113

ISSN 2448-7279

Investigaciones Geográficas

Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México
Abril 2024

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60885 • EDITORIAL
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60885
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Una geografía sensible, abierta a la aventura, al viaje y a las emociones está presente en el mundo de la fotografía de la segunda mitad del siglo XX, a partir del cambio en los medios de transporte y del hospedaje de México. La entrega de un archivo fotográfico a la Biblioteca "Antonio García Cubas" del Instituto Geografía de la UNAM, abre nuevas vías y estímulos en la comprensión de México como un país abierto a la exploración y al asombro, a nuevas experiencias, a la mirada dirigida a la enorme extensión territorial y a la variedad de sus paisajes, a la vez que a los remotos orígenes. Tal situación merece la atención en este Editorial de *Investigaciones Geográficas*, revista del Instituto de Geografía de la UNAM.

Durante las décadas de 1960 y 1970, desde el ámbito del periodismo y la publicidad, se difunde la idea de un México ignoto, inexplorado y sus paisajes se presentan como un "enciclopédico caudal de emociones" (Möller, 1973, p. 13). Los mexicanos cuentan con una "geografía asombrosa", toda por descubrir, afirmaba Harry Möller (1924-2009), un publicista alemán, autor desde 1965 de una columna dominical en el periódico *Novedades*, bajo el título "México desconocido".[1] Unos años después, el conjunto de estas entregas dio lugar al libro del mismo nombre (Möller, 1973).[2] Con esta trayectoria a cuestas, publica una revista con el mismo nombre a partir de noviembre de 1976 (Lozada, 2009, p. 67).[3] Usa el coche para trabajar y "[para hacer los artículos] primero viajaba al lugar y después escribía, después comencé a informarme, pero no me funcionó porque si tú sabes lo que te vas a encontrar ya no hay sorpresa, ya sabes lo que vas a encontrar y así no hay impacto, fue por eso que decidí regresar al viejo método, sin saber nada del lugar, así la descripción que hacía me resultaba más auténtica" (Lozada, 2009, p. 80).

Como resultado de la aventura editorial, se identifican tres épocas en la vida de la revista[4] y la formación de una colección de 70 000 fotografías publicadas durante su historia (Lozada, 2009, p. 73). Tal conjunto fotográfico es visto desde diversos ángulos e intereses, tanto desde el tema de la digitalización del acervo, como su registro, almacenaje, accesibilidad y circulación entre un público cada vez más interesado por la cultura visual y las nuevas relaciones que se abren entre las imágenes y la manera cómo "nos entendemos a nosotros mismos y a nuestra relación con otros" (Gillian, 2019, p. 10). Tal universo fotográfico abre un sinfín de planteamientos acerca de "cómo abordar, pensar e interpretar esta cultura visual" construida durante casi medio siglo de trabajo editorial.

[1] *México desconocido* es el título del libro del noruego Karl Sojus Lumholtz (1851-1922), publicado en dos tomos por Charles Scribner's Sons, Nueva York, en 1904, en donde describe sus primeros cuatro viajes, entre 1890 y 1898, por la Sierra Madre Occidental, desde Arizona a Jalisco, a Michoacán y a la Ciudad de México.

[2] Este libro se integra por 118 entradas geográficas en siete secciones, una más con datos sobre los 49 parques nacionales (pp. 323-332), a la que le sigue el apartado ¿Pero qué es el turismo? (pp. 333-339), otro con las referencias de viaje (pp. 340-349) y otro con las rutas de autotransporte desde la Ciudad de México (pp. 350-351).

[3] La revista *México Desconocido* se vende en los puestos de periódicos, supermercados y aeropuertos, entre revistas de moda y del corazón, en una época cuando la "geografía no tiene mucha atracción popular" (Tuan, 2015, p. 171).

[4] La primera parte de la vida de la revista corre de noviembre de 1976 a 1992 (a cargo de Möller), la segunda de 1992 a abril de 1996, en la tercera época alcanza tirajes de 60 000 ejemplares mensuales (Lozada, 2009, p. 68-71 y 89), el último número editado es de abril de 2020 (Romo Cedano, comunicación personal, 14 de marzo 2024).

Del total de esta colección fotográfica, unas 18 000 corresponden al fotógrafo Luis Romo Cedano que ha entregado, generosamente, su archivo personal a la Biblioteca del Instituto de Geografía de la UNAM, en febrero pasado.[5] Esta dependencia universitaria se adentra a una época de tránsito hacia las culturas visuales, donde también se han incorporado otros productos también visuales, como los mapas, las fotografías aéreas,[6] las tarjetas postales o las imágenes de satélite, algunos todavía en formatos analógicos aunque, una vez transformados, abren nuevas formas de pensar y de practicar el trabajo geográfico, ya no solamente con base en la cultura textual o la transmisión de conocimientos por vía oral.

Entre las múltiples opciones o nuevas rutas de trabajo geográfico para el siglo XXI hay, por un lado, las nuevas metodologías para la invención de marcos teóricos e interpretativos de las imágenes y la investigación de la cultura visual, y por el otro, la apertura hacia el mundo de las emociones y la experiencia. Ambas perspectivas tienen en las fotografías, como las de Romo Cedano, nuevas fuentes para indagar la dimensión sensible de la geografía.

En la primera, por ejemplo, se requieren nuevos métodos de trabajo con este material visual, no hay uno fijo y estable, se formulan preguntas y la invención de marcos teóricos identifican evidencias, las fotografías dan respuestas y nos adentran a las practicas sociales, así como a los significados y a los efectos sociales (Gillian, 2019, p. 35). ¿Cómo miramos el cambio de la concepción de la vida social? Aquí es donde las tecnologías visuales, como las fotografías, ofrecen visiones del mundo, "nunca es inocente, tampoco son ventanas transparentes hacia el mundo, lo exponen de formas muy concretas: lo representan" (Gillian, 2019, p. 41). Las fotografías de *México desconocido* ¿producen una visualidad dominante para ver y ordenar el mundo? De manera particular, las imágenes de Romo Cedano nos permiten ver, nos hacen ver el paisaje de esos años ¿con una visión de los rasgos naturales o más con un enfoque cultural de la geografía? Lo visual forma parte de la vida social, de ahí que suscitan en la persona que mira las imágenes el placer, la emoción, la fascinación, el asombro, el miedo o la repulsión y luego escribe sobre ellas, aunque no todas las personas responden a la forma de ver y a sus prácticas de visualización (Gillian, 2019, pp. 35 y 63).

Por el otro, las imágenes permiten "reconstruir y explicar los significados culturales que dieron a las emociones de cada época, espacio o comunidad" (Roselló, 2023, p. 29). Las fotografías de Romo Cedano son indicios para "rastrear y explicar los significados ocultos detrás de esas experiencias sensibles" que la sociedad mexicana vive durante los viajes por los paisajes mexicanos. Estas fotografías, tomadas entre 1988 y 2008, ofrecen las pistas de una geografía que indaga la "dimensión sensible, afectiva y emocional" (Roselló, 2023, p. 9),[7] y dejan ver las formas de pensar y de ordenar el mundo, o sea las formas de sentir en cada viaje. En las imágenes de esos años se encuentra la "experimentación de las emociones, sentimientos y afectos" (Roselló, 2023, p. 30) vividos por un sector de la sociedad mexicana en los viajes, en los lugares, en los paisajes. La mercadotecnia de la revista *México desconocido* crea no solo la necesidad del viaje, también los deseos y anhelos entre los exploradores para salir, ver y contar con nuevas experiencias (Roselló, 2023, p. 33 y 38).

Todo esto resulta atractivo y estimulante, a la vez que refresca y revitaliza los enfoques y diálogos de la geografía con las imágenes, que se sumergen en un contexto social particular y "también en una localización específica con sus propias prácticas

[5] El archivo procede de los viajes de Romo Cedano, por lo que las fotografías tienen un orden geográfico: de norte a sur y de oeste a este del país (Romo Cedano, comunicación personal, 14 de marzo 2024).

[6] Sobre el "desarrollo, el almacenamiento, la organización, la catalogación y el uso de las colecciones de fotografías aéreas (FA) de la Biblioteca Antonio García Cubas del Instituto de Geografía (IGg) de la UNAM", y de forma particular de la colección de Mario Arturo Ortiz Pérez (MAOP), véase Iturbe Fuentes *et. al.* 2022.

[7] La perspectiva emocional de la geografía la plantea Eric Dardel desde la "tonalidad afectiva" del paisaje en su libro *El hombre y la Tierra* (2013) y es la faceta que indaga Yi-Fu Tuan en *Geografía romántica* (2015) donde presenta el modo de experimentar la belleza, de sentir las emociones o el peligro en las grandes extensiones de la Tierra como las montañas, los océanos, los bosques, los desiertos o el hielo.

concretas" (Gillian, 2019, p. 65). En resumen, indica Gillian, a las imágenes hay que "mirarlas con mucho cuidado", considerar sus "condiciones sociales" y tener en cuenta desde donde miramos, es decir, nuestro "propio modo de mirar a las imágenes" (Gillian, 2019, pp. 67-68).[8]

REFERENCIAS

Dardel, E. (2013). *El hombre y la Tierra. Naturaleza de la realidad geográfica*. Biblioteca Nueva [edición original en PUF, Paris, 1952].

Gillian, R. (2019). *Metodologías visuales. Una introducción a la investigación con materiales visuales*. Centro de Documentación y Estudios Avanzados de Arte Contemporáneo.

Iturbe Fuentes, L. R., Vilches Malagón, C., Paquini Vega, R., Luna Fuentes, J. M., y Sandoval Cortés, M. R. (2022). La Colección MAOP de fotografías aéreas de la Biblioteca del Instituto de Geografía UNAM: un cambio epistemológico en el tratamiento y procedimientos (1era. parte). *Biblioteca Universitaria*, *25*(2). https://doi.org/10.22201/dgbsdi.0187750xp.2022.2.1471

Lozada Rosillo, A. E. (2009). *Análisis y propuesta de contenido de publicaciones especializadas en turismo: caso México Desconocido*. Tesis para obtener el título de Licenciado en Ciencias de la Comunicación México. Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, UNAM.

Möller, H. (1973). *México desconocido. Un país en busca de exploradores*. Instituto Nacional de la Juventud Mexicana.

Roselló Soberón, E. (2023). *Historia de las emociones para una nueva era: cuidados, riesgos y esperanzas*. Serie: Históricas Comunicación Pública 12. Instituto de Investigaciones Históricas, UNAM.

Tuan, Y-F. (2015). *Geografía romántica. En busca del paisaje sublime*. Biblioteca Nueva.

[8] Los modos son histórica, geográfica, social, cultural y socialmente específicos (Gillian, 2019, p. 68).

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60837 • ARTÍCULOS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60837
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Geoformas litorales como indicadores del estado morfodinámico de las playas arenosas del litoral nororiental de Cuba

Beach landforms as indicators of the morphodynamics state of the sandy beaches of the northeastern coast of Cuba

Ridel Rodríguez Paneque*

Recibido: 18/12/2023. Aceptado: 15/02/2023. Publicado: 01/04/2024.

Resumen. Los modelos de clasificación de playa son ampliamente usados para describir el estado de la playa en respuesta a las condiciones ambientales reinantes y han establecido las bases teóricas sobre los modelos de perfil de equilibrio y en planta de una playa y sus diversas aplicaciones. En el estudio se determina el estado morfodinámico en 54 playas biogénicas arenosas del litoral nororiental de Cuba, a partir de la identificación de las geoformas litorales encontradas en trabajos de terrenos, para el periodo comprendido entre agosto de 2018 y marzo del año 2022, y las geoformas identificadas en imágenes satelitales de alta resolución de Google Earth Pro (CNES/Airbus, Maxar Technologies). Además, se comprobó en 12 playas representativas del litoral nororiental, si las geoformas litorales observadas en los trabajos de campo, indicativas de ciertos estados morfológicos, se corresponden con las pronosticadas mediante el parámetro adimensional Ω o Índice de Dean, que permite clasificar las playas en disipativas, reflejantes e intermedias. Como rasgos geomorfológicos fundamentales destacan un ancho medio de la playa superior a 50 m, una cara de 11 m de ancho y bermas estrechas o ausentes, con altura media de 1.35 m, sin la presencia de cúspides y topografías rítmicas, excepto en el 26% de las playas y únicamente en la etapa invernal. En la parte sumergida aparece una barra de arena de poca altura, sin la presencia de corrientes de resaca. La presencia de arrecifes coralinos que protegen las playas del oleaje de mayor altura, en el 93% de los casos, constituye el rasgo geomorfológico más significativo de las playas objeto de estudio. El cálculo del parámetro adimensional confirmó que las playas del litoral nororiental de Cuba corresponden a estados morfodinámicos de tipo intermedio y tienden más a estados modales reflejantes que disipativos, resultados que se corresponden con las geoformas litorales y la granulometría de los sedimentos encontrados en las playas objetos de estudio. Aun cuando las características reportadas por investigadores australianos, para playas intermedias coincidan con los valores pronosticados mediante el cálculo del parámetro adimensional Ω y con las características sedimentarias de las playas, las geoformas reportadas por estos, para playas intermedias, no fueron encontradas en las playas objeto de estudio. En ellas no aparecen corrientes de retorno, cadenas de surcos litorales, terrazas de bajamar, marcada topografía rítmica y cúspides. Otros estudios también han señalado que no siempre se cumple la clasificación de las playas, que tiene en cuenta las características de las olas y la velocidad de caída de los sedimentos, propuestas por investigadores australianos, debido particularmente a la presencia de arrecifes coralinos cercanos a la costa, la baja energía del oleaje y el control geológico. A ello habría que añadir el predominio del transporte longitudinal de arena sobre el transporte transversal en el área de estudio. Los resultados confirman que la clasificación de las playas, atendiendo a su estado morfodinámico es esencial para comprender la dinámica espacio-temporal de los procesos hidrodinámicos que tienen lugar en las playas y un mejor conocimiento local y regional de las mismas. Además, reafirman la necesidad de contar con estudios específicos de las características hidrodinámicas y sedimentarias propias de cada litoral, antes

* Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales de Holguín (CISAT). Calle 18 e/. 1ra y Maceo, Rpto. El Llano, Holguín, 80100, Cuba. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2232-9937. E-mail: alex.ridel@gmail.com; ridel@cisat.cu

de extrapolar modelos de perfil de equilibrio en playas y las ecuaciones que se deriven de ellos en las actuaciones para el control de la erosión.

