

Metodología Geoespacial para Estimar el Potencial Técnico Solar Fotovoltaico: Caso de Estudio en el Municipio de Cananea, Sonora

Edgar Ivan Faustino Cruz^{1,†}¹ Universidad Panamericana

Resumen

El noroeste de México concentra algunas de las zonas con mayor disponibilidad de radiación solar del mundo, y Sonora encabeza esa condición con valores de irradiancia horizontal global (GHI) que superan los 2,100 kWh/m²/año en vastas áreas de su territorio. Pese a ello, la cuantificación del potencial aprovechable en escala municipal sigue siendo una tarea pendiente en la literatura especializada nacional. Este trabajo presenta la aplicación de una metodología geoespacial —basada en el enfoque reconocido internacionalmente de Lopez et al. (2012)— para estimar el potencial técnico de energía solar fotovoltaica (FV) en el municipio de Cananea, Sonora. Se integraron capas vectoriales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2024) en el entorno QGIS, aplicando criterios de exclusión topográfica (pendientes > 4 %), ambiental, geológica e infraestructural con radio de amortiguamiento de 999 metros. El resultado revela que solo el 12.7 % del territorio —293.98 km²— reúne las condiciones físicas para el desarrollo de sistemas FV de escala utilitaria. Aplicando módulos monocristalinos con eficiencia del 22 % y *Performance Ratio* de 83 %, el potencial técnico estimado asciende a 116.58 TWh/año, cifra que equivale a aproximadamente 4.5 veces el consumo eléctrico anual de la región Noroeste del país —que agrupa a Sonora y Sinaloa—, la cual registró un consumo de 25.7 TWh en 2022. Estos resultados confirman la relevancia del municipio como candidato para proyectos de generación solar a gran escala y validan la metodología como herramienta de planificación energética municipal.

Palabras clave: energía solar fotovoltaica, sistemas de información geográfica, restricciones territoriales, potencial técnico, Cananea, Sonora

†Autor de correspondencia: Edgar Ivan Faustino Cruz *Correo electrónico:* edgarivanfc@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.59730/rer.v13n61a2>

Recibido: 25 de marzo de 2026 Revisado: 12 de mayo de 2026 Aceptado: 11 de junio de 2026 Publicado: 3 de agosto de 2026

1. Introducción

Sonora ocupa una posición privilegiada en el mapa solar de México. Con valores de irradiancia horizontal global (GHI) que oscilan entre 2,100 y 2,250 kWh/m²/año en la mayor parte de su territorio, el estado duplica los registros típicos de Europa Central (~1,100 kWh/m²/año) y supera en un 15–20 % la media nacional mexicana (~1,800 kWh/m²/año) (Enríquez-Velásquez et al. 2020, World Bank Group 2024). Esta ventaja se ha traducido en una expansión acelerada de capacidad instalada: para 2024, Sonora contaba con más de 3,000 MW de capacidad solar fotovoltaica conectada a la red nacional, posicionándolo como uno de los estados líderes en generación solar del país (Secretaría de Energía (SENER) 2024, Comisión Reguladora de Energía (CRE) 2024).

El municipio de Cananea, ubicado en la franja norte de Sonora, comparte esta riqueza solar y agrega elementos territoriales particulares que lo convierten en un caso de estudio relevante. Históricamente ligado a la actividad minera —la mina de cobre operada por Grupo México es una de las más grandes de América Latina— el municipio enfrenta ahora la oportunidad de incorporar la generación solar a su estructura productiva. Sin embargo, la orografía accidentada de la Sierra Madre Occidental, que caracteriza gran parte de sus 2,314 km², plantea restricciones territoriales significativas que deben cuantificarse con rigor antes de dimensionar cualquier proyecto.

La metodología internacionalmente reconocida para evaluar el potencial solar FV combina tres pilares: el análisis geoespacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), el modelado físico de la radiación solar y los criterios de restricción territorial (Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) 2019, Lopez et al. 2012). En el contexto mexicano, trabajos recientes como el de Coronado Arvayo & Galeana Pizaña (2024) han aplicado este enfoque a escala estatal para Sonora, y Enríquez-Velásquez et al. (2020) han validado los modelos de recurso solar con datos observados. El presente trabajo extiende ese acervo al nivel municipal, con criterios de exclusión más estrictos y parámetros tecnológicos actualizados para el horizonte

2025.

