

Modelado del impacto paisajístico para la planificación de plantas fotovoltaicas en tres valles fisiográficos de Veracruz, México

Katia Fernández-González ^{1,*}, Gabriela Díaz-Félix ², José Angel Bonilla-Osorio ² y Carlos Manuel Welsh-Rodríguez ¹

¹ Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México

² Facultad de Instrumentación Electrónica, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: katia.fergon@outlook.es

Energías Renovables (Energía solar)

Recibido: 19 de agosto de 2025

Aceptado: 3 de octubre de 2025

Publicado: 19 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.591>

Resumen: Este estudio propone un marco de modelado geoespacial para evaluar los impactos del paisaje en la planificación territorial de plantas solares fotovoltaicas en tres valles fisiográficos en Veracruz, México: Perote, Córdoba-Orizaba y Papaloapan. Al abordar la rápida expansión de la energía solar en México y la comprensión limitada del potencial espacial de Veracruz, la metodología integra datos de código abierto sobre la cobertura vegetal, la topografía y la visibilidad del paisaje. Los análisis espaciales en RStudio incluyeron la reclasificación del uso de la tierra por fragilidad visual, el cálculo de la visibilidad acumulada de los puntos de observación simulados y la ponderación de la sensibilidad visual del paisaje. Los hallazgos revelan que más del 90% de la superficie de cada valle tiene un bajo impacto paisajístico, lo que indica una alta idoneidad para el desarrollo fotovoltaico con una mínima perturbación visual. Papaloapan exhibe la mayor estabilidad visual, mientras que Perote y Córdoba-Orizaba contienen zonas críticas localizadas que pueden abordarse mediante una planificación específica. El enfoque de código y datos abiertos garantiza una alta replicabilidad en otras regiones, ofreciendo una sólida herramienta de apoyo a la toma de decisiones para ubicar las plantas solares al tiempo que minimiza los impactos visuales y promueve la integración del paisaje.

Palabras clave: energía solar, infraestructura fotovoltaica, planificación territorial, evaluación multicriterio, México

Landscape impact modeling for the territorial planning of photovoltaic plants in three physiographic valleys of Veracruz, México

Abstract: This study proposes a geospatial modeling framework to evaluate landscape impacts in the territorial planning of photovoltaic solar parks across three physiographic valleys in Veracruz, Mexico: Perote, Córdoba–Orizaba, and Papaloapan. Addressing the rapid expansion of solar energy in Mexico and the limited understanding of Veracruz’s spatial potential, the methodology integrates open-source data on vegetation cover, topography, and landscape visibility. Spatial analyses in RStudio included the reclassification of land use by visual fragility, calculation of cumulative visibility from simulated observation points, and weighting of landscape visual sensitivity. Findings reveal that over 90% of the surface area in each valley has low landscape impact, indicating high suitability for PV development with minimal visual disturbance. Papaloapan exhibits the greatest visual stability, while Perote and Córdoba–Orizaba contain localized critical zones that can be addressed through targeted planning. The open-source, open-data approach ensures high replicability in other regions, offering a robust decision-support tool for siting photovoltaic infrastructure while minimizing visual impacts and promoting landscape integration.

Keywords: solar energy, photovoltaic infrastructure, territorial planning, multicriteria evaluation, Mexico

Introducción

La energía solar ha surgido como la principal fuente de energía renovable en países con alta incidencia de irradiación solar anual. Esta alternativa se destaca por contribuir eficientemente a la generación de energía eléctrica a través de la implementación de sistemas fotovoltaicos. Estos dispositivos transforman eficientemente la luz visible en energía eléctrica a través del efecto fotoeléctrico (Ortega Molina, 2009). Dicha energía es generada desde pequeñas instalaciones residenciales para autoconsumo hasta grandes plantas o parques solares fotovoltaicos (PSF) que abastecen las redes eléctricas nacionales (Iberdrola, 2024).

En el caso de México, se ha mantenido un crecimiento energético sostenidamente acelerado de 2018 a 2023 (Gómez Restrepo & Lancheros Arias, 2025), debido al incremento de 8.131 de la capacidad instalada de electricidad solar fotovoltaica (MW), según las estadísticas presentadas por la *International Renewable Energy Agency* (2024). Esto se atribuye al desarrollo nacional de diversos proyectos gubernamentales, particulares y académicos para la instalación y

mantenimiento de sistemas fotovoltaicos. Los PSF se concentran principalmente en áreas característicamente desérticas de los estados de Baja California, Sonora, Chihuahua, Durango, Zacatecas e Hidalgo que, se reconocen por los niveles superiores de irradiación solar (Hernández *et al.*, 1991).

No obstante, la variabilidad solar es crucial para considerar a las zonas del centro del país como idóneas para el desarrollo de cualquier proyecto de energía solar.

Aunque el estado de Veracruz mantiene un amplio potencial solar poco documentado en la literatura científica actual, su extensión territorial y gran diversidad de formas geológicas afectan significativamente la distribución de la irradiación solar. Por ello, los valles fisiográficos se consideran sitios potenciales para un óptimo desarrollo de PSF. Su condición llana minimiza el efecto de la pendiente, al comportarse como un plano horizontal, lo que favorece una captación más uniforme y eficiente de la energía solar (Bautista Carrascosa, 2016).

No obstante, si bien la alta irradiación constituye un criterio técnico fundamental para la planeación de PSF, existen otros criterios geográficos esenciales para evaluar los impactos ambientales asociados (Wüstenhagen *et al.*, 2007). En especial, aquellos que integran la interacción entre paisaje, biodiversidad y percepción territorial en estas unidades fisiográficas, tal como el impacto paisajístico. Esta herramienta relaciona la transformación del paisaje y la alteración visual ante cualquier observador en el sitio del PSF (Chiabrando *et al.*, 2009). Por lo tanto, el modelado de los niveles de impacto paisajístico es ampliamente utilizado para identificar las zonas vulnerables a alteraciones visuales, de extremas a muy bajas, dentro del valle en cuestión (López-Rodríguez, 2025). Bajo esta premisa, el objetivo de este estudio es modelar geoespacialmente el impacto paisajístico de tres valles fisiográficos de Veracruz para contribuir a la planificación de futuros PSF. Con la finalidad de proporcionar a la comunidad científica, gubernamental y público en general una metodología libre con datos abiertos para ser replicada a nivel nacional. Este estudio garantizará una planeación territorial más eficiente en el desarrollo nacional de la tecnología fotovoltaica y permitirá identificar las ubicaciones visualmente óptimas dentro de cualquier área de interés.

Materiales y Métodos

Áreas de estudio

Para este estudio se seleccionaron tres de los valles más representativos de Veracruz: **Perote, Córdoba-Orizaba y Papaloapan**. Cada uno de ellos cuenta con criterios específicos y características geomorfológicas distintivas para ser considerado valle fisiográfico, en función de su cercanía al Eje Volcánico Transversal.