Palabras claves: playas biogénicas, hidrodinámica, geomorfología litoral, arrecifes coralinos, regeneración de playas

Abstract. Beach classification models are widely used to describe the state of the beach in response to the prevailing environmental conditions and have set the theoretical grounds for equilibrium and in-plant profile models of a beach and their various applications. This study determined the morphodynamic state of 54 sandy biogenic beaches on the northeast coast of Cuba. This was done based on the identification of coastal geoforms found in land works between August 2018 and March 2022 and the geoforms identified in high-resolution satellite images from Google Earth Pro (CNES/Airbus, Maxar Technologies). In addition, on 12 representative beaches on the northeast coast, we explored whether the coastal geoforms indicative of certain morphological states observed during fieldwork match those predicted by the Ω dimensionless parameter or Dean's index, which classified beaches as dissipative, reflective, and intermediate. The main geomorphological features include an average beach width of more than 50 m, an 11 m-wide face, and a narrow or absent flat zone with a mean height of 1.35 m, lacking cusps and rhythmic topography, except for 26 % of beaches and only in winter. The submerged zone shows a low sand bar without rip currents. Coral reefs that protect the beaches from the highest waves in 93 % of the cases represent the distinctive geomorphological feature of the beaches studied. The dimensionless parameter confirmed that the beaches of Cuba's northeast coast correspond to intermediate morphodynamic states with a trend toward reflective rather than dissipative modal states. These findings correspond to the coastal geoforms and sediment granulometry on the beaches studied.

The figures obtained with the dimensionless parameter Ω and the sedimentary characteristics of the beaches are consistent with the characteristics of intermediate beaches reported by Australian researchers, but we did not find the geoforms for intermediate beaches reported by them. The beaches studied showed no rip currents, chains of coastal furrows, low-tide terraces, marked rhythmic topography, and cusps. Other studies have also pointed out that the beach classification proposed by Australian researchers, which considers the characteristics of waves and the sedimentation rate, is not always applicable. In the study area, this is mainly due to the presence of coral reefs close to the coast, low wave energy, and the influence of geological factors, in addition to the prevalence of longitudinal over transverse sand transport. Our results confirm that beach classification considering their morphodynamic state is essential to understanding the spatio-temporal dynamics of the hydrodynamic processes on beaches and contributes to a better local and regional knowledge of them. In addition, they highlight that the hydrodynamic and sedimentary characteristics of each coastline should be studied before using beach equilibrium profile models and the equations derived from them for erosion control actions.

Keywords: biogenic beaches, hydrodynamics, coastal geomorphology, coral reefs, beach regeneration.

INTRODUCCIÓN

Las playas constituyen sistemas dinámicos en constante proceso de cambio como consecuencia directa del clima marítimo que las afecta, y en un proceso de balance entre las pérdidas e ingresos de sus sedimentos. La granulometría, la formación en planta y la sección transversal de la playa son elementos activos, cuya estabilidad dinámica depende, fundamentalmente, de la estabilidad energética y del ángulo de incidencia de los oleajes (Zenkovich, 1967; Medina *et al.*, 2001; Bird y Lewis, 2015; Alemán *et al.*, 2015; Casamayor *et al.*, 2022; Castelle y Masselink, 2023).

A largo plazo, la playa tenderá a presentar un perfil determinado por las características del sedimento, las condiciones medias del oleaje y el estado previo de la playa (Short, 2006; Scott *et al.*, 2011 y Merlotto *et al.*, 2013; Vos *et al.*, 2019). Sin embargo, como las variaciones de los diferentes agentes (oleaje, marea, tamaño del grano de sedimento) están acotadas en una playa, la variabilidad del perfil está limitada en el tiempo, pudiéndose definir un estado modal o más frecuente para ciertos periodos de tiempo (Vidal *et al.*, 1995; Bernabeu *et al.*, 2003; Schwartz, 2005; Ruggiero *et al.*, 2016; Vos *et al.*, 2019).

Este comportamiento de las playas permitió la formulación de modelos de clasificación de las playas que reconocen la existencia de distintos estados morfológicos en respuesta a las condiciones ambientales predominantes. A partir de esto se han establecido las bases teóricas sobre los modelos de perfil de equilibrio y en planta de una playa y sus diversas aplicaciones, tanto en la ecología de playa (McLachlan y Defeo, 2017; McLachlan *et al.,* 2018), la gestión de la seguridad de los bañistas (Scott *et al.*, 2009, Scott *et al.*, 2011, Scott *et al.*, 2016, Gadkari y Das, 2023), así como el comportamiento dinámico, respuesta y efectividad de los

proyectos de regeneración de playas (González *et al.,* 2010; Yoshida *et al.*, 2014; Ludka *et al.*, 2018; Pranzini *et al.,* 2018; Carvalho y Woodroffe, 2023; Zhou *et al.*, 2023).

Wright y Short (1984) desarrollaron un modelo de morfología de la playa como una función del oleaje y del tamaño del grano del sedimento, que define el modo en que la energía del oleaje incidente se distribuye a lo largo del perfil y permite clasificar las playas en disipativas, reflejantes y cuatro estadios intermedios. Ellos encontraron que el Índice de Dean, o parámetro adimensional Ω, podía usarse para describir el estado morfodinámico modal de la playa.

Por otra parte, Dean (1977), al estudiar el comportamiento de los perfiles de playa en la costa este de los Estados Unidos y el Golfo de México, comprobó que los perfiles de playa se ajustaban adecuadamente a la función $h(y)=Ay^{(m)}$, donde (y) es la distancia en metros perpendicular a la dirección de la orilla, (h) la profundidad en metros y (A) un factor de escala dependiendo del diámetro medio de la arena nativa (D_{50}), y el exponente (m) un valor teórico relacionado con la energía del oleaje. Resultados similares habían sido reportados por Bruun (1954), en el análisis de perfiles de playa en la costa norte danesa y de Mission Bay, California.

Con base en el modelo de perfil de equilibrio de playa propuesto por Dean (1977), luego Dean (1991) y Dean y Dalryple (2004) proponen un grupo de ecuaciones para el cálculo de los volúmenes de arena a verter en los trabajos de regeneración de playas, las cuales son ampliamente utilizadas. Sin embargo, estas ecuaciones y modelos propuestos por Dean (1991) son válidas únicamente para el caso de playas disipativas y no pueden ser extrapoladas a costas donde sus playas tengan un comportamiento morfodinámico diferente.

Como fundamentos teóricos de los trabajos de regeneración de playa para mitigar los efectos de la erosión en las playas cubanas se han utilizado los modelos y ecuaciones matemáticas desarrollados por Dean (1991); sin embargo, no hay estudios en Cuba sobre el estado morfodinámico modal de las playas que respalden el uso de los modelos y ecuaciones desarrolladas por Dean (1991) y Dean y Dalryple (2004) para playas disipativas.

Atendiendo a estos elementos, el objetivo de la presente investigación es determinar el estado morfodinámico modal de las playas biogénicas arenosas del litoral nororiental de Cuba, siguiendo el modelo conceptual de Wright y Short (1984), a partir de la identificación de geoformas litorales distintivas, de ciertos estados morfodinámicos, así como las características granulométricas de sus arenas. Además, comprobar en 12 playas representativas del litoral nororiental si los estados morfológicos observados en los trabajos de campo se corresponden con los pronosticados mediante el parámetro adimensional Ω o Índice de Dean.

Para la investigación fueron seleccionadas 54 playas biogénicas arenosas del litoral nororiental de Cuba que recogen las principales características de las playas en cuanto a granulometría, composición genética de sus arenas, exposición al oleaje, forma y configuración de la línea litoral, entre otros aspectos. Los trabajos de terreno se realizaron en el periodo de agosto de 2018 hasta marzo de 2022, e incluyó la identificación y medición de las geoformas litorales, el muestreo y análisis en laboratorio de las arenas y la interpretación de imágenes satelitales de Google Earth.

ÁREA DE ESTUDIO

El litoral nororiental de Cuba, desde Punta Quemado (20°N; 74°W), el extremo más oriental de Cuba, hasta Punta Maternillo (21°N; 77°W), en la bahía de Nuevitas, tiene una extensión de 1402 km, incluyendo las costas interiores de las numerosas bahías que allí se encuentran. De estos, 474 km están expuestos a los efectos directos del oleaje proveniente del océano Atlántico y representan el 8.2 % de las costas exteriores de la isla de Cuba (Figura 1).

Desde el punto de vista dinámico, este litoral está sometido a la acción persistente del oleaje durante todo el año. Del total de rumbos incidentes, los rumbos este (53,09%), nordeste (9,75%), norte (5,48%) y sureste (8,94%), tienen una frecuencia superior al 77%. Esto se debe a que Cuba, y particularmente el litoral nororiental, es afectado durante casi todo el año por los vientos alisios, debido

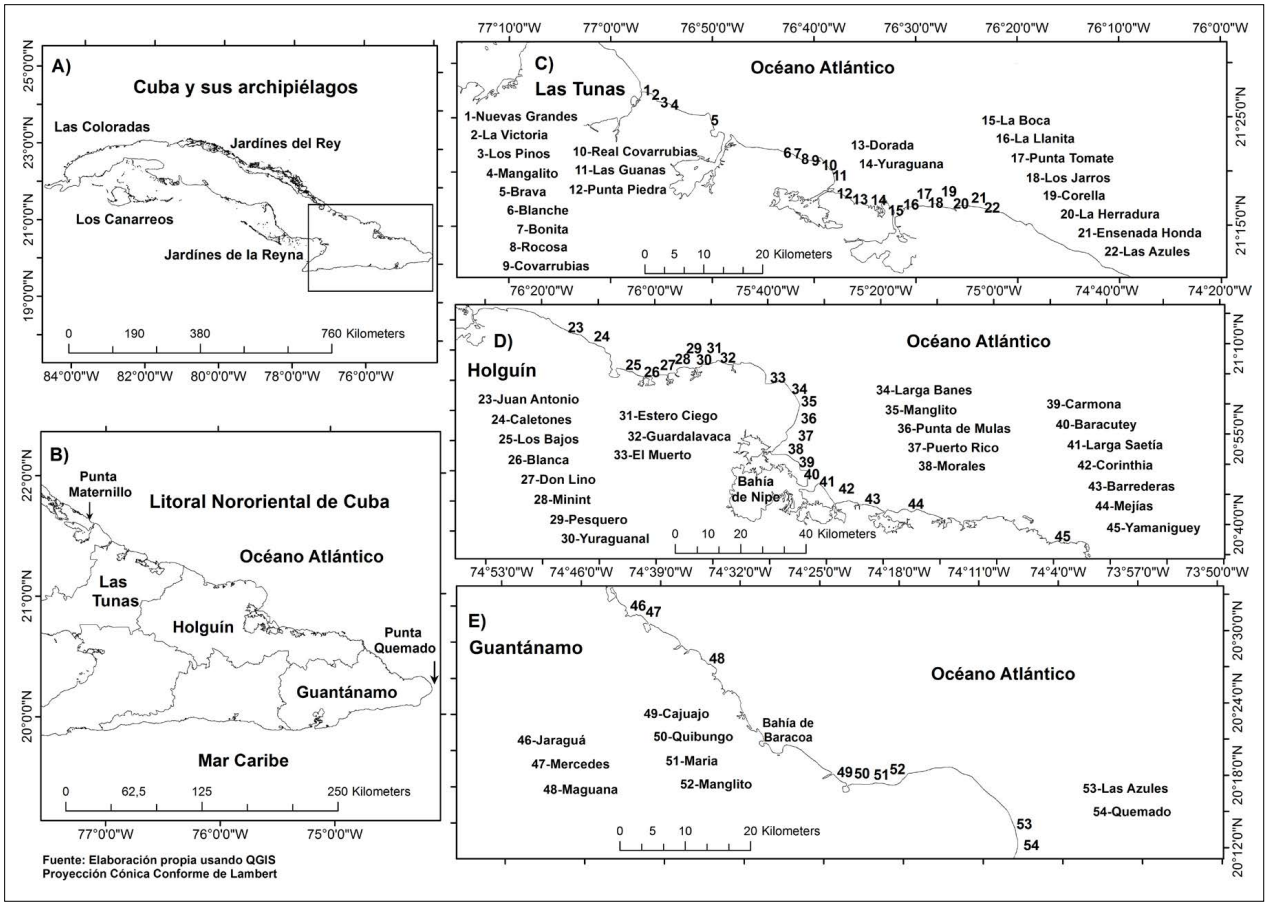


Figura 1. Contexto geográfico del área de estudio. A) Isla de Cuba y posición de los archipiélagos. B) Litoral nororiental de Cuba. C), D), E) Playas consideradas en el estudio por provincia.

a la presencia, casi permanente, del anticiclón del Atlántico Norte sobre las Islas Azores. El resto de los rumbos no tienen influencia en la zona de estudio o su influencia es muy baja, por lo que su tiempo de acción puede ser considerado como tiempo de calma (Figuras 2A, 2B y 2C).