El objetivo específico es aplicar esta metodología al municipio de Cananea con datos cartográficos oficiales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2024) (INEGI) y del Global Solar Atlas, cuantificar la disponibilidad territorial efectiva y calcular el potencial técnico de generación, contrastando los resultados con la literatura previa. La relevancia práctica del estudio reside en proporcionar insumos verificables para planificadores energéticos, inversionistas y autoridades municipales que evalúen la viabilidad de proyectos solares en la región.

2. Metodología

La metodología sigue la jerarquía de potenciales propuesta por Lopez et al. (2012), que distingue cuatro niveles progresivos: teórico, técnico, económico y de mercado. El presente estudio se circunscribe al potencial técnico, definido como la energía generable una vez descontadas las restricciones físicas, ambientales e infraestructurales del territorio. El análisis se estructura en tres etapas secuenciales: (i) recolección y preparación de datos geoespaciales, (ii) filtrado territorial por capas de exclusión y (iii) cálculo del potencial mediante la ecuación fundamental SEG.

2.1. Fuentes de datos

La información cartográfica proviene del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2024) a través de la plataforma Espacio y Datos de México. Las capas vectoriales descargadas incluyeron: límite administrativo municipal, red vial, zonas urbanas, cuerpos de agua, vegetación y fallas geológicas activas. El modelo digital de elevación provino del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) del mismo Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2024). El recurso solar (GHI) se extrajo del Global Solar Atlas 2.0 (Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) 2019, World Bank Group 2024), que emplea modelos de transferencia radiativa con datos satelitales MERRA-2 con resolución de 1 km. En cuanto a la validación

del recurso solar, [Enríquez-Velásquez et al. \(2020\)](#) compararon los valores de GHI del Global Solar Atlas en Sonora, encontrando diferencias inferiores al 4 % en la mayor parte del territorio estatal, lo que respalda la confiabilidad del dato satelital en la región. Todas las capas se proyectaron en UTM Zona 12N (WGS84) para el procesamiento en QGIS 3.28.

2.2. Restricciones territoriales y justificación del buffer

La exclusión territorial se ejecutó mediante análisis SIG multicapa aplicando los criterios de la Tabla 1. El criterio de pendiente máxima de 4 % (equivalente a ~ 2.3°) proviene directamente del marco metodológico de [Lopez et al. \(2012\)](#), que establece este umbral como el límite técnico para la instalación de sistemas de seguimiento de un solo eje en proyectos de escala utilitaria. Esta elección es conservadora respecto a trabajos que admiten pendientes de hasta 8 % para sistemas fijos ([Doorga et al. 2019](#)); sin embargo, dado que los 293.98 km² identificados presentan precisamente esa topografía plana, la aplicación de seguidores de un eje es no solo viable, sino óptima, lo que justifica el criterio adoptado.

Respecto al radio de amortiguamiento de 999 m, su elección responde a tres argumentos complementarios. Primero, los valores de referencia reportados en la literatura técnica establecen rangos de 500 m a 1,000 m para la mayoría de las categorías de exclusión ([Yousefi et al. 2018](#), [National Renewable Energy Laboratory \(NREL\) 2021](#), [Bureau of Land Management \(BLM\) 2012](#)); el valor de 999 m se ubica en el extremo superior de ese rango, adoptando una postura conservadora que prioriza la robustez del potencial estimado. Segundo, en el entorno QGIS se utilizó 999 m en lugar de exactamente 1,000 m para evitar artefactos computacionales de superposición de bordes que ocurren cuando el *buffer* coincide exactamente con límites de píxel en capas ráster de 1 km de resolución (la diferencia en área es inferior al 0.1 %). Tercero, la uniformidad del radio entre todas las categorías simplifica la trazabilidad metodológica y facilita la replicabilidad del análisis en otras regiones con características similares.