Con el fin de garantizar una representación adecuada de la diversidad paisajística regional, se delimitó una porción significativa dentro de cada valle, priorizando zonas que reflejan variaciones en la cobertura vegetal y visibilidad territorial de las localidades adyacentes. Las dimensiones geográficas de cada área de estudio se presentan en la Tabla 1, donde se especifican los dominios de latitud y longitud, así como una estimación de superficie considerada. Por su parte, en la Figura 1 se muestra la ubicación espacial de dichas áreas.

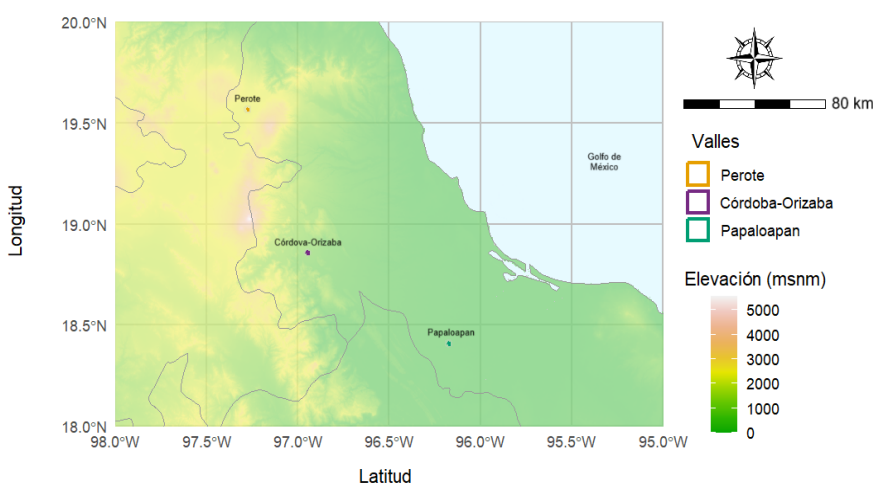


Figura 1. Ubicación geográfica de la delimitación territorial de los valles fisiográficos de Perote, Córdoba-Orizaba y Papaloapan (Elaboración propia)

Tabla 1. Delimitación geográfica de los valles analizados (Elaboración propia)

Valles	Latitud mínima (°)	Latitud máxima (°)	Longitud mínima (°)	Longitud máxima (°)	Área estimada (km ²)
Perote	19.56347	19.57055	-97.27849	-97.27141	6.37
Córdoba-Orizaba	18.85420	18.86000	-96.94939	-96.94359	5.71
Papaloapan	18.40384	18.41085	-96.17738	-96.17038	6.45

Datos geoespaciales

Los datos geoespaciales obligatorios para calcular y modelar el impacto paisajístico son: el Modelo de Elevación Digital (DEM), las estaciones de observación y cobertura de uso de suelo y vegetación.

El DEM se obtuvo con una resolución de 30 metros mediante la paquetería de RStudio llamada “Elevatr”. Esta librería facilita el acceso a datos de elevación tanto puntuales como en formato ráster, provenientes de Amazon Web Services Open Data Terrain Tiles y la API de conjuntos de datos de Open Topography Global (Hollister, 2023).

Las estaciones de observación fueron representadas puntualmente y extraídos de OpenStreetMap (OSM), una plataforma que proporciona datos globales sobre edificaciones, carreteras, vías férreas, senderos, entre otros (OpenStreetMap Foundation, 2024). Estos puntos de interés se implementaron para representar las posibles zonas de percepción dentro de los valles utilizando la librería de RStudio “Osmdata”.

Para el caso de la cobertura de uso de suelo y vegetación, se emplearon los conjuntos vectoriales de las Series V del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), ya que fueron las más recientes, disponibles a escala 1:250 000. Para el valle de Perote se utilizó el Conjunto Nacional Veracruz, clave E14-3 (INEGI, 2020a), mientras que para los valles de Córdoba-Orizaba y Papaloapan se empleó el Conjunto Nacional Orizaba, clave E14-6 (INEGI, 2020b). Dichas cartas fueron procesadas para estimar la fragilidad visual del territorio, es decir estos datos vectoriales fueron categorizados por niveles de fragilidad visual del uso de suelo y vegetación.

Procesamiento espacial

Tabla 2. Reclasificación de uso de suelo y vegetación según su fragilidad visual (Elaboración propia)

Categoría de Fragilidad Visual	ALTA	MEDIA	BAJA
Tipo de Uso de Suelo	BOSQUE DE OYAMEL		
	BOSQUE DE GALERÍA		
	BOSQUE DE TÉSCATE		
	BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA		
	BOSQUE DE PINO		
	BOSQUE DE PINO-ENCINO		
	BOSQUE DE ENCINO	PASTIZAL HALÓFILO	SIN VEGETACIÓN
	BOSQUE DE ENCINO-PINO	PASTIZAL INDUCIDO	APARENTE
	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO	NO APLICABLE
	SELVA BAJA CADUCIFOLIA	POPAL	
	SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA		
	SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA		
	VEGETACIÓN DE GALERÍA		
	VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS		
	MANGLAR		
	PRADERA DE ALTA MONTAÑA		

El procesamiento de los datos geospaciales mencionados se realizó completamente en RStudio. Inicialmente, fue necesario reprojectar los conjuntos espaciales a EPSG:4326 para proceder a la validación de las geometrías, asegurando que los objetos espaciales fueran funcionales para ser manipulados correctamente. Posteriormente, se reclasificaron los elementos presentes del uso de suelo y vegetación en 3 valores simbólicos de fragilidad visual: Alta, Media y Baja. La Tabla 2 presenta las categorías asignadas según la capacidad de ocultamiento visual de cada tipo de cobertura, basada en criterios propuestos por diversos autores especializados en evaluación paisajística.

Tabla 3. Ponderación de sensibilidad visual según el tipo de receptor (Elaboración propia)

Tipo de receptor	Sensibilidad Visual	Ponderación
Miradores naturales, zonas ecoturísticas	Muy Alta	5
Áreas residenciales rurales visibles	Alta	4
Caminos panorámicos, senderos elevados	Media	3
Áreas agrícolas con baja densidad visual	Media-baja	2
Infraestructura productiva o industrial	Baja	1
Zonas sin presencia humana o vegetación	Muy baja	0

Modelado del impacto paisajístico

El cálculo del impacto paisajístico se efectuó mediante la multiplicación de las capas de visibilidad acumulada y los valores de sensibilidad visual establecidos en la Tabla 3, según el esquema analítico desarrollado por López-Rodríguez (2025). Así, se adquirió el mapa ráster clasificado en seis niveles propuestos en la Tabla 4, que representan el impacto paisajístico de cada valle.

Tabla 4. Ponderación de los niveles propuestos de impacto paisajístico (Elaboración propia)

Impacto Paisajístico	Ponderación
Extremo	6
Muy Alto	5
Alto	4
Medio	3
Bajo	2
Muy bajo	1

Visualización

La visualización de los mapas finales de fragilidad visual e impacto paisajístico se refinó utilizando los paquetes “Ggplot2” y “Tmap”. Finalmente, se calcularon los porcentajes correspondientes a cada nivel de impacto, con el objetivo de comparar la distribución porcentual del impacto paisajístico entre los tres valles veracruzanos.