Las mayores alturas medias del oleaje significativo (*Hs*) corresponden a los rumbos norte y noroeste: 2.00 m y 1.99 m, respectivamente (Figura 2B), lo que está relacionado con la entrada de los frentes fríos y los vientos fuertes acompañantes. Aunque hay un predominio de los oleajes del este y nordeste, el oleaje de los rumbos norte y noroeste resultan más energéticos y por tanto tienen una fuerte repercusión en los procesos litorales. Este hecho fue reportado con anterioridad por Rodríguez-Paneque y Córdova (2005 y 2010) al evaluar la efectividad de los trabajos de alimentación artificial de playas ejecutados en las playas Estero Ciego y Don Lino.

Las playas, por su parte, están constituidas principalmente por arenas de grano medio, formada a partir de los restos esqueléticos de organismos marinos, fundamentalmente moluscos, corales, foraminíferos y algas calcáreas, de ahí su génesis biogénica.

Aunque todas las playas se encuentran en la costa norte de Cuba, el 54% tienen una orientación general este-oeste, el 22% una orientación norte-sur, el 17 % una noroeste-sureste y el 7 % noreste-suroeste. Debido a esta orientación y la configuración de la línea de costa, así como la alta persistencia de oleajes de componente este y noreste, se establece una deriva litoral neta en dirección noroeste y, ocasionalmente, en el periodo entre noviembre y abril (etapa invernal), se establece una deriva litoral en sentido inverso.

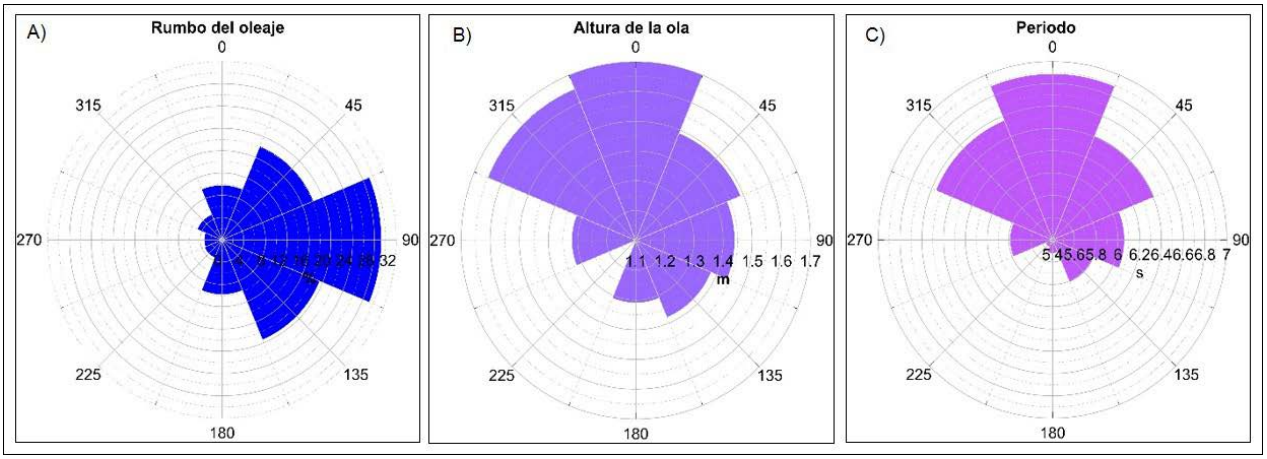


Figura 2. Estadística del clima de oleaje por rumbos de incidencia. A) Distribución porcentual del oleaje por rumbos, B) altura de la ola significativa para aguas profundas (Hs), C) periodo de la ola (Ts). Fuente: Rodríguez-Paneque y Finkl (2020).

En este litoral se registran las mayores amplitudes de marea del archipiélago cubano; su amplitud media no supera los 0.56 m y clasifica como mixta semidiurna irregular, por lo que las playas localizadas aquí son clasificadas como micro mareales, similares a las estudiadas por Wright y Short (1984).

MATERIALES Y MÉTODOS

La determinación del estado morfológico modal de las playas se realizó utilizando el método de Wright y Short (1984), a partir de la identificación de geoformas litorales distintivas de ciertos estados morfodinámicos, en 54 playas biogénicas, para la etapa de verano (agosto de 2018-2021) y para la etapa de invierno (febrero y marzo de 2019-2022). Para ello se confeccionó una tabla que contiene el nombre de la playa, el ancho total considerando el ancho de las dunas, ancho de la berma, altura de la cresta de la berma, la presencia o ausencia de cúspides, oscilaciones rítmicas, corrientes de retorno, arrecifes coralinos frontales, entre otras. La Figura 3 muestra los elementos morfológicos del perfil de playa.

Las mediciones de las geoformas fueron realizadas con cintas métricas de acero con un nivel de precisión ± 0,10 m. La presencia de corrientes de retornos fue determinada mediante el empleo de objetos a la deriva, la entrevista de personas que habitan el lugar y la propia experiencia personal de conocer la mayoría de las playas. La existencia de arrecifes coralinos es detectada visualmente a través de la espuma de la ola en un primer rompiente y por fotos satelitales de Google Earth, verificadas *in situ* mediante buceo autónomo.

Para comprobar, si los estados morfológicos observados en el terreno se correspondían con los pronosticados mediante el parámetro adimensional Ω o Índice de Dean (Dean y Dalryple, 2004) (Ec.1), se seleccionaron 12 playas representativas del litoral nororiental, que recogen las principales características del resto de las playas en cuanto a granulometría, composición genética de sus arenas, exposición al oleaje, forma y configuración de la línea litoral, entre otros aspectos. Este Índice permite clasificar las playas en disipativas, reflejantes e intermedias, atendiendo a los parámetros de la ola y la velocidad de caída de los sedimentos.

El parámetro adimensional, o índice de Dean (Ω), fue calculado, de manera independiente, para cada una de las etapas de muestreo (Ago/18, Feb/19, Ago/19, Feb/20, Ago/20, Feb/21, Ago/21, Mar/22). Como estado morfodinámico fue elegida la condición modal, es decir, el estado más frecuente, considerando todas las etapas de muestreo. El parámetro adimensional fue calculado mediante la ecuación 1 (Ecuación 1).

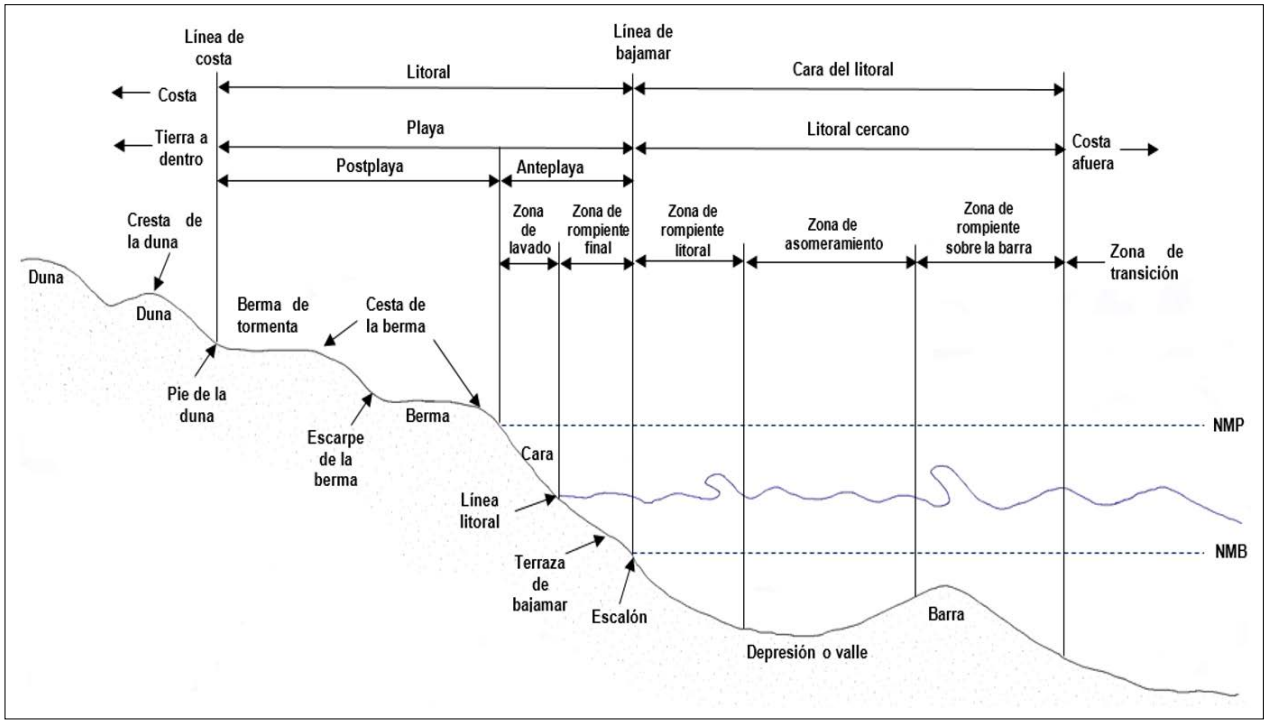


Figura 3. Posición y amplitud de los elementos morfológicos del perfil de playa. Fuente: elaboración propia a partir del Coastal Engineering Manual (2010).

$$\Omega = \frac{H_b}{w_s T} \qquad \text{Ecuación 1}$$

Dónde H_b es la altura de la ola de rompiente, w_s la velocidad de caída del sedimento y T, periodo de la ola de rompiente. Los datos de sedimentos y oleajes están referidos a valores promedio.

Según esta ecuación, el valor 1 define el umbral de una playa reflejantes a intermedia, un valor 6, un umbral de intermedia a disipativa, por lo que las playas de tipo intermedias tienen un valor mayor que 1 e inferior a 6. Para Wright y Short (1984), los cuatros estadios intermedios representan las más complejas formas morfológicas del perfil de playa y de los procesos costeros que intervienen en su formación.

Los datos de oleaje están referidos a la cuadrícula 33 del *Global Wave Statistics,* que aporta información relativa a la altura de la ola significativa (*Hs*) y el periodo (*T*) para el área geográfica donde se localiza el litoral nororiental de Cuba (Figuras 2B y 2C). Para el cálculo de la altura de la ola en rompiente (H_b), se utilizó el software Ola 2.0, desarrollado por Cordobés y Rodríguez-Paneque (2008), el cual permite realizar la transformación del oleaje, desde aguas profundas hasta la playa, siguiendo las consideraciones de la teoría lineal de oleaje. Como datos de entrada, se introducen los datos de oleaje en aguas profundas (*Hs*) y se carga un perfil con la profundidad y morfología del fondo, para cada uno de los rumbos de incidencia sobre la playa. Para ello se les dieron continuidad a los perfiles de playas, mediante líneas de sondeo (batimetría), con un ecosonda Foruno (precisión de ± 0.10 m), hasta cubrir toda la pendiente sumergida. Los sondeos fueron corregidos en función de la altura de la marea.

En la totalidad de las 12 playas, se llevaron a cabo ocho muestreos sedimentológicos, cuatro para la temporada de verano (agosto de 2018-2021) y los otros cuatro muestreos para el invierno (febrero/marzo de 2019-2022), que incluyó la toma de cinco muestras por perfil distribuidos de la siguiente manera: base de la duna al mar, berma, cara de la playa, primera barra de arena y el valle, ambos en

la pendiente submarina. Los perfiles de muestreo se encuentran localizados en la zona central y a ambos extremos de las playas, de manera que pudiera definirse, con exactitud, las características de la arena nativa de cada playa.

Para el procesamiento de las muestras de arena se siguió el método de ensayo estándar para el análisis del tamaño de las partículas de suelos, según normas de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D-422-98 y D-854-92. Como diámetro medio se utilizó la mediana, es decir, el percentil 50 (D_{50}) en la curva de distribución granulométrica y en su clasificación se utilizó la escala Wentworth, (1922). Por su parte, el coeficiente de selección (*So*) se determinó mediante la expresión (Ecuación 2):

$$So = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}} \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde Q_3 y Q_1 son los percentiles 75 y 25, respectivamente, en la curva de distribución granulométrica (Pettijohn, 1956). Para la clasificación del coeficiente de selección (*So*), se siguió la escala de siete valores, usada por Blott y Kenneth (2001).

Para cada diámetro de arena se determinó la velocidad de caída (w_s) mediante un diseño experimental similar al empleado por Gibbs *et al.* (1971), aunque en este caso utilizando un tubo de vidrio de 1000 mm de longitud y un diámetro interior de 62.25 mm, de los cuales 310 mm estaban graduados en la parte inferior del mismo. Los ensayos fueron realizados en agua destilada a una temperatura de 24 ºC, monitoreados permanentemente a través de un termómetro colocado en el extremo superior del tubo y filmados con una cámara fotográfica digital de 12.0 megapixeles de resolución, la cual permite distinguir la trayectoria de las partículas de arena a través del tubo. Posteriormente fueron realizadas las diferentes correcciones necesarias.

RESULTADOS

Se presentan los resultados para 54 playas biogénicas donde se estudiaron las geoformas litorales y las características de sus sedimentos, como indicadores de su estado morfodinámico, a través de trabajos de terreno durante cuatro años.

