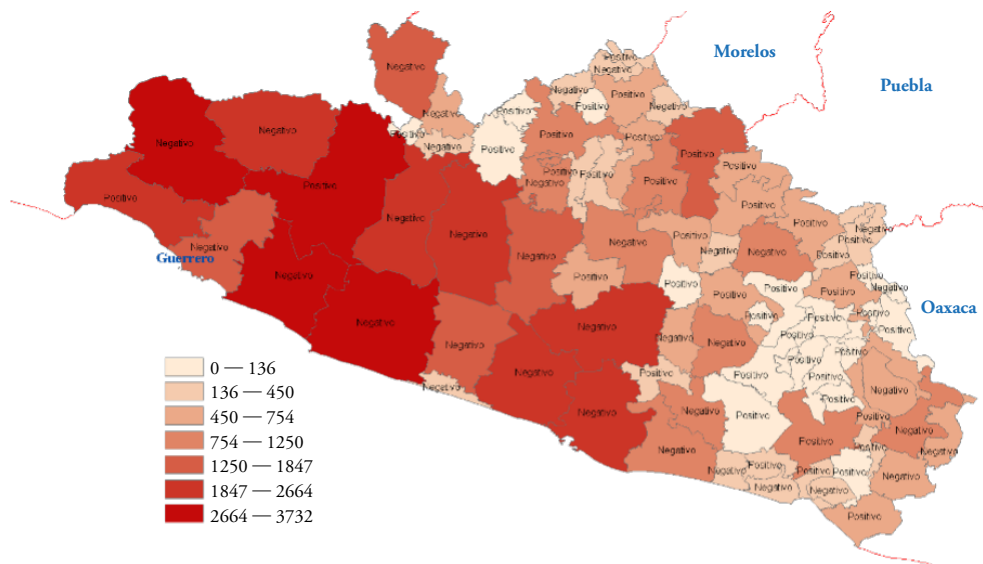


Fuente: Residuales estandarizados del modelo: NASA Black Marble NPP/VIIRS (NASA, 2023), INEGI (2020).

Estadísticamente, los estimadores del modelo cumplen con las propiedades de los mejores estimadores linealmente insesgados (MELI), ya que las pruebas estadísticas sugieren la presencia de normalidad en los errores del modelo (Jarque-Bera Test: $X\text{-squared} = 1.4053$, $df = 2$, $p\text{-value} = 0.4953$) y errores de varianza constante u homocedásticos (Breusch-Pagan test: $X\text{-squared} = 3.80$, $df = 1$, $p\text{-value} = 0.051084$). Se utilizan entonces los coeficientes estimados para predecir la población antes y luego del huracán.

El Mapa 2 ilustra los municipios que experimentaron movimientos poblacionales, indicando las entradas (positivo) y salidas (negativo) en términos del número de personas.

Mapa 2. Predicción: movilidad poblacional inter e intramunicipal y saldo del 24 octubre al 9 de noviembre 2023 por municipio



Fuente: Elaboración propia con datos de NASA Black Marble NPP/VIIRS (NASA, 2023).

En este periodo, los municipios costeros más afectados como Petatlán, Acapulco de Juárez, Tecpan de Galeana, Benito Juárez, Coyuca de Benítez tuvieron una baja estimada del conjunto de población de entre a 11 886 y 12 621 personas.

8. Conclusiones e implicaciones en el uso de toma de decisiones y política pública

El presente estudio ha demostrado la utilidad de las luces nocturnas como una herramienta complementaria para el análisis de la movilidad poblacional, incluso en situaciones de desastre. Al utilizar datos de los sensores DMSP/OLS y NPP/VIIRS se ha logrado establecer una correlación significativa entre la luminosidad nocturna y la densidad poblacional, permitiendo una comprensión detallada de los flujos de población, aplicándolos en el caso del impacto del huracán Otis en el estado de Guerrero.

Los resultados indican que el huracán Otis provocó un desplazamiento significativo de la población, especialmente en los municipios costeros, donde se observó

una disminución considerable de la luminosidad nocturna. Este fenómeno sugiere una migración temporal hacia áreas más seguras o menos afectadas, reflejando una baja densidad poblacional temporal en las zonas costeras y un aumento en algunos municipios del interior del estado. Cabe mencionar que las cifras pueden no necesariamente mostrar un saldo exacto en el balance poblacional debido a que pudieron haberse desplazado a municipios de otros estados de la República.

El modelo predictivo desarrollado en este estudio, basado en la elasticidad de la densidad poblacional respecto a las variaciones de luminosidad, ha mostrado ser efectivo para estimar los cambios en la población al nivel municipal. Con un coeficiente de determinación del 66.7%, el modelo explica las variaciones en la densidad poblacional mediante los cambios en la luminosidad con una precisión razonable.