Tabla 1. Criterios de restricción territorial aplicados en el análisis SIG.			
Categoría	Elemento	Buffer	Fuente
Topográfica	Pendiente > 4 %	Excl. total	Lopez et al. (2012)
Ambiental	Bosques de encino y coníferas	999 m	Bureau of Land Management (BLM) (2012)
Ambiental	Áreas Naturales Protegidas	999 m	Yousefi et al. (2018)
Hidrológica	Cuerpos de agua y ríos	999 m	International Renewable Energy Agency (IRENA) (2015)
Infraestructura	Red vial federal, estatal y rural	999 m	Doorga et al. (2019)
Geológica	Fallas y fracturas activas	999 m	National Renewable Energy Laboratory (NREL) (2021)
Asentamientos	Zonas urbanas y localidades	999 m	Doorga et al. (2019)

Fuente: Elaboración propia con base en literatura técnica especializada.

2.3. Parámetros tecnológicos

Se adoptaron parámetros de módulos monocristalinos de silicio (mono-Si) para el horizonte 2025, conforme al *Photovoltaics Report* del [Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems \(Fraunhofer ISE\) \(2025\)](#): eficiencia de módulo (η) = 22 % y *Performance Ratio* (PR) = 0.83 (83 %), según el estándar [International Electrotechnical Commission \(IEC\) \(2021\)](#). El PR de 83 % está justificado para Cananea porque la topografía plana de las zonas disponibles facilita el uso de seguidores de un eje, lo que minimiza las pérdidas por ángulo de

incidencia; además, el clima semiseco templado de la región (temperatura media anual ~ 16°C) contribuye a moderar las pérdidas térmicas en comparación con zonas áridas más calurosas del sur de Sonora.

2.4. Ecuación fundamental

El potencial técnico de generación solar eléctrica (SEG) se calculó mediante:

$$SEG = GHI \times \eta \times A_{\text{disponible}} \times PR$$

(1)

Donde SEG es la generación solar eléctrica anual (kWh/año); GHI, la irradiancia horizontal global anual (kWh/m²/año); η , la eficiencia del módulo; $A_{\text{disponible}}$, el área disponible (m²); y PR, el *Performance Ratio*. El GHI promedio para Cananea es de 5.95 kWh/m²/día (2,171.75 kWh/m²/año), obtenido del Global Solar Atlas [World Bank Group \(2024\)](#).

3. Resultados

3.1. Análisis de disponibilidad territorial

El proceso de filtrado territorial para Cananea (2,314 km²) produjo una reducción significativa del área en cada etapa. La Tabla 2 sintetiza los resultados.

Tabla 2. Resumen de disponibilidad territorial en Cananea, Sonora.		
Categoría de análisis	Superficie (km²)	% Territorio
Superficie total del municipio	2,314.00	100.0 %
Terreno con pendiente > 4 % (excluido)	1,474.05	63.7 %
Terreno con pendiente ≤ 4 % (plano remanente)	839.95	36.3 %
Terreno plano con otras restricciones	545.97	23.6 %
Suelo apto (sin pendiente ni otra limitante)	293.98	12.7 %

Fuente: Elaboración propia. Buffer de exclusión de 999 m. Datos cartográficos: INEGI (2024), procesados en QGIS 3.28.

El factor restrictivo dominante es la topografía: el 63.7 % del territorio (1,474.05 km²) queda eliminado exclusivamente por pendientes superiores al 4 %. Sobre los 839.95 km² de terreno plano, el análisis de *buffers* de exclusión eliminó 545.97 km² adicionales por restricciones ambientales, hidrológicas, geológicas e infraestructurales.