Identificación de las geoformas litorales

El estudio evidenció que el 93% de las playas del litoral nororiental tenían arrecifes coralinos frangeantes, casi paralelos a la costa, a una distancia promedio de 500 metros. Estos arrecifes están adosados generalmente al extremo este de los litorales y constituyen barreras donde rompe el oleaje oceánico y luego se reforma, en ondas de menor altura, al encontrar aguas más profundas. Ello hace que las playas reciban un oleaje atenuado, de altura inferior a un metro durante casi todo el año.

El 54% de las playas no poseían berma o resultaban inferiores a 14 metros de ancho, y en el 37% de ellas la berma estaba totalmente ausente. En este caso, la cara de la playa colinda directamente con la base de la duna, la cual mostró, en ocasiones, escarpes que denotan la ocurrencia de procesos erosivos. Esta situación no mejoró para el verano, donde el 35% de las playas no tenían berma, en tanto las playas con bermas inferiores a los 14 metros se incrementaron hasta el 24%, sin diferencias significativas entre los valores promedios, del ancho de la berma, tanto para el verano como para el invierno, aunque con un ligero aumento de su ancho durante el verano (Tabla 1).

Como se aprecia en la Tabla 1, hubo un ligero aumento en el ancho de la cara y la altura de la berma durante el invierno. En términos generales, las playas tenían una sola cresta de berma, sin embargo, para el invierno, en el período comprendido entre 2020 y 2022, entre el 20% y el 23% de las playas contaban con dos crestas de berma.

En promedio entre el 30% y el 33% de las playas no tenían barra de arena en la pendiente sumergida, sin embargo, esta cifra se redujo para el invierno, donde el 17% de las playas no contaban con barra y al menos el 20% de ellas poseían dos barras, condición que únicamente se observó para la temporada invernal. Las barras estaban generalmente a una profundidad entre 1 y 2 metros y a una distancia inferior a los 100 m de la línea litoral.

En ninguna de las etapas de muestreos fueron encontradas corrientes de retorno, ni cúspides;

Tabla 1. Valores promedio de los elementos morfológicos del perfil de playas en el litoral nororiental.

Elementos geomorfológicos	Verano (agosto)				Invierno (febrero-marzo)			
	2018	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2022
Ancho total	66 m	68 m	67 m	67 m	65 m	62 m	62 m	63 m
Ancho cara	11 m	11 m	11 m	11 m	12 m	12 m	12 m	12 m
Ancho berma	13 m	13 m	14 m	14 m	12 m	12 m	11 m	11 m
Altura de la berma	1,33 m	1,38 m	1,36 m	1,36 m	1,38 m	1,38 m	1,40 m	1,38 m
Nº. de cresta de berma	1(100 %)	1(100 %)	1(100 %)	1(100 %)	1(100 %)	2(22%)	2(20%)	2(23%)
Nº. de barras	0(33 %)	0(31 %)	0 (30 %)	0 (30 %)	2 (4%)	2 (20%)	2 (16 %)	2 (21 %)
Presencia cúspides	0	0	0	0	0	0	0	0
Oscilaciones rítmicas	0	0	0	0	4 %	22 %	25%	26 %
Corrientes de resaca	0	0	0	0	0	0	0	0
Granulometría media	0,36 mm	0,39 mm	0,38 mm	0,39 m	0,40 mm	0,42 m	0,44 mm	0,43 mm
Coeficiente de selección	1,533	1,820	1,857	1,928	1,970	2,130	2,170	2,740

sin embargo, durante el invierno, el 26% de las playas mostraban pequeñas topografías rítmicas (Figura 4), particularmente en las porciones de las playas más expuesta al oleaje oceánico. Las topografías rítmicas no se apreciaron en el muestreo de agosto de 2018, por lo que es una condición que ha comenzado a aparecer en los últimos años de muestreo y particularmente durante el invierno. Observaciones realizadas con posterioridad evidenciaron que estas geoformas se mantienen hasta mediados del mes de abril.

En términos generales, las playas del litoral nororiental, en el periodo de estudio, se caracterizaron por poseer un ancho medio superior a 50 m, una cara de playa de 11 m de ancho y bermas estrechas, en muchos casos ausentes, para dar paso a una, a veces dos, cadenas de dunas. Las playas mostraron el predominio de arenas de granulometría media, con una sola cresta de berma de alturas entre 1.25 y 1.35 m, como promedio y una barra de arena en la pendiente submarinas, sin cúspides ni corrientes de retorno.

Sedimentos

El estudio de los sedimentos evidenció el predominio de arena de grano medio (0.25-0.50 mm), según clasificación Wentworth, aunque con ligeras diferencias entre las temporadas de invierno y verano. En promedio, para el verano, el 83% de las playas estaban constituidas por arenas de grano medio, un 8% por arena gruesas (>0,50 mm) y un 9% por arenas finas (<0,25 mm). Esta condición cambió ligeramente durante el invierno, donde las arenas medias disminuyen hasta el 72%, en tanto se incrementan las arenas gruesas, llegando a alcanzar el 20%. De manera individual, el 89% de las playas incrementaron su granulometría durante el invierno (Tabla 2).

La granulometría media promedio para el verano fue de 0.39 mm, sin embargo, para la temporada de invierno alcanzó los 0.43 mm, aunque en términos generales hubo un ligero aumento de la granulometría, tanto durante el verano como en el invierno, durante los años de observación.

En cuanto al coeficiente de selección (*So*), durante el verano, el 83% de las playas tenían sus arenas entre moderadamente seleccionadas o muy bien seleccionadas (*So*<1,27-2,00) y un 14% de las arenas entran en el rango de pobremente seleccionado (*So*>2,00-4,00). Esta condición cambió durante el invierno donde el 74% de las playas te-

Figura 4. Pequeñas topografías rítmicas en dos playas. En las imágenes de Google Earth apenas son apreciables. A y B), playa Yuraguanal; C y D), playa Guardalavaca: las grandes irregularidades de la línea litoral apreciable en la imagen de Google Earth obedece a reflexión de la ola en el arrecife de coral.

nían sus arenas entre moderadamente seleccionadas o muy bien seleccionadas y un 26% de las arenas entraron en el rango de pobremente seleccionado. Durante el verano las arenas tenían un coeficiente de selección promedio de 1768 en tanto en el invierno es de 1894, aunque en términos absolutos el 70% de las playas incrementaron su coeficiente de selección para el invierno.

Cálculo del estado morfodinámico modal o índice de Dean

La Tabla 3 muestra el estado morfodinámico modal (Ω) de las doce playas y los datos utilizados para su cálculo.

Como se aprecia en la Tabla 3, se obtuvieron valores de Ω entre 1 y 4. Estos resultados demuestran que las playas del litoral nororiental de Cuba son de tipo intermedio (83%), y los 17% restantes corresponden a estado modal reflejante, no existiendo ningún caso de estado modal disipativo.

Dentro de las playas de tipo intermedio, el 60% tuvieron un valor de Ω=2, un 30% un valor de Ω=3, y el 10 % restante corresponden a playas con un valor de Ω=4, no existiendo valores de Ω igual 5 y 6. Ello demuestra que las playas del litoral nororiental de Cuba tienden más a estados morfodinámicos reflejantes que disipativos.

Características de los estados morfológicos de las playas del litoral nororiental

La Figura 5 resume los principales rasgos morfológicos encontrados en las playas del litoral nororiental y muestra cuatro estadios modales donde es posible encontrar diferencias, aunque en algunos casos también similitudes, como el caso de los estados morfodinámicos modales Ω=1 y Ω=4, particularmente en la forma y configuración del perfil en la parte emergida. A continuación, se resumen las principales características halladas mediante la clasificación de las playas atendiendo al índice de Dean.

Tabla. 2. Granulometría media promedio y coeficiente de selección de las arenas de las playas del litoral nororiental de Cuba.

Nombre playa	Verano			Invierno			Nombre playa	Verano			Invierno		
	D50 (mm)	So	Clasif.	D50 (mm)	So	Clasif.		D50 (mm)	So	Clasif.	D50 (mm)	So	Clasif.
N. Grandes	0,35	1,440	A. Media	0,39	1,473	A. Media	Minint	0,53	1,424	A. Gruesa	0,59	1,440	A. Gruesa
La Victoria	0,49	1,659	A. Media	0,54	1,660	A. Gruesa	Pesquero	0,32	1,533	A. Media	0,36	1,659	A. Media
Los Pinos	0,28	1,899	A. Media	0,30	1,576	A. Media	Yuraguanal	0,24	1,547	A. Fina	0,27	1,899	A. Media
Manglito (1)	0,47	1,970	A. Media	0,51	1,560	A. Gruesa	Estero Ciego	0,31	1,630	A. Media	0,35	1,744	A. Media
Brava	0,31	1,655	A. Media	0,35	2,131	A. Media	Guardalavaca	0,21	1,846	A. Fina	0,23	1,984	A. Fina
Blanche	0,32	1,750	A. Media	0,36	1,920	A. Media	Del Muerto	0,42	2,130	A. Media	0,47	1,750	A. Media
Bonita	0,30	1,812	A. Media	0,32	1,590	A. Media	Larga	0,36	1,755	A. Media	0,40	1,855	A. Media
Rocosa	0,46	1,790	A. Media	0,49	2,090	A. Media	Manglito (2)	0,43	1,424	A. Media	0,48	2,170	A. Media
Covarrubias	0,46	1,630	A. Media	0,48	1,675	A. Media	P. de Mulas	0,42	1,670	A. Media	0,48	2,360	A. Media
R.Covarrubias	0,29	1,846	A. Media	0,31	1,750	A. Media	Puerto Rico	0,44	1,410	A. Media	0,50	1,836	A. Media
Las Guanas	0,30	2,130	A. Media	0,31	1,548	A. Media	Morales	0,49	2,170	A. Media	0,56	1,424	A. Gruesa
Punta Piedra	0,22	1,650	A. Fina	0,19	1,465	A. Fina	Carmona	0,45	1,615	A. Media	0,51	1,533	A. Gruesa
Dorada	0,51	1,579	A. Gruesa	0,53	1,792	A. Gruesa	Baracutey	0,40	1,770	A. Media	0,46	1,547	A. Media
Yuraguana	0,42	1,710	A. Media	0,44	1,870	A. Media	Larga	0,54	1,880	A. Gruesa	0,60	1,958	A. Gruesa
La Boca	0,21	1,630	A. Fina	0,23	1,517	A. Fina	Corinthia	0,38	1,875	A. Media	0,43	1,846	A. Media

Tabla. 2. Continuación.

Nombre playa	Verano			Invierno			Nombre playa	Verano			Invierno		
	D50 (mm)	So	Clasif.	D50 (mm)	So	Clasif.		D50 (mm)	So	Clasif.	D50 (mm)	So	Clasif.
La Llanita	0,33	3,755	A. Media	0,35	2,530	A. Media	Barrederas	0,36	2,110	A. Media	0,34	2,130	A. Media
Punta Tomate	0,36	1,850	A. Media	0,38	1,541	A. Media	Mejías	0,45	1,460	A. Media	0,39	1,736	A. Media
Los Jarros	0,57	1,955	A. Gruesa	0,59	1,912	A. Gruesa	Yamanigüey	0,41	1,241	A. Media	0,45	1,630	A. Media
Corella	0,33	1,485	A. Media	0,35	1,985	A. Media	Jaragua	0,21	1,410	A. Fina	0,23	1,545	A. Fina
La Herradura	0,45	1,670	A. Media	0,49	1,630	A. Media	Mercedes	0,47	2,370	A. Media	0,47	2,996	A. Media
Ens. Honda	0,43	1,750	A. Media	0,47	1,820	A. Media	Maguana	0,44	1,615	A. Media	0,49	1,930	A. Media
Las Azules	0,29	1,424	A. Media	0,31	1,654	A. Media	Cajuajo	0,37	1,875	A. Media	0,41	2,290	A. Media
Juan Antonio	0,48	1,535	A. Media	0,52	2,740	A. Media	Quibungo	0,43	1,956	A. Media	0,48	2,420	A. Media
Caletones	0,38	1,680	A. Media	0,42	2,580	A. Media	María	0,58	1,982	A. Gruesa	0,55	2,130	A. Gruesa
Los Bajos	0,39	1,558	A. Media	0,43	1,910	A. Media	Manglito (3)	0,51	2,110	A. Gruesa	0,47	2,515	A. Media
Blanca	0,23	2,420	A. Fina	0,25	2,962	A. Media	Las Azules	0,53	1,460	A. Gruesa	0,49	1,416	A. Media
Don Lino	0,55	1,540	A. Gruesa	0,61	1,839	A. Gruesa	Quemado	0,43	1,441	A. Media	0,49	1,820	A. Media

Tabla 3. Estado morfodinámico de las playas del litoral nororiental de Cuba.