En adición, en la sección de ANEXO 1 se incluye el código completo para replicar esta metodología en cualquier área de interés, facilitando su aplicación en procesos de planeación territorial de futuros PSF.

Resultados y Discusión

Estudio de caso 1: Valle de Perote

El Valle de Perote es una región ubicada en el Altiplano Mexicano, entre los estados de Veracruz y Puebla. Esta región se caracteriza por su cercanía al Cofre de Perote y forma parte de la región hidrográfica Balsas (RH18) (SEMARNAT, 2010). La región representativa del Valle de Perote se sitúa a 2380 msnm, donde la cobertura vegetal se compone principalmente por bosque de pino, pastizal inducido, bosque mesófilo de montaña y áreas clasificadas como “no aplicable”. Además, de pequeñas porciones de bosque de oyamel, bosque de pino-encino, matorral desértico rosetófilo

y pradera de alta montaña. Esta composición refleja una heterogeneidad paisajística marcada por ecosistemas de alta montaña, áreas intervenidas y zonas de baja cobertura vegetal. La alta complejidad visual acumulada del valle de Perote enriqueció la estimación de la sensibilidad paisajística para evaluar la fragilidad percibida. Como resultado, en la Figura 2 se presenta la distribución espacial de la fragilidad visual y niveles obtenidos de impacto paisajístico en este valle.

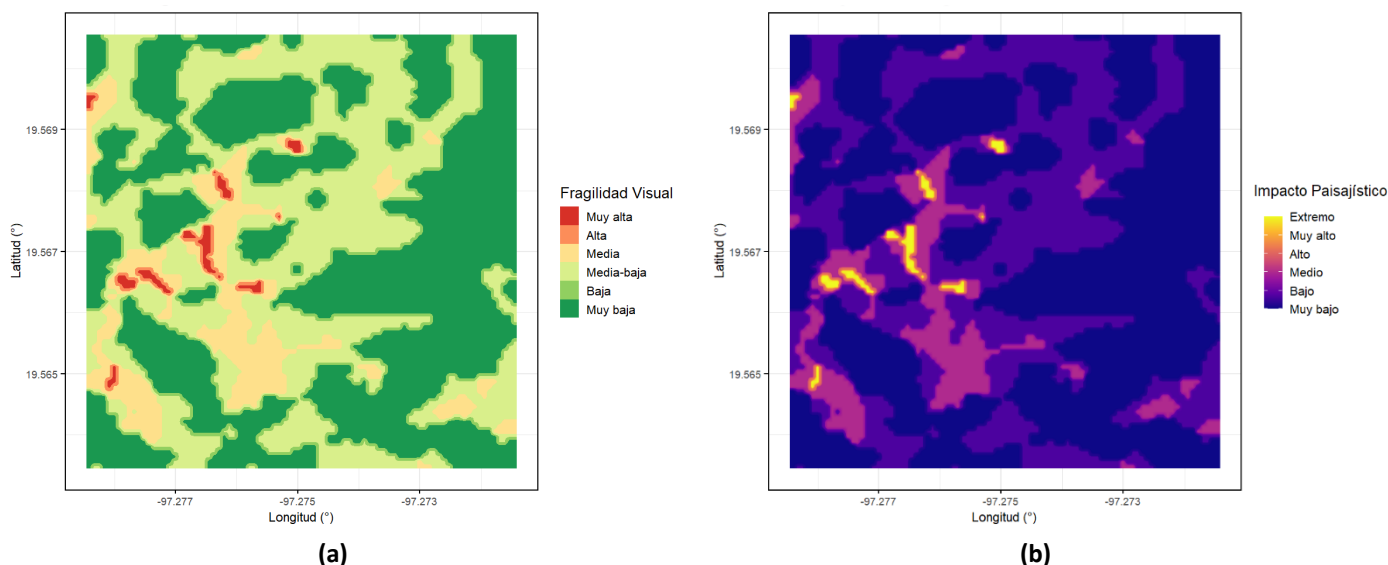


Figura 2. Valle de Perote: (a) Fragilidad Visual e (b) Impacto Paisajístico total (Elaboración propia)

En la Figura 2(a), revela una predominancia de valores medio-bajos a muy bajos de fragilidad visual a lo largo del Valle de Perote, representados por tonalidades verdes. Esto concuerda con la caracterización realizada por Yañez Garrido y Nava-Bringas (2013), quienes describen una vegetación altamente fragmentada debido a presencia de actividades agrícolas.

Las escasas zonas de alta y muy alta vulnerabilidad, indicadas en rojo y naranja, se concentran principalmente hacia el occidente del valle. Esta concentración es atribuible a la proximidad al libramiento de Perote, donde la visibilidad territorial y la cobertura vegetal generan mayor sensibilidad escénica. Del mismo modo, hacia el centro del valle emergen zonas de fragilidad media a muy alta, lo cual es reflejo del incremento de ruido visual generado por los bosques presentes. En general, el extremo norte y el sector oriental mantienen zonas extensas de vulnerabilidad visual baja y muy baja, lo que sugiere una menor exposición perceptual y una cobertura más homogénea. Dichos sitios pueden vincularse a la presencia de actividades agrícolas que, en palabras de Paucar-Velasco (2025), incrementan significativamente la afectación del paisaje más no la fragilidad visual.

Para el caso del impacto paisajístico, Figura 2(b), se mantiene una correlación positiva entre las zonas de fragilidad expuestas en la Figura 2(a) y la acumulación de la visibilidad por los observadores simulados. En otras palabras, las áreas clasificadas con alta y muy alta fragilidad coinciden espacialmente con la distribución espacial del impacto paisajístico extremo.

La Figura 2(b) evidencia que, en el Valle de Perote prevalecen mayormente áreas de impacto paisajístico baja a muy bajo, especialmente en el sector oriental y el extremo norte. Estas extensiones territoriales se posicionan como las óptimas para la instalación de plantas solares, puesto que su baja perturbación visual minimiza el conflicto escénico de los puntos cercanos de observación. Tales como, la estación de autoconsumo diésel GCM, una instalación de mantenimiento de Granjas Carroll y el Colegio de Bachilleres del Estado de Veracruz (COBAEV) número 58.

Las superficies heterogéneas de impacto extremo, formadas principalmente por el contraste del libramiento de Perote y áreas de deforestación ocasionan una fragmentación escénica significativa. De acuerdo con Serrano-Martínez (2016), las redes de carreteras provocan este tipo de segmentaciones en el paisaje. Dichas fragmentaciones comprometen la integración territorial de PSF, principalmente cerca de las carreteras locales y áreas forestales dentro del Valle de Perote.