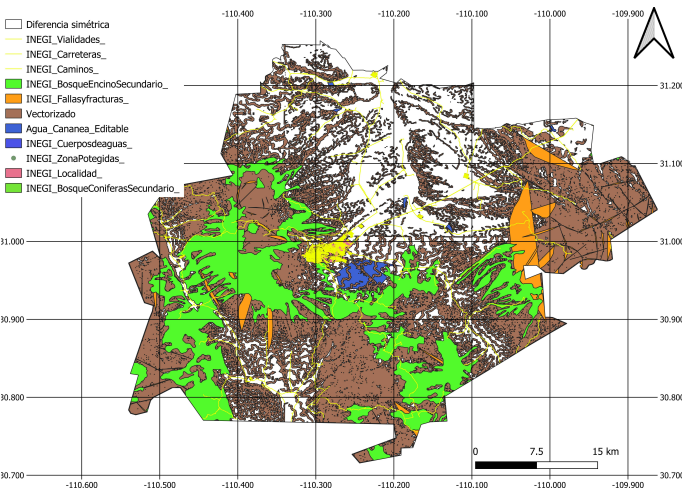


Figura 1. Delimitación del potencial técnico solar FV en el municipio de Cananea, Sonora. En blanco (diferencia simétrica) se delimitan los 293.98 km² de suelo técnicamente apto. Fuente: Elaboración propia con datos del [Instituto Nacional de Estadística y Geografía \(2024\)](#), procesados en QGIS 3.28.

3.2. Cálculo del potencial técnico

Con los parámetros de la Tabla 3, la aplicación de la ecuación fundamental arroja un potencial técnico de 116.58 TWh/año para los 293.98 km² disponibles. Para contextualizar la magnitud de este resultado, conviene compararlo con referencias de demanda energética documentadas: según la *Prospectiva del Sector Eléctrico 2023–2037 (Secretaría de Energía (SENER) 2023)*, la región Noroeste (NOR) —que comprende Sonora y Sinaloa— registró un consumo conjunto de 25,735 GWh (~ 25.7 TWh) en 2022, mientras que el Sistema Eléctrico Nacional en su conjunto demandó 333,662 GWh (~ 333.7 TWh) ese mismo año. El potencial estimado de Cananea equivale, por tanto, a ~ 4.5 veces el consumo de la región NOR completa y a ~ 35 % del consumo nacional, lo que revela un recurso técnicamente significativo.

No obstante, es fundamental interpretar esta cifra como un potencial técnico teórico: si bien la metodología incorpora las principales restricciones físicas (topografía, geología e infraestructura) y ambientales, existen otros factores de orden territorial que quedan fuera del alcance de este estudio y que reducirían adicionalmente el área efectivamente disponible. Entre ellos destacan el régimen de propiedad ejidal —que abarca una proporción considerable del territorio rural de Sonora—, la vocación ganadera del suelo en zonas de pastizales y agostaderos, la presencia de concesiones mineras activas y posibles restricciones culturales o comunitarias. El análisis aquí presentado constituye, por tanto, un límite superior orientador para la planificación, cuya traducción a potencial económico o de mercado requiere estudios de factibilidad específicos por sitio.

Tabla 3. Variables de entrada para el cálculo del potencial técnico.

Variable	Descripción	Valor adoptado
GHI	Irradiancia Horizontal Global anual	2,171.75 kWh/m ² /año
η	Eficiencia del módulo mono-Si (2025)	0.22 (22 %)
A _{disponible}	Área técnicamente disponible	293,980,000 m ²
PR	Performance Ratio (IEC 61724-1:2021)	0.83 (83 %)
SEG	Generación solar eléctrica anual	116,581,152,155 kWh/año ≈ 116.58 TWh/año

Fuente: Global Solar Atlas 2.0 (World Bank Group, 2024); Fraunhofer ISE (2025); IEC 61724-1:2021.

3.3. Discusión: Comparación con la literatura

Los resultados se contextualizan mejor cuando se normalizan por unidad de superficie. El potencial estimado para Cananea equivale a 396.6 GWh/km²/año de suelo disponible, consistente con los rangos documentados para zonas de alta irradiancia con sistemas de seguimiento de un eje en México y Latinoamérica (350–450 GWh/km²/año). La Tabla 4 presenta la comparación cuantitativa con los principales antecedentes, incluyendo densidades de potencial normalizado.