Playa	Datos del sedimento		Estado morfodinámico	
	D_{50} (mm)	w_s (m/s)	Ω	Estado modal
Maguana	0,45	0,071	2	Intermedio-reflejante
Guardalavaca	0,23	0,042	3	Intermedio
Estero Ciego	0,32	0,056	3	Intermedio
Yuraguanal	0,25	0,045	2	Intermedio-reflejante
Pesquero	0,31	0,054	3	Intermedio
Minint	0,55	0,080	1	Reflejante
Don Lino	0,57	0,082	1	Reflejante
Blanca	0,23	0,042	4	Intermedio-disipativo
Los Bajos	0,41	0,068	2	Intermedio-reflejante
Corella	0,32	0,056	2	Intermedio-reflejante
Punta Tomate	0,37	0,063	2	Intermedio-reflejante
La Llanita	0,34	0,059	2	Intermedio-reflejante

Valor de Ω=1. Reflejante

En esta condición fueron encontradas el 17% de las playas. Estas fueron Don Lino y Minint. Como rasgo característico, destacaba el predominio de arenas gruesas (>0,50 mm), la ausencia de barras de arena en la pendiente submarina, una cara de playa de pendiente fuerte y la presencia de una cresta de berma bien definida, con una altura de 1.65 m, las más alta encontrada en las playas estudiadas. El arrecife de coral se encuentra muy cerca de la playa (menos de 100 m) por lo que la rotura del oleaje ocurría sobre la playa (Figuras 5A y 5B).

Valor de Ω=2. Terraza de Bajamar

El 50% de las playas consideradas para el cálculo del parámetro adimensional se encontraban en esta condición. Estas fueron: Maguana, Yuraguanal, Los Bajos, Corella, Punta Tomate y La Llanita. Como rasgo característico, destacó el predominio de arena de granulometría media (0.25-0.5 mm), una cresta de berma alta y bien definida y al menos una barra de arena en la pendiente sumergida. Los arrecifes de coral se disponen entre los 300 y 900 m de la costa. No aparecen las formas del relieve distintivas a la condición morfológica *Low Tide Terrace* de la clasificación de Wright y Short (1984) (Figuras 5C y 5D).

Valor de Ω=3. Barra Transversal y Corriente de Retorno

En esta condición fueron encontradas el 25% de las playas. Estas fueron Estero Ciego, Guardalavaca y Pesquero. Como rasgo característico destacaba también el predominio de arena de granulometría media (0.25-0.5 mm), una cresta de berma bien definida y al menos una barra de arena en la pendiente sumergida. Los arrecifes costeros se encuentran más distantes, entre 600 y 700 m de la costa. Las formas del relieve son las mismas encontradas para la condición anterior. No aparecen las formas del relieve correspondientes a la condición morfológica *Transverse Bar and Rip* de la clasificación de Wright y Short (1984) (Figuras 5E y 5F).

Valor de Ω=4. Barra y Playa rítmicas

En esta condición solo fue encontrada una de las doce playas evaluadas, playa Blanca. Como rasgo característico, destacaba el predominio de arenas de granulometría fina, una cresta de berma bien definida, fuerte pendiente en la parte sumergida de la playa y una barra de arena. En la cara de la playa aparecen pequeñas topografías rítmicas, por lo que hay una coincidencia puntual con la condición morfológica *Rhythmic Bar and Beach*, de la clasificación de Wright y Short (1984). Sin

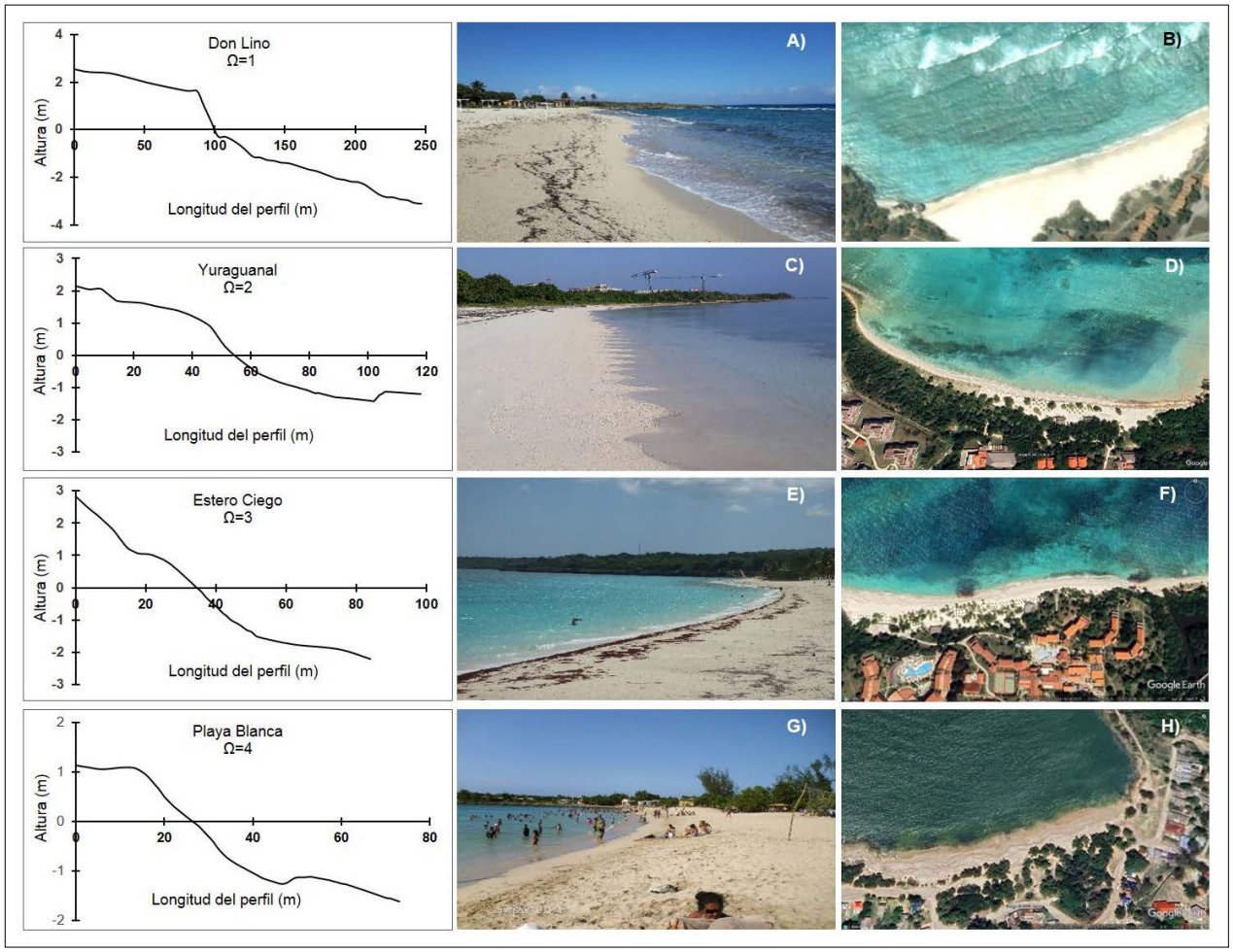


Figura 5. Principales rasgos geomorfológicos encontrados en las playas del litoral nororiental de Cuba.

embargo, es importante resaltar que las topografías rítmicas también fueron encontradas, para la etapa invernal, en las playas reflejantes (Ω=1) (Figura 5B) y en playas intermedias (Ω=2) (Figura 5C y 4D).

A modo de resumen, como elemento común en los estados morfodinámico de tipo intermedio (Ω=2, 3 y 4), se apreció una cresta de berma bien definida con altura entre 1.15-1.35 m, una o dos barras de arena en la pendiente submarina y el predominio de arena de granulometría media o fina.

DISCUSIÓN

La presencia de arrecifes coralinos en el 93% de las playas constituye el rasgo geomorfológico más significativo de las playas objeto de estudio. Junto a los organismos que viven en los pastizales marinos, estos arrecifes, constituyen la fuente principal de aporte de sedimentos y la razón fundamental del predominio de arenas de granulometría media en la mayoría de las playas, pues la fuente natural de aporte de sus arenas se encuentra muy próximo a ellas.

El hecho que el 54% de las playas no tuvieran berma o resultaran inferiores a los 14 metros de ancho son evidencias de los procesos erosivos que experimentan las playas de este litoral, tal y como han reportado Rodríguez-Paneque y Córdova (2006) y Rodríguez-Paneque y Finkl (2020).

El estrechamiento de las playas durante el invierno (Tabla 1) responde al comportamiento general de las playas durante esta época del año,

como dan cuenta diversos autores (Vidal *et al.*, 1995; Schwartz, 2005; Bird, 2008; Bird y Lewis, 2015; Konstantinou *et al.*, 2021). Durante el invierno, con olas de mayor altura, la pendiente de la playa se satura rápidamente y se intensifica el flujo de retorno, transportando parte de la arena a la pendiente submarina en forma de barras. Ello explica el incremento de la presencia de barras, encontradas en las playas durante la época invernal.

El ligero incremento de la altura de la berma y también un ligero incremento del ancho de la cara de la playa se explica porque durante la etapa invernal tienen lugar oleajes de mayor altura, capaces de avanzar, aún más, tierra adentro. Con el avance de la ola, se incrementa la altura de la berma o aparece una berma de tormenta, y en consecuencia generalmente se produce un ligero incremento del ancho de la cara (Bird y Lewis, 2015; Konstantinou *et al.*, 2021).

El predominio de arenas de granulometría media (0.25 -0.50 mm) encontrada en la mayoría de las playas del litoral nororiental, así como oleaje moderado, con altura entre 1.0-1.25 m, son características reportadas por Wright y Short (1984) y Short, (2006) para las playas con estado morfodinámico intermedio. La combinación de olas altas (mayores de 2.5 m) y arenas finas (D_{50}) inferior a 0.2 mm, reportada por estos investigadores para las playas disipativas, no son condiciones que se encuentren en las playas del litoral nororiental de Cuba.

Que el cálculo del parámetro adimensional arrojara que el 83% de las playas tenían estados morfodinámicos intermedio, confirma que las arenas de granulometría media y un oleaje moderado son elementos distintivos de las playas con estado morfodinámico intermedio, como habían reportado Wright y Short (1984) y Short (2006). Además, el hecho que los estados morfodinámicos encontrados en las playas tengan valores del parámetro adimensional Ω entre 1 y 4, confirma que las playas del litoral nororiental de Cuba tienden más a playas con estados morfodinámicos reflejantes que disipativos (Tabla 3).

Estos resultados coinciden con la condición intermedia reportada por Boon y Green (1989), al estudiar el perfil de equilibrio en playas del Caribe bahameño, con características sedimentarias y de oleaje similares a las presentes en el litoral nororiental. Gadkari y Das (2023) reportan idénticos resultados para la costa norte de Mumbai, en la India, con un régimen hidrodinámico diferente al del área de estudio. También Feyssat *et al.* (2024) encontraron resultados similares en playas micromareales del Mediterráneo, aunque con altura de olas similares a las playas del litoral nororiental de Cuba.

Los resultados confirman también los obtenidos por Goulart (2003), quien reporta el predominio de playas de tipo intermedio en la región subtropical, al estudiar la ocurrencia de estados de playa y los cambios de los factores físicos con la morfodinámica y la latitud, en 52 playas micro mareales localizadas en la zona tropical (Madagascar, noreste de Brasil), subtropical (sureste de Brasil) y templada (Sudáfrica y costa centro sur de Chile) de los océanos Atlántico, Pacífico e Índico.

El hecho que en el litoral nororiental de Cuba aparezcan topografía rítmicas en el 26% de las playas, únicamente en el periodo invernal, obedece a dos condiciones fundamentales: 1) durante la etapa invernal hay una mayor frecuencia de oleajes de rumbo norte, el cual incide perpendicularmente sobre la costa, teniendo lugar un transporte de sedimento transversal a la playa; 2) durante la etapa invernal ocurren las mayores alturas del oleaje, lo cual hace que la ola tenga una mayor incidencia en la playa, particularmente durante las pleamares, al franquear el obstáculo que representan los arrecifes coralinos.

El transporte de sedimento transversal a la playa y oleaje de altura moderada (mayores de 2 m), son condiciones similares a las encontradas en las costas australianas donde fueron realizados los estudios por Wright y Short (1984), pero que ocurren solamente de manera muy puntual en el área de estudio. Ello explica porque las topografías rítmicas aparecen exclusivamente en el periodo invernal.

Aun cuando las características reportadas por Wright y Short (1984) y Short (2006) para playas intermedias coincidan con los valores pronosticados mediante el cálculo del parámetro adimensional Ω, y con las características sedimentarias de las playas, las geoformas reportadas por Wright y Short para playas intermedias no fueron encontradas en

las playas objetos de estudio. En ellas no aparecen corrientes de retorno, cadenas de surcos litorales, terrazas de bajamar, marcada topografía rítmica y cúspides, encontrando sólo en el 26% de las playas, pequeñas topografías rítmicas y únicamente en la etapa invernal.

Numerosos estudios también han señalado que no siempre se cumple la clasificación de las playas realizada por Wright y Short (1984), particularmente por la presencia de arrecifes coralinos cercanos a la costa (Short, 2010; Gallop *et al.*, 2020), la baja energía del oleaje (Aleman *et al.,* 2015), el control geológico (Hegge *et al.*, 1996; Jackson *et al.*, 2005; Short, 2010; Gallop *et al.*, 2020; Jackson *et al.,* 2022), entre otros factores. Estas condiciones señaladas se encuentran presentes en las playas del litoral nororiental de Cuba y explican, en alguna medida, el comportamiento de estas.

A ello habría que añadir el predominio del transporte longitudinal de arena sobre el transporte transversal, por la alta persistencia de los oleajes de rumbo del I cuadrante de la rosa de los vientos (E-N), durante casi todo el año. Además, la clasificación morfodinámica de las playas implica numerosos parámetros, como la granulometría y velocidad de caída de la arena, la dirección y altura del oleaje, el rango de mareas y la morfología del perfil de la playa, los cuales son cambiantes a lo largo de las costas del mundo.