Estudio de caso 2: Valle de Córdoba-Orizaba

El Valle de Córdoba-Orizaba es una amplia superficie en las faldas del Pico de Orizaba o Citlaltépetl, la montaña más alta de México, que pertenece a la región hidrográfica Papaloapan (RH28) dentro del territorio veracruzano, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (2024b). La porción superficial representativa de este valle se encuentra a 820 msnm, cubierta por superficies clasificadas como “no aplicable” y selva alta perennifolia, con fragmentos de bosque mesófilo de montaña y pastizal inducido. La presencia de selva alta perennifolia y bosque mesófilo de montaña señala una heterogeneidad paisajística que refleja una transición bioclimática entre ecosistemas húmedos con temperaturas cálidas y zonas templadas. En términos generales, esta fragmentación ecológica reduce los contrastes escénicos relevantes para el análisis de la fragilidad, al alternarse zonas de vegetación densa con áreas de menor cobertura visual. Esta zona de coexistencia entre estribaciones montañosas y planicies intermedias que dan lugar a regiones de intervención agropecuaria o transformación antrópica, particularmente el pastizal inducido, según Rebollo y Gómez-Sal (2003), se caracteriza por su densidad visual menor debido a su vegetación abierta. Desde una perspectiva territorial, estas variaciones generan brechas para ampliar la posibilidad de implementación de parques solares a lo largo del valle. Para ilustrar esta configuración territorial, en la Figura 3 se presenta el mapa de fragilidad visual e impacto paisajístico identificados en el Valle de Córdoba-Orizaba.

La Figura 3(a), refleja una distribución espacial heterogénea de la fragilidad visual en el Valle de Córdoba-Orizaba; empero predominan los valores bajos a muy bajos. En el sector occidental se forma una franja con alta concentración de estos valores, lo cual denota una menor exposición visual con respecto al entorno de observación. En contraste, las zonas existentes con vulnerabilidad alta y muy alta se agrupan únicamente en ocho núcleos dispersos a lo largo del valle. Los valores máximos se concentran en una región geográfica, en torno a los 18.858° de latitud y -96.945° de longitud, acompañados de una amplia extensión territorial con niveles altos y medios de fragilidad visual en el extremo oriental del valle. En síntesis, la Figura 3(a) evidencia que la morfología paisajística del Valle de Córdoba-Orizaba carece de diversidad, lo que resulta en una mayor homogeneidad que reduce su impacto visual. Estos hallazgos coinciden con la investigación de Quintana Cortina (2024), que demuestra que esta pérdida de orden y diversidad es consecuencia de la fuerte expansión de las superficies de cultivo y urbanización.

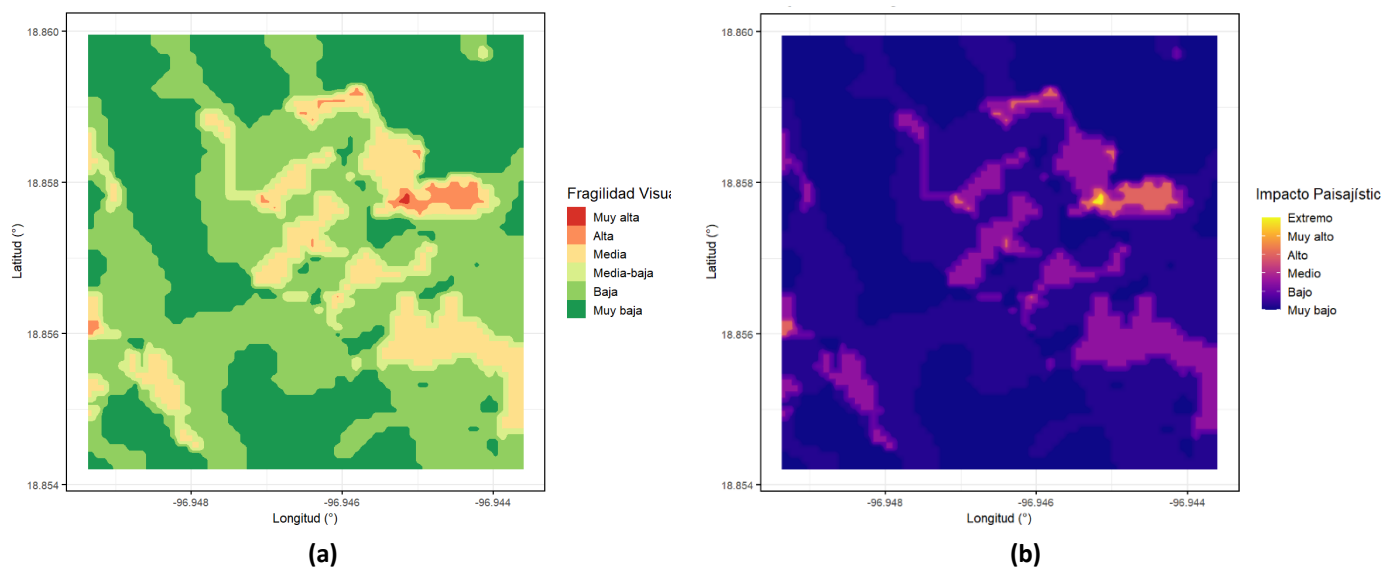


Figura 3. Valle de Córdoba-Orizaba: (a) Fragilidad Visual e (b) Impacto Paisajístico total (Elaboración propia)

El impacto paisajístico generado en el Valle de Córdoba-Orizaba es mínimo, Figura 3(b), ya que prevalecen niveles medios a muy bajos de interacción observacional con respecto a la cobertura vegetal. Aunque la superficie seleccionada se ubica al noreste de puntos clave de observación, como la localidad de San José de Tapía, la visibilidad acumulada permanece sin alteraciones significativas.

La franja territorial de baja fragilidad visual configuró una importante zona extensa de muy bajo impacto paisajístico. Esto la establece como un espacio idóneo para la implementación de tecnología fotovoltaica continua, es decir, con

ausencia de espacios intermedios. Este tipo de diseño en parques solares evita la formación de discontinuidades de gran incidencia paisajística, tal como lo señalan Mérida Rodríguez *et al.* (2010).

Finalmente, las zonas orientales de impacto extremo son equivalentes a la fragilidad escénica. Este hallazgo demuestra que la intervención humana, la apertura del paisaje y la cobertura vegetal intensifican la percepción del cambio visual local en el valle.

Estudio de caso 3: Valle de Papaloapan

El Valle de Papaloapan, se ubica en la provincia Fisiográfica Llanura Costera del Golfo de México, siendo una región que presenta una morfología variada en la que predomina el relieve de superficies planas e inclinadas al oriente, según lo documentado por CONAGUA (2024b). Esta configuración territorial favorece la acumulación de humedad superficial y la formación de paisajes extensos con baja variación altitudinal, lo que influye directamente en la percepción escénica del territorio. Este valle se localiza en la región hidrológica del mismo nombre (RH28) cubierta parcialmente por el Campo Volcánico Los Tuxtlas.

La región representativa del Valle de Papaloapan, situada aproximadamente a 30 msnm, presenta un uso de suelo compuesto principalmente por áreas clasificadas como “no aplicable” y escasas porciones de selva alta perennifolia. Esta composición refleja una transición entre ecosistemas conservados y zonas de intervención antrópica, cuerpos de agua o superficies sin vegetación registrada. El tipo de selva mencionado, por su densidad estructural, representa áreas altamente perceptibles de fragilidad visual. Sin embargo, dichos contrastes entre los diferentes usos de suelo son mínimos, lo que resulta clave para la evaluación del impacto paisajístico en este valle. Esta configuración territorial genera un escenario esperado donde, las áreas aptas para la instalación de infraestructura solar sean abundantes a lo largo del valle. En este contexto, en la Figura 4 se muestra el resultado del modelamiento geoespacial de la fragilidad visual y el impacto paisajístico en el Valle de Papaloapan.