La utilización de luces nocturnas como proxy para la movilidad humana ha demostrado ser una herramienta valiosa para su evaluación en eventos disruptivos, permitiendo el monitoreo de los flujos poblacionales en tiempo real. Esta metodología permite obtener información detallada y precisa de manera rápida, lo cual es crucial en situaciones de emergencia.

Los hallazgos de este estudio pueden ser utilizados por los tres niveles de gobierno en la planificación y la respuesta ante desastres para mejorar las estrategias de evacuación, albergue y recuperación. La capacidad de monitorear la movilidad poblacional en tiempo real permite una asignación más eficiente de recursos y una respuesta más rápida y adecuada a las necesidades de la población afectada, así como ponderar el desarrollo de alternativas de mediano y largo plazos con mayor exactitud e identificar necesidades regionales en distintas zonas afectadas por huracanes.

Por ello, el uso de metodologías complementarias, como el de análisis de luminosidad, están orientadas a aumentar la valoración de la capacidad de resiliencia de las comunidades y, en consecuencia, diseñar apoyos que permitan su fortalecimiento. Identificar los municipios más vulnerables y aquellos con mayor capacidad de recuperación puede ayudar a focalizar los esfuerzos en la construcción de infraestructuras de planificación urbana segura.

La implementación de sistemas de monitoreo continuo de la luminosidad nocturna puede servir como una herramienta para identificar movimientos poblacionales en respuesta a desastres naturales, y dotar a las comunidades y municipios receptores de condiciones para recibir a personas bajo condición de desplazamiento temporal o atender necesidades relacionadas con medidas paliativas en temas

de salud, alimentación y cobertura de servicios básicos para poblaciones que se encuentran en situaciones de emergencia humanitaria.

9. Recomendaciones y consideraciones

Los datos de luminosidad nocturna obtenidos de los sensores satelitales DMSP/OLS y NPP/VIIIRS presentan limitaciones en su resolución espacial y temporal. Estas restricciones pueden afectar la precisión de las estimaciones, especialmente en áreas con cambios rápidos o en regiones con variaciones pequeñas pero significativas.

Aunque la luminosidad nocturna puede ser un indicador útil de la densidad poblacional, es importante considerar que otras variables, como la actividad económica o el uso de energía, también influyen en los niveles de luminosidad. Esto podría tener implicaciones sobre la exactitud de los resultados, ya que dichos factores pueden introducir ruido o sesgos en el análisis.

Además, el tamaño de la muestra es un factor clave a tener en cuenta. En este estudio, el análisis se basa en un periodo temporal relativamente corto, y los resultados se ajustan adecuadamente dentro de este horizonte. Sin embargo, es importante señalar que, al expandir la muestra, la relación entre densidad poblacional y luminosidad nocturna podría revelar una mayor complejidad, posiblemente alejándose de una relación estrictamente lineal. En el caso particular de este trabajo, incluir datos adicionales de una semana anterior o posterior al periodo analizado no mostró desviaciones significativas en los resultados obtenidos. No obstante, esta ampliación implicó un aumento considerable en los costos de procesamiento de datos.

En este contexto, se recomienda a los usuarios de este tipo de datos considerar la posibilidad de incluir muestras más amplias para garantizar una mayor robustez y una especificación adecuada de los modelos predictivos. Sin embargo, es fundamental evaluar siempre la relación costo-beneficio desde una perspectiva estadística al ampliar los periodos de análisis, teniendo en cuenta el objetivo del trabajo.

Otra consideración relevante es la elección del modelo de regresión utilizado para relacionar la luminosidad con la densidad poblacional. En este estudio, un modelo simple de regresión fue útil para obtener predicciones razonables dentro del periodo de referencia. Sin embargo, para un análisis más robusto que abarque series temporales con un mayor número de observaciones, sería

pertinente incorporar la heterogeneidad implícita tanto en el tiempo como entre las unidades de análisis. En este sentido, un modelo de efectos fijos sería particularmente adecuado, ya que permite controlar por características no observables al nivel municipal, que podrían sesgar las estimaciones y, de este modo, mejorar la precisión y confiabilidad de los resultados.

Referencias

- 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.
- Beyer, R. C., Franco-Bedoya, S. y Galdo, V. (2021). Examining the economic impact of Covid-19 in India through daily electricity consumption and nighttime light intensity. *World Development*, 140(C), 105287. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105287>
- Beyer, R., Jain, T. y Sinha, S. (2023). Lights out? Covid-19 containment policies and economic activity. *Journal of Asian Economics*, 85. <https://doi.org/10.1016/j.asieco.2023.101589>
- Cao, C., Shao, X. y Uprety, S. (2013). Detecting light outages after severe storms using the s-NPP/VIIRS day/night band radiances. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(6), 1582-1586.
- Elhorst, J. P. (2010). Applied spatial econometrics: raising the bar. *Spatial economic analysis*, 5(1), 9-28.
- Elvidge, C. D., Ghosh, T., Hsu, F. C., Zhizhin, M. y Bazilian, M. (2020). The dimming of lights in China during the Covid-19 pandemic. *Remote Sensing*, 12(17), 2851. <https://doi.org/10.3390/rs12172851>
- Huang, X., Wang, C. y Lu, J. (2019). Understanding the spatiotemporal development of human settlement in hurricane-prone areas on the US Atlantic and Gulf coasts using nighttime remote sensing. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(10), 2141-2155.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2020). *Marco Geoestadístico 2020*. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>
- Liu, B., Wang, J., Jing, Z., Niu, H. y Yang, M. (2022). Agglomeration and migration of population in resource-based cities: evidence from DMSP/OLS and NPP/VIIRS night-time lights. *International Journal of Remote Sensing*, 1-24.