Estos resultados confirman que la clasificación de las playas, atendiendo a su estado morfodinámico, es esencial para comprender la dinámica espacio-temporal de los procesos hidrodinámicos que tienen lugar en las playas y reafirman la necesidad de contar con estudios específicos de las características hidrodinámicas y sedimentarias propias de cada litoral, antes de extrapolar modelos de perfil de equilibrio en playas y las ecuaciones que se deriven de ellos en las actuaciones para el control de la erosión. Tal es así que, las ecuaciones propuestas por Dean (1991) y Dean y Dalryple (2004) para playas disipativas no serían extrapolables a playas con estados morfodinámicos diferentes sin que previamente se realicen los ajustes correspondientes.

Por otra parte, las costas caribeñas son muy variadas en su morfología, el grado de exposición a los oleajes predominantes, la génesis y características de sus arenas, lo cual, junto con las perturbaciones generadas por tormentas tropicales y huracanes, influyen en sus características morfológicas e hidrodinámicas.

Aunque es necesario ampliar el número de playa objeto de estudio, lograr una mayor frecuencia de observaciones y por periodos más largos de tiempo, los resultados contribuyen a un mejor conocimiento local y regional de las playas y son de vital importancia para proponer soluciones para mitigar la erosión costera y mejorar el manejo y gestión de las mismas ante nuevos escenarios, como el aumento del nivel del mar.

Además, las incertidumbres derivadas de los vacíos de conocimientos deberían ser aprovechadas para desarrollar nuevas estrategias de gestión que optimicen la resiliencia costera, eviten la aplicación de modelos y herramientas inapropiados basados en playas con características hidrodinámicas y sedimentarias diferentes, especialmente con un clima cambiante e incierto y propongan nuevos modelos que predigan la respuesta de la playa al aumento del nivel del mar.

CONCLUSIONES

Las geoformas litorales encontradas en 54 playas destacan como rasgos geomorfológicos fundamentales un ancho medio de la playa superior a 50 m, una cara de 11 m de ancho y bermas estrechas o ausentes, con altura media de 1.35 m, sin la presencia de cúspides y topografías rítmicas, excepto en el 26% de los casos, exclusivamente en la época invernal. En la parte sumergida aparece una barra de arena de poca altura, sin la presencia de corrientes de resaca. La presencia de arrecifes coralinos, que protegen las playas del oleaje de mayor altura, constituye el rasgo geomorfológico más significativo de las playas objeto de este trabajo.

El estudio mostró el predominio de arenas de granulometría media (0.25 -0.50 mm) en la mayoría de las playas del litoral nororiental y una altura del oleaje inferior a una 1.0 m, características reportadas por Wright y Short (1984) y Short (2006) para las playas con estado morfodinámico intermedio.

Se comprobó, mediante el cálculo del parámetro adimensional, que las playas del litoral nororiental de Cuba corresponden a estados morfodinámicos de tipo intermedio y tienden más a estados modales reflejantes que disipativos, resultados que se corresponden con las geoformas litorales y la granulometría de los sedimentos encontrados en las playas objetos de estudio.

Las geoformas reportadas por Wright y Short para playas intermedias no fueron encontradas en las playas objeto de estudio. En ellas no aparecen corrientes de retorno, cadenas de surcos litorales, terrazas de bajamar, marcada topografía rítmica y cúspides.

Los resultados confirman que la clasificación de las playas, atendiendo a su estado morfodinámico, es esencial para comprender la dinámica espacio-temporal de los procesos hidrodinámicos que tienen lugar en las playas y un mejor conocimiento local y regional de las mismas. Además, reafirman la necesidad de contar con estudios específicos de las características hidrodinámicas y sedimentarias propias de cada litoral, antes de extrapolar modelos de perfil de equilibrio en playas y las ecuaciones que se deriven de ellos en las actuaciones para el control de la erosión.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la contribución del Dr. José Manuel Cordobés por su ayuda en la programación y el desarrollo de las ecuaciones matemáticas para el experimento de velocidad de caída de arena en agua; a los ambientalistas José Benites, Juan Carlos Mustelier y Daniel Cobas, que acompañaron la realización de los trabajos de terreno, así como aquellos que ayudaron al procesamiento en laboratorio de las muestras de arena. Además, se agradece a los pares evaluadores por sus observaciones y recomendaciones.

REFERENCIAS

Aleman, N., Robin, N., Certain, R., Anthony E. J., y Barusseau, J. P. (2015). Longshore variability of beach states and bar types in a microtidal, storm-influenced, low-energy environment. *Geomorphology, 241*, 175-191.

Bernabeu, M., Medina, R., y Vidal, C. (2003). Wave reflection on natural beaches: An equilibrium beach profile. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 57*, 577-585.

Bird, E. (2008). *Coastal geomorphology: An Introduction* (Second Edition). John Wiley y Sons.

Bird, E., y Lewis, N. (2015). *Causes of Beach Erosion.* En *Beach Renourishment* (pp. 2-28). Springer International Publishing.

Blott, S. J. y Kenneth, P. (2001). GRADISTAT: A grain size distribution and statistics Package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms, 26*, 1237-1248. DOI: 10.1002/esp.261

Boon, J. D., y Green, M. O. (1989). Caribbean beach face slopes and beach equilibrium modes. *Proceeding 21 Coastal Engineering Proceedings, 1*(21). https://doi.org/10.9753/icce.v21.120

Bruun, P. (1954). *Coast erosion and the development of beach profiles*. Beach Erosion Board, Technical memorandum 44.

Carvalho, R. C. y Woodroffe, C. D. (2023). Coastal compartments: the role of sediment supply and morphodynamics in a beach management context. *Journal of Coastal Conservation, 27*(58): 1-17. Springer. https://doi.org/10.1007/s11852-023-00984-6

Casamayor, M., Alonso, I., Valiente, N. G., y Sánchez-García, M. J. (2022). Seasonal response of a composite beach in relation to wave climate. *Geomorphology,* 108245. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108245

Castelle, B. y Masselink, G. (2023). Morphodynamics of wave-dominated beaches. *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, 1(1), 1-13. Reino Unido. https://doi.org/10.1017/cft.2022.2

Cordobés, J. M. y Rodríguez-Paneque, R. (2008). OLA 2.0: *Una herramienta para el cálculo del oleaje incidente en la playa*. CITMA.

Dean, R. G. (1977). *Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts.* Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report 12. University of Delaware.

Dean, R. G. (1991). Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications. *Journal of Coastal Research, 7*, 53-84.

Dean, R. G. y Dalryple, R. A. (2004). *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge University Press.

Feyssat, P., Certain, R., Robin, N., Barusseau, J. P., Lamy, A., Raynal, O., y Hebert, B. (2024). Morphodynamics of two Mediterranean microtidal beaches presenting permanent megacusps under the

influence of waves and strong offshore winds. *Continental Shelf Research, 272*(105160), 1-17. https://doi.org/10.1016/j.csr.2023.105160

Gadkari, D. y Das, S. (2023). Beach stage identification for Aksa Beach (Malad, Mumbai) by analysing wave dynamics, grain size distribution and morphodynamic characteristics. *Research Square,* 1-18. Mumbai, India. DOI: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2859908/v1

Gallop, S. L., Kennedy, D. M., Loureiro, C., Naylor, L. A., Muñoz-Pérez, J. J., Jackson, D. W. T., y Fellowes, T. E. (2020). Geologically controlled sandy beaches: their geomorphology, morphodynamics and classification. *Science of The Total Environment, 731*(139123), 1-42. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139123

González, M., Medina, R. y Losada, M. (2010). On the design of beach nourishment projects using static equilibrium concepts: Application to the Spanish coast. *Coastal Engineering, 57*(2), 227-240.

Gibbs, R. J., Mathews, M. D., y Link, D. A. (1971). The relationship between sphere size and settling velocity. *Journal of Sedimentary Petrology, 44*(1), 7-18.

Goulart, A. (2003). *Sandy Beach Morphodynamics and Macrobenthic on Sandy Beach Morphodynamics and Macrobenthic Communities in Temperate, Subtropical and Tropical Regions - A Macroecological Approach*. Thesis on option of the Degree of Philosophiae Doctor in the Faculty of Science at The University of Port Elizabeth, South Africa.

Hegge, B., Eliot, I. y Hsu, J. (1996). Sheltered sandy beaches of Southwestern Australia. *Journal of Coastal Research, 12*(3): 748-760.

Jackson, D. W. T., Cooper, J. A. G., y del Rio, L. (2005). Geological control of beach morphodynamics state. *Marine Geology, 216*(4), 297-314.

Jackson, D. W. T., Short, A. D., Loureiro, C., y Cooper, J. A. G. (2022). Beach morphodynamic classification using high-resolution nearshore bathymetry and process-based wave modelling. *Estuarine Coastal and Shelf Science, 268*, 1-13. Article 107812. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107812

Konstantinou, A., Stokes, C., Masselink, G. y Scott, T. (2021). The extreme 2013/14 winter storms: Regional patterns in multi-annual beach recovery. *Geomorphology,* 107828. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107828.

Ludka, B. C., Guza, R. T., y O'Reilly, W. C. (2018). Nourishment evolution and impacts at four southern California beaches: A sand volume analysis. *Journal of Coastal Engineering, 136*, 96-105.

McLachlan, A., y Defeo, O. (2017). *The Ecology of Sandy Shores* (3rd Ed.). Elsevier.

McLachlan, A., Defeo, O., y Short, A. D. (2018) Characterising sandy beaches into major types and states: implications for ecologists and managers. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 215*, 152-160. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.09.027

Masselink, G., y Short, A. D. (1993). The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology: A Conceptual Beach Model. *Journal of Coastal Research, 9*(3), 785-800.

Medina, R., Vidal, C. y González, M. (2001). Modelado de la morfodinámica de playas por medio de formulaciones de Equilibrio. *Física de la Tierra, 13*, 95-117.

Merlotto, A., Ricardo, G. y Piccolo, M. (2013). Morphodynamics classification of beaches in Necochea. *Ciencias Marinas, 39(*4), 331-347.

Pranzini, E., Anfuso, G., y Muñoz-Perez, J. J. (2018). A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coastal Engineering, 139*, 32-35.

Pettijohn, F. J. (1956). *Sedimentary rocks* (2nd ed.). The Rice Institute Wisconsin.

Rodríguez-Paneque, R. y Córdova, E. (2005). Efectividad de los trabajos de alimentación artificial con arenas ejecutadas en Playa Estero Ciego entre 1997 y 1998, Cuba. *Ciencias Holguín, 11*(3), 1-14. http://www.redalyc.org/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=181517982003

Rodríguez-Paneque, R., y Córdova, E. (2006). La erosión en las playas de la Región Nororiental de Cuba. *Revista Geográfica, 139*, 9-26.

Rodríguez-Paneque, R. y Córdova, E. (2010). Efectividad de los trabajos de creación artificial de Playa Don Lino, Cuba. *Ciencias Holguín, 16*(1), 1-18. http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=181517919023

Rodríguez-Paneque, R. y Finkl, C.W. (2020). Erosion of carbonate beaches on the northeastern coast of Cuba. *Journal of Coastal Research, 36*(2), 339-352.

Ruggiero, P., Kaminsky, G.M., Gelfenbaum, G. y Cohn, N. (2016). Morphodynamics of prograding beaches: A synthesis of seasonal-to century-scale observations of the Columbia River littoral cell. *Marine Geology, 376*, 51-68.

Schwartz, M. L. (2005). *Encyclopedia of Coastal Science.* Springer.

Scott, T., Masselink, G., y Russell, P. (2011). Morphodynamic characteristics and classification of beaches in England and Wales. *Marine Geology, 286*, 1-20.

Scott, T., Russell, P., Masselink, G. y Wooler, A. (2009). Rip current variability and hazard along a macro-tidal coast. *Journal of Coastal Research, 56*, 895-899.

Scott, T., Austin, M., Masselink, G. y Russell, P. (2016). Dynamics of rip currents associated with groynes -

field measurements, modelling and implications for beach safety. *Coastal Engineering, 107*, 53-69.

Short, A. D. (2006). Australian Beach Systems-Nature and Distribution. *Journal of Coastal Research, 22*(1), 11-27.

Short, A. D. (2010). Role of geological inheritance in Australian beach morphodynamics. *Coastal Engineering, 57*, 92-97.

Vos, K., Harley, M. D., Splinter, K. D., Simmons, J. A., y Turner, I. L. (2019). Subannual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering,* 150, 160-174. https://doi.org/10.1016/j.coast aleng.2019.04.004

Vidal, C., Losada, M. A., Medina, R., y Losada, I. (1995). Modelos de Morfodinámica de Playas. *Ingeniería del Agua,* 2, 55.

Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology, 30*, 377-392.

Wright, L. D., y Short, A. D. (1984). Morphodynamic variability and surf zone and beaches: A synthesis. *Marine Geology, 56*, 93-118.

Yoshida, J., Udo, K., Takeda, Y. y Mano, A. (2014). Framework for proper beach nourishment as adaptation to beach erosion due to sea level rise. En A. N. Green y J. A. G. Cooper (Eds.), Proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa). *Journal of Coastal Research, Special Issue, 70*, 467-472.

Zenkovich, V. P. (1967). *Processes of coastal development*. Oliver and Boyd.