La Figura 4(a) revela patrones de sensibilidad distribuidos de forma irregular, con clara predominancia de zonas de media-baja a muy baja fragilidad visual. La extensión territorial del Valle de Papaloapan posee grandes áreas de interés donde la vulnerabilidad escénica es muy baja, dada la calidad visual de los puntos de observación estratégicos y la mezcla irregular de las coberturas presentes. Esta última condición agrega un valor menor a las extensiones homogéneas mientras que, la diversidad equilibrada de usos de suelo es de mayor calidad visual (Solari & Cazorla, 2019).

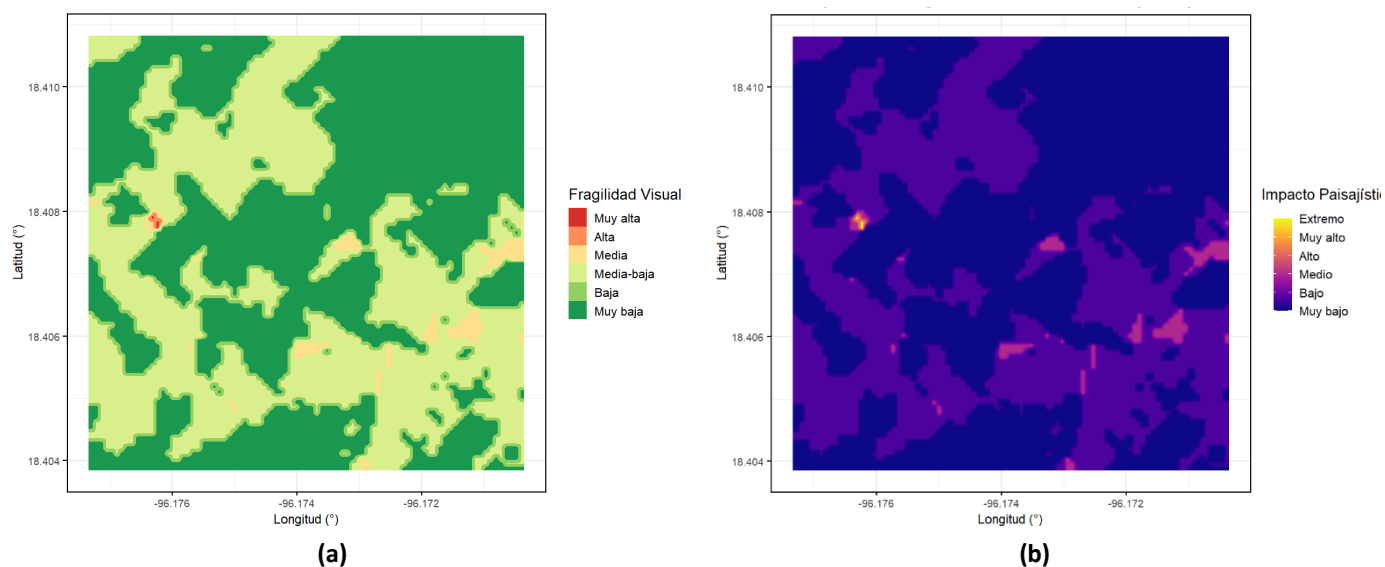


Figura 4. Valle de Papaloapan: (a) Fragilidad Visual e (b) Impacto Paisajístico total (Elaboración propia)

La única área reconocida con muy alta fragilidad se localiza aproximadamente en las coordenadas 18.408° de latitud y -96.176° de longitud. Esta porción es reducida como respuesta a la presencia de los elementos descritos anteriormente.

En suma, la Figura 4(a) refuerza la caracterización del valle como unidad geomorfológica homogénea que conserva una baja complejidad escénica dominada por superficies clasificadas como “no aplicable”.

Por su parte, en la Figura 4(b) se muestra que el impacto paisajístico dentro del Valle de Papaloapan es el más bajo de los tres valles estudiados, conservando los niveles máximos en una zona aislada del sector occidental. Esta mínima intensidad visual se deriva de su lejanía con numerosas comunidades, tales como Santa Lucia, Las Mesillas y Los Naranjos. Estas condiciones resultantes, causadas por el impacto visual, establecen el escenario más propicio para la instalación de PSF en la zona. En este sentido, Sobrini *et al.* (2021) recomiendan el aprovechamiento de las tierras agrícolas y paisajes degradados, como ocurre en la mayoría de los proyectos solares en España, para que la alteración visual sea imperceptible en el entorno evaluado.

Este mapa demuestra que los elementos paisajísticos estables que estructuran al Valle de Papaloapan encapsulan las zonas críticas. Como resultado, en la mayor parte del valle coexisten grandes extensiones territoriales con bajo impacto paisajístico que son altamente preferentes para la localización de PSF. Esto justifica la viabilidad para el desarrollo sustentable con criterios de compatibilidad paisajística.

Comparación entre valles

El estudio del impacto paisajístico en valles fisiográficos es limitado. Por consiguiente, los principales criterios para seleccionar estos territorios como sede de inversión en parques solares son la alta irradiación solar y su homogeneidad escénica. Esta última condición varía con respecto a las condiciones ambientales locales y de la interacción visual que se establece entre el observador y el entorno estudiado.

Los valles veracruzanos, en particular, presentan componentes sensoriales favorables que contribuyen a una baja fragilidad visual y un impacto paisajístico reducido. La Tabla 5 sintetiza los porcentajes correspondientes a cada nivel de valoración, determinados en los mapas individuales de impacto paisajístico total.

Tabla 5. Distribución porcentual total del impacto paisajístico en el Valle de Perote, Valle de Córdoba-Orizaba y Valle de Papaloapan (Elaboración propia)

Impacto Paisajístico	Valle de Perote	Valle de Córdoba-Orizaba	Valle de Papaloapan
Extremo	0.93 %	0.03 %	0.01 %
Muy Alto	0.39 %	0.03 %	0.01 %
Alto	1.24 %	0.88 %	0.08 %
Medio	1.03 %	1.06 %	1.21 %
Bajo	18.42 %	15.44 %	2.61 %
Muy bajo	77.99 %	82.56 %	96.08 %

En términos generales, los tres valles analizados demuestran que más del 90% de su superficie con niveles bajos de impacto paisajístico, resultado de su homogeneidad escénica y predominante baja fragilidad visual.

El Valle de Papaloapan se posiciona como el más estable del conjunto, siendo la mejor opción para el aprovechamiento solar fotovoltaico. Su morfología homogeneizada por la actividad antrópica presenta solamente el 0.02% de zonas críticas. En definitiva, este valle presenta las condiciones altamente favorables para el desarrollo de PSF, siempre que se respeten los núcleos de vegetación conservada y se integren criterios técnicos legales en la planificación territorial.