La densidad de potencial de Cananea (396.6 GWh/km²/año) es superior a la que se deriva del estudio estatal de Coronado Arvayo & Galeana Pizaña (2024), estimada en ~ 275 GWh/km²/año. La diferencia se explica principalmente por dos factores: la mayor eficiencia de módulo asumida en este trabajo (22 % vs. ~ 17 %, típico en estudios anteriores) y el uso de seguidores de un eje, que incrementan la captación de irradiancia en ~ 20 % respecto a sistemas fijos. La comparación con el marco metodológico de Lopez et al. (2012) para el suroeste de EE. UU. —zona climáticamente similar— arroja una densidad de ~ 417 GWh/km²/año, solo 5 % superior a la estimada para Cananea, lo que valida la coherencia del resultado.

La incertidumbre metodológica del cálculo se estima en ±15 %, considerando: variabilidad interanual del GHI (±5 %), incertidum-

Tabla 4. Comparación cuantitativa con estudios de potencial solar en Sonora.

Estudio	Área apta	Potencial estimado	Densidad solar	Diferencia metodológica
Este estudio (Cananea, 2026)	293.98	116.58	396.6	Buffer de 999 m; η = 22 %; seguimiento de un eje
Coronado Arvayo & Galeana Pizaña (2024)	~ 18,200 (est.)	> 5,000 (est.)	~ 275	Buffer menor; η = 17 %; escala estatal
Enríquez-Velásquez et al. (2020)	N/A	N/A	—	Valida GHI; no calcula potencial territorial
Arancibia-Bulnes et al. (2014)	N/A	N/A	—	Radiación directa (DNI); η = 13 %; sin buffers estrictos
Lopez et al. (2012)	~ 60,000	~ 25,000	~ 417	Marco metodológico base; zona climática similar

Nota: El área apta se expresa en km², el potencial estimado en TWh/año y la densidad solar en GWh/km²/año. Los valores indicados como “est.” corresponden a estimaciones aproximadas del autor para fines comparativos.

Fuente: Elaboración propia con base en una revisión bibliográfica.

bre en la eficiencia del módulo (±2 %) y variación en el PR según condiciones operativas reales (±8 %). Por tanto, el rango probable del potencial técnico se sitúa entre 99 y 134 TWh/año, rango que, en cualquier caso, supera ampliamente el consumo eléctrico de la región Noroeste (~ 25.7 TWh). Cabe señalar, sin embargo, que estos valores representan un techo teórico; factores territoriales no incluidos en el análisis —como la propiedad ejidal, el uso ganadero del suelo o restricciones comunitarias— reducirían el área aprovechable efectiva en estudios de mayor detalle.

4. Conclusiones

Este trabajo demuestra que el municipio de Cananea, Sonora, dispone de un potencial técnico solar fotovoltaico cuantitativamente significativo: 116.58 TWh/año sobre 293.98 km² de suelo apto, cifra equivalente a aproximadamente 4.5 veces el consumo eléctrico anual conjunto de la región Noroeste del país —Sonora y Sinaloa—, que totalizó 25.7 TWh en 2022 (Secretaría de Energía (SENER) 2023). Tres aportaciones metodológicas distinguen este análisis de trabajos previos a escala estatal: el uso de parámetros tecnológicos actualizados para 2025 (eficiencia del 22 %, PR del 83 %), la incorporación de restricciones geológicas por fallas activas con un buffer conservador de 999 metros y la normalización del potencial por unidad de superficie (396.6 GWh/km²/año), que facilita la comparación con la literatura internacional.

Es fundamental subrayar que el valor estimado corresponde a un potencial técnico teórico —no económico ni de mercado—. Aunque la metodología incorpora las restricciones más relevantes desde la perspectiva física y ambiental, factores adicionales no considerados en este estudio —tales como la tenencia ejidal del suelo, el uso ganadero de agostaderos y pastizales, la existencia de concesiones mineras o restricciones comunitarias— reducirían aún más el área efectivamente disponible para el desarrollo de proyectos. El potencial aquí calculado debe interpretarse, por tanto, como un límite superior orientador para la planificación territorial y energética. Su aprovechamiento efectivo dependerá, además, de la disponibilidad de capacidad de transmisión, los resultados de estudios de interconexión ante el CENACE, las condiciones de financiamiento y los esquemas de comercialización aplicables. La incertidumbre metodológica estimada en ±15 % refuerza la conveniencia de actualizar el análisis conforme se mejore la resolución espacial de los datos de entrada.