Zhou, Y., Feng, X., Liu, M. y Wang, W. (2023). Influence of Beach Erosion during Wave Action in Designed Artificial Sandy Beach Using XBeach Model: Profiles and Shoreline. *Journal of Marine Science and Engineering, 11*(984). https://doi.org/10.3390/jmse11050984

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60779 • NOTA TÉCNICA
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60779
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Comparación entre siete capas climáticas digitales para identificar áreas con alta precipitación anual en México (al menos 1 500 mm en promedio)

Comparison between seven digital climate layers to identify areas with high annual precipitation in Mexico (at least 1 500 mm on average)

Armando Rincón-Gutiérrez,* Martin Ricker** y Jean-François Mas***

Recibido: 24/08/2024. Aceptado: 22/11/2023. Publicado: 01/04/2024.

Resumen. El modelaje espacial de la precipitación es fundamental para entender la distribución de la vegetación silvestre, el crecimiento de las plantas y las consecuencias del cambio climático. Aquí comparamos, para el territorio continental de México, la estimación de alta precipitación anual (≥ 1 500 mm en promedio) de siete capas climáticas digitales disponibles en internet. ¿Es relevante con qué capa se identifican las áreas con alta precipitación? ¿Es recomendable usar una capa de precipitación elaborada con datos satelitales, en lugar de pluviómetros terrestres? Resultó que hay enormes diferencias entre las estimaciones de las siete capas digitales: la superficie con promedios de precipitación anual ≥ 1500 mm varía, según la capa seleccionada, entre 143 964 km^2 ("Cuervo") y 232 439 km^2 ("Satelital"), o de 7.4% a 11.9% de la superficie terrestre de México. La segunda superficie es 1.6 veces la primera. La superficie total, donde al menos una de las siete capas estima un promedio de precipitación anual ≥ 1500 mm, es de 287 042 km^2 (14.7% de la superficie de México). El coeficiente de variación para la precipitación anual estimada entre las siete capas varía de 1.8 a 60.9%. La categoría con un coeficiente de variación relativamente bajo abarca 74.7% de los 287 042 km^2, la categoría intermedia 24.1%, y la que tiene mayor variación 1.2%. Todas las capas, excepto la "Satelital", se basan en los datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Para ninguna capa es posible rastrear cuáles estaciones climatológicas se usaron para su elaboración, y solo para algunas capas se indica el número de estaciones utilizadas. Otras limitaciones para el análisis de las capas fueron la imposibilidad de encontrar la siguiente información: ¿cuáles correcciones estadísticas se efectuaron a los datos crudos? ¿Cómo se manejaron los datos faltantes sobre precipitación (que son comunes en los datos de la CONAGUA)? ¿Cuáles son las especificaciones precisas para la metodología que se empleó para la interpolación espacial? ¿Cuáles factores ambientales se tomaron en cuenta? ¿Cuáles parámetros de exactitud estadística se pueden reportar? Por otra parte, utilizamos 504 estaciones climatológicas de la CONAGUA donde, para los años de 1951 a 2010 (o dos periodos de "normales climatológicas" de 30 años), se habían medido en promedio ≥ 1500 mm. Tomando en cuenta los datos faltantes, las 504 estaciones climatológicas cubrieron, en promedio, solo 32.7 años para el intervalo de 60 años. Para los datos de las estaciones climatológicas tampoco encontramos información metodológica adecuada: ¿cuáles instrumentos de medición se emplearon y qué

* Posgrado en Ciencias Biológicas, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, 04510, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7981-0316. Email: arg07@yahoo.com
** Departamento de Botánica, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, 04510, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9814-113X. Email: mricker@ib.unam.mx. Autor de correspondencia.
*** Laboratorio de Análisis Espacial, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, colonia Ex-Hacienda de San José de La Huerta, Morelia, 58190, Michoacán, México. ORCID: orcid.org/0000-0002-6138-9879. Email: jfmas@ciga.unam.mx

exactitud tenían? ¿A qué se debe el gran número de datos faltantes? ¿Hubo algún proceso de corrección y mejora de los datos? Analizamos las diferencias entre la precipitación medida en las 504 estaciones climatológicas y la estimada por la capa, determinando el promedio ("sesgo relativo") y el intervalo entre los cuantiles de 10% y 90% de las diferencias ("dispersión 1"). La capa "Satelital" presentó el mayor sesgo relativo (–481 mm) y la mayor dispersión (1707 mm), mientras que "García" tenía el menor sesgo relativo (–23 mm) y "UNIATMOS" la menor dispersión (781 mm). Los promedios de las diferencias absolutas ("dispersión 2"), según la capa de 226 a 630 mm, también fueron altos. La situación de grandes inconsistencias entre las capas resultó similar en 110 525 sitios ubicados equidistantes entre pares de las estaciones. En estos sitios, las estimaciones de precipitación por las capas resultaron de interpolar datos entre estaciones climatológicas. El extremo fue en un sitio, donde una capa estimó una precipitación de 886 mm y la otra de 4929 mm, 5.6 veces el primer valor. La gran variación en la precipitación estimada por las capas se explicó de manera considerable por la heterogeneidad topográfica en un círculo de 1 km diámetro alrededor de las 504 estaciones. Como información suplementaria, proporcionamos los vínculos a dos archivos en Excel con los datos de precipitación anual de la CONAGUA, y las estimaciones de las capas en los sitios de las estaciones. En conclusión, sí es relevante con cuál de las siete capas se identifican áreas con alta precipitación, y una capa basada exclusivamente en datos satelitales (todavía) no es recomendable. La capa "UNIATMOS" destacó aquí con los mejores parámetros en comparación. De cualquier forma, la estimación espacial de precipitación anual alta en México presenta todavía grandes problemas de exactitud, lo que da como resultado tres recomendaciones. Primero, sería importante mejorar la base científica de datos empíricos de precipitación y otras variables climáticas para México, con menos datos faltantes en el futuro, con la descripción de los métodos e indicadores de calidad, y en lo posible con un mayor número de estaciones climáticos en regiones con alta precipitación; segundo, se deberían incluir métodos reproducibles en la descripción de las capas climáticas, y tercero, sería recomendable modelar una capa específica para precipitación alta en la superficie correspondiente, estimada aquí en 14.7% de la superficie de México, donde se tome en cuenta a detalle la topografía.

Palabras claves: datos faltantes, estaciones climatológicas, inconsistencia, satélite climatológico, Sistema de Información Geográfica.

Abstract. Spatial modeling of precipitation is fundamental to understand the distribution of natural vegetation, plant growth, and the consequences of climate change. Here we compare for mainland Mexico the estimates of high annual precipitation (≥ 1 500 mm on average) from seven digital climate layers, which are available from the Internet. Is it relevant with which layer the areas with high precipitation are identified? Is it advisable to use a precipitation layer elaborated with satellite data, instead of ground-based rain gauges? It turned out that there are huge differences among the estimates of the seven digital layers: The area with average annual precipitation ≥ 1 500 mm varies according to the selected layer between 143 964 km² ("Cuervo") and 232 439 km² ("Satelital"), or 7.4% to 11.9% of Mexico's land area. The latter area is 1.6 times the former. The total area, where at least one of the seven layers estimates an average annual precipitation ≥ 1 500 mm, is 287 042 km² (14.7% of Mexico's land area). The coefficient of variation for the estimated annual precipitation among the seven layers varies from 1.8 to 60.9%. The category with a relatively low coefficient of variation covers 74.7% of the 287 042 km², the intermediate category 24.1%, and the one with the highest variation 1.2%. All layers, except "Satellite", are based on data from Mexico's National Water Commission (CONAGUA). For no layer is it possible to trace which climatological stations were used for its elaboration, and only for some layers the number of used stations is indicated. Other limitations for the analysis of the layers were that we could not find the following information: What statistical corrections were made to the raw data? How were missing precipitation data (which are common in the data from the CONAGUA) handled? What are the precise specifications for the methodology used for spatial interpolation? What environmental factors were taken into account? What parameters of statistical accuracy can be reported? On the other hand, we used 504 climatological stations from CONAGUA, where for the years 1951 to 2010 (or two 30-year periods of climatological normals) an average of ≥ 1 500 mm had been measured. Taking into account the missing data, the 504 climatological stations covered on average only 32.7 years of this 60-year interval. For the data from the climatological stations, we also did not find adequate methodological information: Which measuring instruments were used, and how accurate were they? What is the reason for the large number of missing data? Was there any process of correction and improvement of the data? We analyzed the differences between the precipitation measured at the 504 climatological stations and that estimated by the layer, determining the average ("relative bias") and the interval between the 10% and 90% quantiles of the differences ("dispersion 1"). The "Satellite" layer had the largest bias (–481 mm) and the largest dispersion (1 707 mm), while "Garcia" had the smallest elative bias (–23 mm) and "UNIATMOS" had the smallest dispersion (781 mm). The averages of the absolute differences ("dispersion 2"), according to the layer from 226 to 630 mm, were also high. The situation of large inconsistencies among layers was similar at 110 525 sites located equidistant between pairs of stations. At these sites, the precipitation estimates of the layers resulted from interpolating data between climatological stations. The extreme was at a site, where one layer estimated 886 mm and the other 4 929 mm of precipitation, 5.6 times the first value. The large variation in precipitation estimated by the layers was considerably explained by the topographic heterogeneity in a circle of 1 km diameter around the 504 stations. As supplementary information, we provide two Excel files with the annual precipitation data from the CONAGUA, and the layer estimates at the station

sites. In conclusion, it is relevant which of the seven layers are used to identify areas with high precipitation, and a layer based exclusively on satellite data is not (yet) recommended. The "UNIATMOS" layer stood out here with the comparatively best parameters. In any case, the spatial estimation of high annual precipitation in Mexico still presents major accuracy problems, which results in three recommendations: First, it would be important to improve the scientific basis of empirical data of precipitation and other climate variables for Mexico, with less missing data in the future, with description of methods and quality indicators, and if possible with a larger number of climate stations in regions with high precipitation; second, reproducible methods should be included in the description of climate layers; and third, it would be advisable to model a specific layer for high precipitation for the corresponding surface, estimated here at 14.7% of the Mexico's surface, where topography is taken into account in detail.

Keywords: Geographic Information System, inconsistency, missing data, weather satellite, weather stations.

INTRODUCCIÓN

Las primeras mediciones de precipitación se reportan en la India en el siglo IV A.C., pero su registro con enfoque científico empezó en Europa en el siglo XVII (Strangeways, 2010). Durante los más de 300 años posteriores se han empleado mapas para representar la distribución espacial de las variables climáticas. A partir de finales del siglo XX surgieron los sistemas computacionales de información geográfica para representar la distribución espacial y su análisis en capas digitales. Actualmente, las superficies climáticas de alta resolución espacial (con pixeles que representan 1 km^2) se basan en registros puntuales de estaciones climatológicas (Lawrimore *et al.*, 2011) y procesos de interpolación, con programas como ANUSPLIN (Xu y Hutchinson, 2013) o ANUCLIM (Booth, 2018). Es posible tomar en cuenta variables como elevación, pendiente y orientación de ladera. Algunas de las primeras contribuciones para generar capas climáticas digitales se elaboraron con el objetivo de analizar la distribución de especies biológicas en función del clima, como, por ejemplo, BIOCLIM para especies de plagas agrícolas en Australia (Busby, 1991).

La motivación para el análisis en el presente artículo fue delimitar la superficie de alta precipitación en México para estudiar las formaciones forestales correspondientes. Para este propósito comparamos siete capas de precipitación para seleccionar una: ¿es relevante con qué capa se identifican las áreas con alta precipitación? ¿es recomendable usar una capa de precipitación elaborada con datos satelitales en lugar de pluviómetros terrestres?

METODOLOGÍA

Capas climáticas digitales analizadas

En la Tabla 1 presentamos un resumen con información básica de las siete capas analizadas, incluyendo sus fuentes y características. El nombre de la primera capa ("CHELSA") es la abreviatura de "Climatologies at High resolution for the Earth's Land Surface Areas". En su elaboración se contemplan predictores orográficos, como exposición a vientos, relieve y variación altitudinal. "Cuervo" (Cuervo-Robayo *et al.*, 2020) representa el seguimiento de una versión anterior (Cuervo-Robayo *et al.*, 2014). "García" se basa en el trabajo clásico de Enriqueta García (1965) para México, cuyo mapa fue digitalizado y ajustado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Utiliza isoyetas que delimitan rangos de precipitación, en lugar de valores específicos por pixel. "Sáenz" es un desarrollo de Sáenz-Romero *et al.* (2010) para modelar cambios de vegetación en diferentes escenarios de cambio climático en México. "WorldClim" es una capa de amplio uso a nivel mundial, cuya primera versión fue presentada por Hijmans *et al.* (2005). La abreviatura "UNIATMOS" se refiere a la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), donde se elaboró esta capa. Finalmente, "Satelital" (GPM-IMERG) es la única capa analizada aquí que mide precipitación mediante sensores de microondas y radares satelitales. "GPM-IMERG" abrevia "Global Precipitation Measurement (GPM) - Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM", un proyecto de la National Aeronautics and Space

Administration o NASA (Portier *et al.*, 2023). Sin embargo, su resolución espacial es menor a la de las capas anteriores, cuyos datos en todos los casos se basan principalmente en mediciones con pluviómetros terrestres.

Todas las capas climáticas, excepto la de origen satelital, se basan en datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Sin embargo, para ninguna capa es posible rastrear cuáles fueron las estaciones climatológicas usadas para su elaboración. Solo para algunas capas se indica el número de estaciones utilizadas (Tabla 1). Otras limitaciones para el análisis de las capas fueron que no encontramos información precisa sobre correcciones estadísticas efectuadas a los datos crudos, manejo de datos faltantes en las series de tiempo (que son comunes en los datos de la CONAGUA), detalles de la interpolación empleada, los posibles factores ambientales tomados en cuenta, y parámetros de exactitud estadística.