- Lu, D., Wang, Y., Yang, Q., Su, K., Zhang, H. y Li, Y. (2021). Modeling spatiotemporal population changes by integrating DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light data in Chongqing, China. *Remote Sensing*, 13(2), 284.
- Millán, A. (2021). Covid-19 y su impacto económico en la Zona Metropolitana de Guadalajara: Una aproximación a través del uso de sensores remotos. En C. Figueroa y F. Jiménez (Coords.) *Experiencias y prácticas de seguridad en la gestión, monitoreo, control y contención de Covid-19 y sus consecuencias sociales y económicas* (pp. 103-122). Conacyt- Coljal-Cucea.
- NASA. (2023). *Nighttime lights over Mexico [Satellite image]*. NASA Black Marble NPP/VIIRS. <https://blackmarble.gsfc.nasa.gov>
- National Centers for Environmental Information (NCEI). (2023). *DMSP/OLS nighttime lights and population density correlation by municipality [Dataset]*. National Geophysical Data Center (NGDC), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). <https://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp.html>
- Romero, D. y León Cruz, José F. (2023). Caracterización del riesgo por ciclones tropicales en México. En E. González Sosa y Luis F Pineda Martínez (Coords.). *La red de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos y la atención de los problemas nacionales estratégicos* (pp. 188-213). Universidad Autónoma de Querétaro.
- Pielke Jr., R. A. , Rubiera, J. , Landsea, C. , Fernández, M. L. y Klein, R. (2003). Hurricane vulnerability in Latin America and the Caribbean: Normalized damage and loss potentials. *Natural Hazards Review*, 4 (3), 101-114. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2003\)4:3\(101\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2003)4:3(101))
- Román, M. O., Stokes, E. C., Shrestha, R., Wang, Z., Schultz, L., Carlo, E. A. S. y Enenkel, M. (2019). Satellite-based assessment of electricity restoration efforts in Puerto Rico after Hurricane Maria. *PloS one*, 14(6), e0218883.
- Unicef (Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia). (2023). *Mexico. Otis Hurricane. Humanitarian situation report No. 1*. <https://www.unicef.org/media/147326/file/Mexico-Hurricane-OTIS-SitRep-31-October-2023.pdf>
- Venter, Z. S., Barton, D. N., Gundersen, V., Figari, H. y Nowell, M. (2020). Urban nature in a time of crisis: recreational use of green space increases during the Covid-19 outbreak in Oslo, Norway. *Environmental research letters*, 15(10), 104075. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb396>

- Xu, G., Xiu, T., Li, X., Liang, X. y Jiao, L. (2021). Lockdown induced night-time light dynamics during the Covid-19 epidemic in global megacities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102, 102421. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102421>
- Zea Ortiz, M., Vera Alfaro, P. y Salas, J. (enero 11, 2024). Desentrañando el impacto en la pobreza del huracán Otis. *Revista Nexos*. <https://datos.nexos.com.mx/desentrañando-el-impacto-en-la-pobreza-del-huracan-otis/#:~:text=Según%20datos%20de%20Unicef%2C%20aproximadamente,4685.2%20hectáreas%20de%20áreas%20costeras>.
- Zhao, N., Liu, Y., Hsu, F. C., Samson, E. L., Letu, H., Liang, D. y Cao, G. (2020). Time series analysis of VIIRS-DNB nighttime lights imagery for change detection in urban areas: A case study of devastation in Puerto Rico from hurricanes Irma and Maria. *Applied Geography*, 120, 102222.
- Zhao, X., Yu, B., Liu, Y., Yao, S., Lian, T., Chen, L., ... y Wu, J. (2018). NPP-VIIRS DNB DAILY data in natural disaster assessment: Evidence from selected case studies. *Remote Sensing*, 10(10), 1526.
- Zheng, Y., Shao, G., Tang, L., He, Y., Wang, X., Wang, Y. y Wang, H. (2019). Rapid assessment of a typhoon disaster based on NPP-VIIRS DNB daily data: The case of an urban agglomeration along western Taiwan straits, China. *Remote Sensing*, 11(14), 1709.