Por otro lado, el Valle de Perote, aunque ha sido pionero en proyectos de inversión orientados al establecimiento de fuentes de energía renovable, exhibe los niveles más extremos de impacto entre los tres valles. No obstante, conserva un 96.14% de territorio con inferior impacto, manteniéndose como opción viable bajo esquemas de mitigación visual. La distribución espacial heterogénea de estos valores extremos subraya la necesidad de seguir modelando este índice visual.

Finalmente, el Valle de Córdoba-Orizaba muestra un perfil intermedio, posicionándose como el más estable del conjunto. Su configuración paisajística combina zonas de baja fragilidad con la dispersión de espacios geográficos de

mayor sensibilidad. Según los datos en la Tabla 5, únicamente el 0.94% del valle corresponde a zonas de alto impacto, mientras que un 10.6% se clasifica como de impacto medio y el 98% del territorio prevalecen los niveles bajos de alteración. Para la futura planeación territorial de PSF será necesario estrategias que integren las zonas de bajo impacto con los puntos de observación frecuentes utilizados por las comunidades locales.

Conclusiones

La cartografía resultante de fragilidad visual e impacto paisajístico en los valles estudiados constituye una herramienta esencial para el desarrollo de proyectos solares. Este estudio no solo presenta la primera evaluación de impacto paisajístico en los tres valles fisiográficos clave de Veracruz, sino que también establece un precedente metodológico al utilizar un marco geoespacial de código y datos abiertos. Esta aproximación facilita la evaluación preventiva de infraestructura fotovoltaica en etapas tempranas de planificación, lo cual es una contribución esencial para el ordenamiento territorial a nivel nacional.

Los bajos niveles de impacto paisajístico registrados en los Valles de Perote, Córdoba-Orizaba y Papaloapan demuestran la viabilidad de planificar proyectos fotovoltaicos a gran escala y de diseño continuo. Esta condición permite su integración territorial sin comprometer la calidad visual del entorno y, al mismo tiempo, favorece la aceptación social y ambiental de futuros PSF. Esto es especialmente relevante en regiones caracterizadas por alta biodiversidad y elevado valor escénico.

La metodología utilizada permite planificar eficientemente la instalación de PSF, al integrar criterios técnicos, geográficos y visuales del territorio. Esta aproximación no solo identifica las zonas más idóneas para el desarrollo de proyectos, sino que también contribuye a mitigar el impacto visual y a fortalecer una transición energética más sustentable.

Finalmente, el enfoque geoespacial aplicado demuestra un alto potencial de replicabilidad en otros valles de México, dado que utiliza datos y herramientas abiertas y accesibles. Esta flexibilidad metodológica abre nuevas oportunidades de implementación en escenarios emergentes, fortaleciendo la planeación territorial mediante criterios de compatibilidad paisajística.

Agradecimientos y financiamiento: Este estudio no recibió financiamiento externo. Su desarrollo fue posible gracias al compromiso académico del Centro de Ciencias de la Tierra y de la Facultad de Instrumentación Electrónica de la Universidad Veracruzana.

Bibliografía

- Bautista Carrascosa, B. C. M. (2016). *Radiación extraterrestre sobre una superficie inclinada en función de la latitud, la declinación solar y las características de la pendiente*. Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. <https://riunet.upv.es/entities/publication/d1af3a5d-b85e-4c0a-9272-88cb59fde68f>
- Chiabrando, R., Fabrizio, E., & Garnero, G. (2009). *The territorial and landscape impacts of photovoltaic systems: Definition of impacts and assessment of the glare risk*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(9), 2441–2451. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.008>
- Comisión Nacional del Agua. (2024a). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuenca Río Papaloapan (3019), estado de Veracruz*. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, CONAGUA, México. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/veracruz/DR_3019.pdf
- Comisión Nacional del Agua. (2024b). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Orizaba-Córdoba (3007), estado de Veracruz*. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, CONAGUA, México. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/veracruz/DR_3007.pdf
- Gómez Restrepo, J. M., & Lancheros Arias, Y. A. (2025). *Evolución de la implementación de energía solar fotovoltaica para los países que conforman la Alianza del Pacífico: Chile, Colombia, México y Perú (2014–2024)*. Repositorio Institucional de la Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia. <https://repositorio.unbosque.edu.co/items/c4833a25-c0af-4e74-9a66-7196f29ff3ef>
- Hernández, E., Tejeda-Martínez, A., & Reyes, S. (1991). *Atlas solar de la República Mexicana*. Universidad Veracruzana y Universidad de Colima, México.
- Hollister, J. (2023). *Access Elevation Data from Various APIs* (versión 0.99.0) [Paquete de R elevatr]. <https://cran.r-project.org/web/packages/elevatr/index.html>
- Iberdrola. (2024). *¿Cómo funcionan las plantas fotovoltaicas?* <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-fotovoltaica>. Consultado el 10 de junio de 2025.
- International Renewable Energy Agency. (2024). *Renewable energy statistics 2024*. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2024.pdf

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020a). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie V (continuo nacional)*. INEGI, México. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825568672>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020b). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie V, estado de Veracruz*. INEGI, México. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825568832>
- López-Rodríguez, E. (2025). *Evaluación del impacto paisajístico con QGIS: Metodología y herramientas*. Geoinnova. <https://geoinnova.org/blog-territorio/evaluacion-del-impacto-paisajistico-con-qgis-metodologia-y-herramientas/>. Consultado el 10 de junio de 2025.
- Mérida Rodríguez, M., Lobón Martín, R., & Perles Roselló, M. J. (2010). *Las plantas fotovoltaicas en el paisaje: Tipificación de impactos y directrices de integración paisajística*. Nimbus: Revista de Climatología, Meteorología y Paisaje, 25–26. <https://repositorio.ual.es/handle/10835/1461>
- OpenStreetMap Foundation. (2024). *¿Qué es OpenStreetMap?* <https://welcome.openstreetmap.org/es/what-is-openstreetmap/>. Consultado el 10 de junio de 2025.
- Ortega Molina, A. L. (2009). *Ahorro de energía eléctrica en viviendas de interés medio: Uso de sistemas fotovoltaicos en la Ciudad de México*. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México. <https://132.248.9.195/ptd2009/agosto/0646855/Index.html>
- Paucar Velasco, E. G. (2025). *Estudio de las unidades paisajísticas de la parroquia Ignacio Flores: Programa de conservación período 2024*. Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador. <https://repositorio.utc.edu.ec/items/c5cf481f-1ad1-4d2f-9464-43d10f8b9028>
- Quintana Cortina, A. C. (2024). *Los cambios en la cobertura del suelo y su modelación e impacto en la fragilidad visual de los paisajes del área patrimonial de Viñales, Cuba*. Tesis de maestría, Universidad de La Habana, Cuba. <https://accesoabierto.uh.cu/s/scriptorium/item/2131808>
- Rebollo, S., & Gómez-Sal, A. (2003). *Aprovechamiento sostenible de los pastizales*. Ecosistemas, 12(3), 1–10. <https://www.redalyc.org/pdf/540/54012308.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). *Atlas del Agua en México*. SEMARNAT, México. https://gisviewer.semarnat.gob.mx/geointegrador/enlace/atlas2010/atlas_agua.pdf
- Serrano-Martínez, M. (2016). *La fragmentación del paisaje causada por la red de carreteras en Navarra: Propuestas de estudio a escala regional desde la ecología del paisaje*. Universidad de Navarra, Pamplona, España. <https://dadun.unav.edu/entities/publication/5ec7b052-293e-4de6-ad3e-02368f28c32e>
- Sobrini, I., Hernando Gallego, A., Legrand, M., Iglesias-Merchan, C., & García-Abril, A. (2021). *Criterios paisajísticos para seleccionar alternativas de localización de plantas fotovoltaicas*. Asociación Española de Dirección e Ingeniería de Proyectos (AEIPRO), España. <https://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2991>
- Solari, F. A., & Cazorla, L. (2019). *Valoración de la calidad y fragilidad visual del paisaje*. Cuadernos del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación, 30. <https://doi.org/10.18682/cdc.vi30.1519>
- Wüstenhagen, R., Wolsink, M., & Bürer, M. J. (2007). *Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept*. Energy Policy, 35(5), 2683–2691. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.001>
- Yañez Garrido, G., & Nava-Bringas, M. E. (2013). *Descripción del Valle de Perote*. En C. A. Ochoa Martínez (Coord.), *Valle de Perote: Aspectos bioclimáticos y socioeconómicos* (pp. 29–34). Universidad Veracruzana, México. <https://www.uv.mx/cienti/files/2013/02/Valle-de-Perote-Aspectos-bioclimaticos-y-socioeconomicos.pdf>