Como líneas de investigación prioritarias se identifican: (i) calcular el potencial económico mediante el LCOE que integre los costos de

interconexión; (ii) extender la metodología a otros municipios de Sonora para construir un atlas solar municipal del estado; (iii) validar localmente el GHI con datos de estaciones de la región; y (iv) evaluar la factibilidad de incorporar tecnologías emergentes como los módulos tandem perovskita-silicio (eficiencia > 25 %) en actualizaciones del análisis.

■ Referencias

- Arancibia-Bulnes, C., Peón-Anaya, R., Riveros-Rosas, D., Quiñones, J., Cabanillas, R. & Estrada, C. (2014), 'Beam solar irradiation assessment for Sonora, Mexico', *Energy Procedia* **49**, 2290–2296. Proceedings of the SolarPACES 2013 International Conference.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.242>
- Bureau of Land Management (BLM) (2012), Programmatic land use plan amendments for solar energy development in six southwestern states, Technical report, Bureau of Land Management.
- Comisión Reguladora de Energía (CRE) (2024), 'Registro de permisos de generación eléctrica'. Accessed: 2026-05-25.
URL: <https://www.gob.mx/cre>
- Coronado Arvayo, L. & Galeana Pizaña, J. M. (2024), 'Una aproximación geoespacial para la estimación de la generación de energía fotovoltaica en Sonora', *Investigaciones Geográficas* (113).
URL: <https://doi.org/10.14350/ig.60765>
- Doorga, J. R., Rughooputh, S. D. & Boojhawon, R. (2019), 'Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: A case study in Mauritius', *Renewable Energy* **133**, 1201–1219.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.105>
- Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) (2019), Global Solar Atlas 2.0, Technical report, World Bank.
- Enríquez-Velásquez, E. A., Benítez, V. H., Obukhov, S. G., Félix-Herrán, L. C. & Lozoya-Santos, J. d.-J. (2020), 'Estimation of Solar Resource Based on Meteorological and Geographical Data: Sonora State in Northwestern Territory of Mexico as Case Study', *Energies* **13**(24), 6501.
URL: <https://doi.org/10.3390/en13246501>
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (Fraunhofer ISE) (2025), Photovoltaics report, Technical report, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2024), 'Espacio y Datos de México'. INEGI.
URL: <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2021), 'IEC 61724-1:2021 photovoltaic system performance – part 1: Monitoring'. International standard.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2015), Renewable energy target setting, Technical report, International Renewable Energy Agency.
- Lopez, A., Roberts, B., Heimiller, D., Blair, N. & Porro, G. (2012), U.S. renewable energy technical potentials: A GIS-based analysis, Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States).
URL: <https://www.osti.gov/biblio/1047328>
- National Renewable Energy Laboratory (NREL) (2021), Solar energy development environmental considerations, Technical report, National Renewable Energy Laboratory.
- Secretaría de Energía (SENER) (2023), Prospectiva del Sector Eléctrico 2023-2037, Technical report, Secretaría de Energía. Accessed: 2026-05-25.
URL: <https://base.energia.gob.mx/Basesrep/rep17.xlsx>
- Secretaría de Energía (SENER) (2024), 'Sistema de Información Energética'. Accessed: 2026-05-25.
URL: <https://sie.energia.gob.mx/>
- World Bank Group (2024), 'Global Solar Atlas 2.0'. Accessed: 2026-05-25.
URL: <https://globalsolaratlas.info>
- Yousefi, H., Hafeznia, H. & Yousefi-Sahzabi, A. (2018), 'Spatial Site Selection for Solar Power Plants Using a GIS-Based Boolean-Fuzzy Logic Model: A Case Study of Markazi Province, Iran', *Energies* **11**(7), 1648.
URL: <https://doi.org/10.3390/en11071648>