ANEXO 1. Script completo para calcular el impacto paisajístico en RStudio para cualquier parte geográfica

#Paso 1: Leer y unir shapefiles de uso de suelo INEGI

```
library(sf)
library(dplyr)

# SUSTITUIR - Ruta a la carpeta
ruta <- "C:/Users/.."

# Lista de archivos .shp que comienzan con "e1403_usv250s5"
archivos <- list.files(path = ruta, pattern = "^e1403_usv250s5.*\\.shp$", full.names = TRUE)

# Leer todos los shapefiles y unirlos en uno solo
uso_sueloPEROTE <- archivos %>%
  lapply(function(x) st_read(x, quiet = TRUE)) %>%
  bind_rows()

# SUSTITUIR - Recorte espacial del uso de suelo según zona de interés EJEMPLO: PEROTE
library(sf)

zona_perote <- st_as_sf(
  st_as_sfc(
    st_bbox(c(xmin = -97.0, xmax = -97.3, ymin = 19.4, ymax = 19.7), crs = st_crs(4326))
  )
)

# Asegurar que ambas capas tengan geometrías válidas
uso_sueloPEROTE <- st_make_valid(uso_sueloPEROTE)
zona_perote <- st_make_valid(zona_perote)

# Transformar CRS para que coincidan
uso_sueloPEROTE <- st_transform(uso_sueloPEROTE, st_crs(zona_perote))

# Recorte espacial con intersección
uso_sueloPEROTE <- st_intersection(uso_sueloPEROTE, zona_perote)
```

#Paso 2: Definir zona de interés y descargar DEM

```
library(elevatr)
library(terra)

# SUSTITUIR - Crear el rectángulo DE LA ZONA DE ESTUDIO
zona_bbox <- st_bbox(c(
  xmin = -97.27849, xmax = -97.27141,
  ymin = 19.56347, ymax = 19.57055
), crs = st_crs(4326))

zona_perote <- st_as_sfc(zona_bbox) |> st_sf()

# Descargar DEM desde elevatr
DEM_raw <- get_elev_raster(locations = zona_perote, z = 13, clip = "locations")
DEM_perote <- rast(DEM_raw)
writeRaster(DEM_perote, "DEM_perote_gdal.tif", overwrite = TRUE)
```

#Paso 3: Obtener puntos desde OpenStreetMap

```
library(osmdata)

# SUSTITUIR - Definir bounding box
bbox_perote <- c(
  min_lon = -97.27849,
  min_lat = 19.56423,
  max_lon = -97.27141,
  max_lat = 19.56979
)

# Crear consulta OSM
consulta <- opq(bbox = bbox_perote) %>%
  add_osm_feature(key = "tourism", value = "viewpoint") %>%
  add_osm_feature(key = "man_made", value = c("tower", "observation_tower"))

# Obtener datos como puntos
puntos_osm <- consulta %>% osmdata_sf()
puntos <- puntos_osm$osm_points

# Transformar CRS al del DEM
puntos <- st_transform(puntos, crs = st_crs(DEM_perote))
```

#Paso 4: Reclasificación de fragilidad visual

```
library(tmap)
```

```
# Definir categorías
alta <- c("BOSQUE DE OYAMEL", "BOSQUE DE ", "BOSQUE DE TÁSCATE",
        "BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA", "BOSQUE DE PINO", "BOSQUE DE PINO-ENCINO",
        "BOSQUE DE ENCINO", "BOSQUE DE ENCINO-PINO", "SELVA ALTA PERENNIFOLIA",
        "SELVA BAJA CADUCIFOLIA", "SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA",
        "SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA", "VEGETACIÓN DE GALERÍA",
        "VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS", "MANGLAR", "PRADERA DE ALTA MONTAÑA")

media <- c("PASTIZAL HALÓFILO", "PASTIZAL INDUCIDO", "MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO", "POPAL")
baja <- c("SIN VEGETACIÓN APARENTE", "NO APLICABLE")

# Reclasificar
uso_sueloPEROTE <- uso_sueloPEROTE %>%
  mutate(fragilidad = case_when(
    TIP_VEG %in% alta ~ "Alta",
    TIP_VEG %in% media ~ "Media",
    TIP_VEG %in% baja ~ "Baja",
    TRUE ~ "Desconocida"
  ))

# Visualizar
tm_shape(uso_sueloPEROTE) +
  tm_polygons("fragilidad", palette = c("darkgreen", "gold", "red"), title = "Fragilidad Visual") +
  tm_layout(title = "Fragilidad Visual del Uso de Suelo - Valle de Perote")

#Mostrar el uso de suelo presente
uso_sueloPEROTE %>%
  st_drop_geometry() %>%
  count(TIP_VEG, sort = TRUE)
```

Paso 5: Cálculo del viewshed

```
library(terra)
library(sf)
library(whitebox)
library(tmap)

# SUSTITUIR - Cargar DEM desde archivo local
DEM_perote <- rast("C:/.../DEM_perote_gdal.tif")

# Reproyectar DEM a EPSG:4326 (compatible con Whitebox)
DEM_perote <- project(DEM_perote, "EPSG:4326")

# Guardar DEM reproyectado para Whitebox
writeRaster(DEM_perote, "DEM_perote_wbt.tif", overwrite = TRUE)

# Cargar DEM
dem <- rast("DEM_perote_wbt.tif")

# Generar puntos de observación dentro del DEM
observadores <- spatSample(
  dem,
  size = 3,
  method = "regular",
  as.points = TRUE
)
crs(observadores) <- crs(dem)
writeVector(observadores, "observadores.shp", overwrite = TRUE)

# Ejecutar viewshed con WhiteboxTools
library(whitebox)
wbt_viewshed(
  dem = "DEM_perote_wbt.tif",
  stations = "observadores.shp",
  output = "viewshed_perote_wbt.tif",
  height = 1.7
)

# Cargar resultado del viewshed
viewshed <- rast("viewshed_perote_wbt.tif")
plot(viewshed)
```

Paso 6: Rasterización de fragilidad visual

```
library(sf)
library(terra)
library(dplyr)

# Validar y filtrar geometrías simples
uso_sueloPEROTE_simple <- uso_sueloPEROTE %>%
  st_make_valid() %>%
  filter(st_geometry_type(.) %in% c("POLYGON", "MULTIPOLYGON"))

# Convertir a SpatVector
```

```
uso_vect <- vect(uso_sueloPEROTE_simple)

# Rasterizar fragilidad visual sobre el raster de visibilidad
viewshed <- rast("viewshed_perote_wbt.tif")
raster_fragilidad <- rasterize(uso_vect, viewshed, field = "fragilidad")
```

Paso 7: Interpolación de fragilidad visual

```
library(sf)
library(terra)
library(tmap)
library(cols4all)

# Cargar ráster de visibilidad
viewshed <- rast("viewshed_perote_wbt.tif")

# Crear ráster de mayor resolución para interpolación
res_mas_fina <- rast(
  ext = ext(viewshed),
  resolution = c(0.0000005, 0.000005), # resolución muy fina en grados
  crs = crs(viewshed)
)

# Interpolación bilineal del ráster original
viewshed_interp <- resample(viewshed, res_mas_fina, method = "bilinear")

# Crear matriz de suavizado (3x3 promedio)
matriz_suavizado <- matrix(1, nrow = 3, ncol = 3)

# Aplicar suavizado focal
viewshed_suave <- focal(viewshed_interp, w = matriz_suavizado, fun = mean, na.policy = "omit")

# Normalizar entre 0 y 1
viewshed_norm <- (viewshed_suave - minmax(viewshed_suave)[1]) /
  (minmax(viewshed_suave)[2] - minmax(viewshed_suave)[1])

# Escalar a rango 0 a 5 y redondear
viewshed_05 <- round(viewshed_norm * 5)
```

Paso 8: Visualización de fragilidad visual

```
library(ggplot2)
library(terra)
library(dplyr)

# Convertir raster a data.frame
df_viewshed <- as.data.frame(viewshed_05, xy = TRUE)
colnames(df_viewshed)[3] <- "fragilidad"

# Visualizar el mapa
ggplot(df_viewshed) +
  geom_raster(aes(x = x, y = y, fill = factor(fragilidad))) +
  scale_fill_manual(
    values = rev(cols4all::c4a("brewer.RdYlGn", n = 6)),
    name = "Fragilidad Visual",
    labels = c("Muy alta", "Alta", "Media", "Media-baja", "Baja", "Muy baja")
  ) +
  coord_equal() +
  theme_minimal(base_size = 14) +
  theme(
    plot.title = element_text(hjust = 0.5, size = 18, face = "bold"),
    legend.position = "right",
    legend.justification = "center",
    panel.border = element_rect(color = "black", fill = NA, size = 1),
    axis.title = element_text(size = 12),
    axis.text = element_text(size = 10),
    axis.ticks = element_line()
  ) +
  labs(
    title = "Fragilidad Visual en el Valle de Perote",
    x = "Longitud (°)", # Coordenadas horizontales
    y = "Latitud (°)" # Coordenadas verticales
  )
```

Paso 9: Visualización de impacto paisajístico

```
# Cargar librerías
library(terra)
library(ggplot2)
library(cols4all)
library(dplyr)

impacto <- viewshed_interp * viewshed_05
```

```
# Suavizar impacto
impacto_suave <- focal(impacto, w = matriz_suavizado, fun = mean, na.policy = "omit")
```

```
# Normalizar impacto entre 0 y 1
impacto_norm <- (impacto_suave - minmax(impacto_suave)[1]) /
  (minmax(impacto_suave)[2] - minmax(impacto_suave)[1])
```

```
# Convertir a data.frame para ggplot
df_impacto <- as.data.frame(impacto_norm, xy = TRUE)
colnames(df_impacto)[3] <- "impacto"
```

```
# Visualizar el mapa
ggplot(df_impacto) +
  geom_raster(aes(x = x, y = y, fill = impacto)) +
  scale_fill_gradientn(
    colours = cols4all::c4a("matplotlib.plasma", n = 100),
    name = "Impacto Paisajístico",
    limits = c(0, 1),
    breaks = seq(0, 1, by = 0.2),
    labels = c("Muy bajo", "Bajo", "Medio", "Alto", "Muy alto", "Extremo")
  ) +
  coord_equal() +
  theme_minimal(base_size = 14) +
  theme(
    plot.title = element_text(hjust = 0.5, size = 18, face = "bold"),
    legend.position = "right",
    legend.justification = "center",
    panel.border = element_rect(color = "black", fill = NA, size = 1),
    axis.title = element_text(size = 12),
    axis.text = element_text(size = 10),
    axis.ticks = element_line()
  ) +
  labs(
    title = "Impacto Paisajístico en el Valle de Perote",
    x = "Longitud (°)",
    y = "Latitud (°)"
  )
)
```

Paso 10: Calcular el porcentaje de impacto paisajístico

```
# Clasificar en niveles simbólicos
impacto_clasificado <- classify(impacto_norm,
  matrix(c(
    0.00, 0.20, 1, # Muy bajo
    0.20, 0.40, 2, # Bajo
    0.40, 0.60, 3, # Medio
    0.60, 0.80, 4, # Alto
    0.80, 0.95, 5, # Muy alto
    0.95, 1.00, 6 # Extremo
  ), ncol = 3, byrow = TRUE)
)
```

```
# Calcular porcentajes por nivel
valores <- values(impacto_clasificado)
valores_validos <- valores[valores %in% 1:6]
tabla <- table(valores_validos)
porcentajes <- round(100 * tabla / sum(tabla), 2)
```

```
# Crear tabla simbólica
categorias <- c("Muy bajo", "Bajo", "Medio", "Alto", "Muy alto", "Extremo")
```

```
# Asegurar que porcentajes tenga 6 valores, rellenando con 0 si falta alguno
porcentajes_completos <- rep(0, 6)
names(porcentajes_completos) <- 1:6
porcentajes_completos[names(porcentajes)] <- porcentajes
```

```
tabla_impacto <- data.frame(
  Nivel = categorias,
  Porcentaje = porcentajes_completos
)
# Generar texto descriptivo
texto_resumen <- paste0(
  "Distribución porcentual del impacto paisajístico:\n",
  paste0("-", tabla_impacto$Nivel, ": ", tabla_impacto$Porcentaje, "%", collaPSFe = "\n")
)
cat(texto_resumen)
```