Datos pluviométricos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para México

Las estimaciones de precipitación de cada capa las comparamos con los datos medidos y reportados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para 504 estaciones climatológicas con un promedio de precipitación (total) anual ≥ 1500 mm entre 1951 y 2010. Los 60 años representan dos normales climatológicas de 30 años, aunque para muchas estaciones sus datos están incompletos. El intervalo de 1951 a 2010 se traslapa, pero no coincide, con los diferentes períodos de precipitación usado (penúltima columna en la Tabla 1) para elaborar las siete capas. Es razonable suponer que tanto el efecto sobre los promedios de precipitación como algún posible efecto del cambio climático no son relevantes en comparación con las otras fuentes de error de medición y estimación.

Los datos climatológicos de la CONAGUA los obtuvimos del portal https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica, el cual despliega un mapa en formato KMZ con todas las estaciones climatológicas de la CONAGUA en México (5466). Para extraer la información asociada a cada estación, empleamos el programa *GPS Visualizer* (https://www.gpsvisualizer.com). El resultado fue un archivo de texto (CSV o Comma-Separated Values), con los enlaces para la información de cada estación. Posteriormente, escribimos un código en *Mathematica* 13.2.0 (https://www.wolfram.com/mathematica/), para conectarse con cada enlace de la CONAGUA y descargar los datos de precipitación para el periodo 1951 a 2010 de 3820 estaciones, para las cuales el acceso vía internet funcionó. En el portal de la CONAGUA también está disponible un "Manual de usuario" (versión del 2010); sin embargo, carece de información metodológica: ¿cuáles instrumentos de medición se emplearon y qué exactitud tenían? ¿A qué se debe el gran número de datos faltantes? ¿Hubo algún proceso de corrección y mejora de los datos? A pesar de estas limitaciones, son los únicos datos de origen empírico que están disponibles para un intervalo de décadas y con distribución en todo México.

Del total de 3820 estaciones climatológicas con precipitación anual para 1951 a 2010, solo 510 tuvieron un promedio de precipitación anual ≥ 1 500 mm. De estas, seis no contaron con valores de estimación en todas las capas, ya sea porque el pixel no contaba con un valor (al coincidir con un cuerpo de agua) o quedaba fuera del margen de la capa. Las 504 estaciones representan 13% de las 3820 estaciones para las que obtuvimos datos. El archivo de Excel "Annual precipitation means 1951-2010 from Mexico´s CONAGUA.xlsx", con la información suplementaria detallada, está disponible en https://doi.org/10.17632/v2wvfgzm53.1.

La incertidumbre (varianza estadística) sobre el promedio de precipitación reportada para 1951 a 2010 varía entre las estaciones climatológicas, porque varía el número de datos en los que se basan. La CONAGUA calculó el promedio de la precipitación para cada uno de los 12 meses del año con aquellos datos disponibles entre 1951 y 2010 para cada mes. Posteriormente sumaron los 12 promedios mensuales de precipitación. Con los datos faltantes (su número cambia entre las 504 estaciones), la media de años disponibles por estación varía de 10 a 60, con un promedio para todas las 504 estaciones de 32.7 años.

Tabla 1. Datos básicos sobre las siete capas estudiadas.[1]

Nombre usado para la capa	Referencias	Versión	Formato y resolución	Observaciones sobre métodos	Número de estaciones climatológicas	Período de precipitación usado	Precipitación anual mínima a máxima (mm/año)
"CHELSA"	Karger *et al.* (2017)	1	Raster, 30" [arcosegundos] (0.92 km x 0.92 km)	Procesos de reanálisis e interpolación con 'B-splines' multinivel.	Número no especificado	1979 –2013	44 a 4 543
"Cuervo"	Cuervo-Robayo et al. (2020)	t_3	Raster, 30"	Algoritmo de interpolación de 'thin-plate smoothing spline'.	circa 5 000	1980 –2009	45 a 3 917
"García"	García (1965)	-	Shapefile, 1: 1 000 000	Emplea isoyetas que llevan a áreas con una sola estimación de precipitación.	1 900	1921 –1960	25 a 4 750
"Sáenz"	Sáenz-Romero et al. (2010)	-	Raster, 30"	Algoritmo de interpolación de 'thin-plate smoothing spline'.	circa 3 100	1961–1990	61 a 4 585
"Satelital" (GPM-IMERG)	Hou et al. (2014), Huffman *et al.* (2020)	6-B	Raster, 0.1° x 0.1° (11.1 km x 11.1 km)	Datos de satélites climáticos, sin basarse en datos de pluviómetros terrestres.	No aplica	2000 –2021	73 a 2 816
"UNIATMOS"	Fernández-Eguiarte *et al.* (2014)	-	Raster, 30"	Interpolación de 'inverse distance weighting'.	5 320	1902 –2011	31 a 5 072
WorldClim	Fick y Hijmans (2017)	2	Raster, 30"	Algoritmo de interpolación de 'thin-plate smoothing spline'.	Número no especificado	1970 –2000	45 a 4 866

[1] "CHELSA" se puede descargar en https://chelsa-climate.org/downloads/, "Cuervo" desde http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/, "García" de http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/, "Sáenz" de http://forest.moscowfsl.wsu.edu/climate/, "Satelital" de https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/, "WorldClim" de https://www.worldclim.org, y "UNIATMOS" de https://atlasclimatico.unam.mx/ACM/#192.

Mapeo y análisis de datos

Para analizar las capas y crear los mapas utilizamos ArcMap 10.4.1. A través del menú de herramientas de análisis espacial ("Extract Values to Points") asociamos cada punto de una estación climatológica a los respectivos valores asignados al pixel de la capa correspondiente. Este mismo proceso lo realizamos en 110 525 sitios equidistantes en línea recta entre pares de estaciones climatológicas. El número total de sitios equidistantes entre cada par de las 504 estaciones teóricamente correspondería a (504^2–504) /2 = 126 756 sitios (coordenadas geográficas). Sin embargo, 25 sitios se repetían, y 16 006 se encontraron fuero del límite del país. Las coordenadas de los sitios equidistantes las calculamos con el promedio de las latitudes y de las longitudes entre las respectivas estaciones. En las capas con resolución de 30 arcosegundos, cada pixel representa 0.846 km^2 (0.92 km por lado), mientras que en la capa satelital con resolución de 0.1° cada pixel representa 123.2 km^2 (11.1 km por lado). Solo la capa "García" maneja áreas de tamaño variable, que corresponden a diferentes intervalos de precipitación anual, para los cuales usamos el valor intermedio equidistante a los extremos de cada intervalo.

Los análisis de los datos y la elaboración de las gráficas (excepto los mapas) se programaron en *Mathematica*. El archivo con los datos de entrada en Excel "Input for comparing the prediction of high precipitation among 7 layers in Mexico. xlsx" está disponible en https://doi.org/10.17632/v2wvfgzm53.1, como información suplementaria.

Analizamos las diferencias de precipitación entre cada capa y las estaciones climatológicas, así como entre los pares de capas. El promedio de los datos de diferencias positivas y negativas representa un indicador del sesgo relativo. Como parámetro de dispersión calculamos la diferencia entre el cuantil de 90% y el cuantil de 10%, es decir, el intervalo de 80% de los datos, sin tomar en cuenta 20% de los datos más extremos que podrían ser estadísticamente atípicos. Como parámetro alternativo de dispersión calculamos el promedio de las diferencias absolutas, siendo el promedio del valor absoluto (positivo) de todas las diferencias en cuestión.

Para mapear el coeficiente de variación de la precipitación anual estimada entre las siete capas, convertimos la resolución de las capas "García" y "Satelital" a pixeles de 30 arcosegundos, para obtener siempre siete valores de precipitación por pixel de 30 arcosegundos. Para este análisis delimitamos aquella superficie, donde por lo menos una de las siete capas estimó un promedio de precipitación de ≥ 1500 mm. La fórmula para el coeficiente de variación (*CV*), corregido para quitar un sesgo (Sokal y Rohlf, 2012, p. 56), es

$$CV = \frac{s \cdot 100\%}{\bar{Y}} \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot n}\right),$$

donde s es la desviación estándar de los siete valores de precipitación anual, $\bar{Y}$ el promedio, y n = 7 capas.

ÍNDICE DE HETEROGENEIDAD TOPOGRÁFICA ALREDEDOR DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

Descargamos el modelo digital de elevación con cobertura nacional y resolución espacial de 15 m, llamado "Continuo de Elevaciones Mexicano" (CEM 3.0), del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en formato TIF de https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/. Con dicho modelo analizamos la variación altitudinal en un área circular con diámetro de 1 km, cuyo centro corresponde a las coordenadas de cada una de las 504 estaciones climatológicas. Dado que el modelo de elevación usa pixeles de 15 m x 15 m, cada círculo abarca en promedio 3490.7 pixeles ($500^2 \cdot \pi/15^2$).

En ArcGis establecimos el radio de 500 m mediante la herramienta de "Análisis de proximidad". Posteriormente extrajimos en cada círculo de 1 km de diámetro el valor de altitud asociado a cada pixel, mediante la herramienta 'Intersect'. Se exportaron un total de 1 769 785 de valores de altitud para los 504 círculos en un archivo de texto. Este archivo se importó en *Mathematica*, para calcular 504 desviaciones estándares con la fórmula usual

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(A_i - \bar{A}\right)^2} \ ,$$

donde A_i se refiere a la altitud número i de n altitudes en el círculo, y $\bar{A}$ al promedio de todas las altitudes del círculo. Con la desviación estándar tomamos en cuenta solamente la variación altitudinal en el círculo, y no la altitud en la cual se encuentra la estación.

Posteriormente aplicamos el modelo de regresión $y = b_0 + b_1 \cdot x + b^2 \cdot x^2 + \varepsilon$, con restricción $b_1 = -2 \cdot b^2 \cdot x_{máx}$, donde la variable independiente (x) se refiere a la desviación estándar (s) de las altitudes. La variable dependiente (y) es la diferencia correspondiente entre el promedio de la precipitación anual medido (1951-2010) y la precipitación estimada por una de las siete capas. La restricción asegura que el mínimo de la línea de regresión se alcanza en $x_{máx}$, evitando un modelo polinómico de segundo grado que primero baja y luego arbitrariamente sube otra vez. Se deriva al despejar $dy/dx = b_1 + 2 \cdot b_2 \cdot x = 0$ para b_1, y sustituir x con $x_{máx}$ Calculamos la regresión con la función "NonlinearModelFit" en *Mathematica*.

RESULTADOS

Distribución geográfica de las áreas con alta precipitación anual en las capas

Como primer diagnóstico para detectar diferencias entre las capas, mapeamos la superficie con alta precipitación anual (≥ 1 500 mm en promedio, Figuras 1 y 2). Para afinar este análisis, distinguimos tres subcategorías: de 1 500 a < 2 500 mm, de 2 500 a < 3 500 mm, y ≥ 3 500 mm. De las siete capas que analizamos, "Satelital" y "García" son las que presentan la mayor superficie con alta precipitación (232 439 y 212 948 km^2, respectivamente), mientras que la menor es la de "Cuervo" (143 964 km^2). Esta última capa abarca solo 62% y 68%, respectivamente, del área de las dos primeras (Figura 1). Las otras cuatro capas tienen áreas intermedias (Figura 2). También la precipitación máxima en cada capa varía considerablemente. La más alta está en "UNIATMOS" con 5072 mm (Figura 2), y la más baja en "Satelital" con 2816 mm, lo que representa 56% de la más alta (Figura 1). La segunda-más baja es "Cuervo" con 3917 mm (77%). Las diferencias en superficie con promedio de precipitación anual ≥ 1500 mm se reflejan también en la distribución de las superficies correspondientes. En particular la capa "Satelital" difiere de las demás capas en su distribución.

Estimación de la precipitación anual en los sitios de las 504 estaciones climatológicas

Al comparar el promedio de los datos medidos de precipitación anual de 1951 a 2010 en las 504 estaciones climatológicas con la precipitación que estima cada capa en el mismo sitio, destacan grandes intervalos de diferencia (Tabla 2). La mayor disparidad se presenta en un sitio de montaña del municipio de San Juan Comaltepec en Oaxaca, donde la capa "Cuervo" estimó 4765 mm de precipitación menor a la reportada por la respectiva estación climatológica. El caso opuesto lo observamos en un sitio con pastizales en el municipio de Las Margaritas en Chiapas, donde la capa "García" estimó 1667 mm de precipitación mayor a la reportada por la respectiva estación. Todas las capas subestiman en promedio la precipitación anual en la estaciones, ya que los promedios por capa de las 504 sustracciones entre la precipitación estimada por capa y la precipitación reportada por la estación son negativos (de −23 mm a −481 mm en la Tabla 2). En la capa "Satelital", el sesgo relativo es especialmente notoria (Figura 3). También su intervalo entre los cuantiles de 10% a 90% de los datos en la penúltima columna de la Tabla 2 ("dispersión 1") es 2.2 veces mayor (1707 mm) que el intervalo de la capa "UNIATMOS" (781 mm). De forma similar, los promedios de las diferencias absolutas en la última columna ("dispersión 1") son considerables, desde un mínimo de 226 mm en la capa "UNIATMOS" hasta un máximo de 630 mm en la capa "Satelital".

Comparación entre capas

Para analizar inconsistencias entre pares de capas, comparamos en la Tabla 3 sus precipitaciones anuales estimadas en los 110 525 sitios entre estaciones. La Tabla 3 tiene las mismas columnas que la

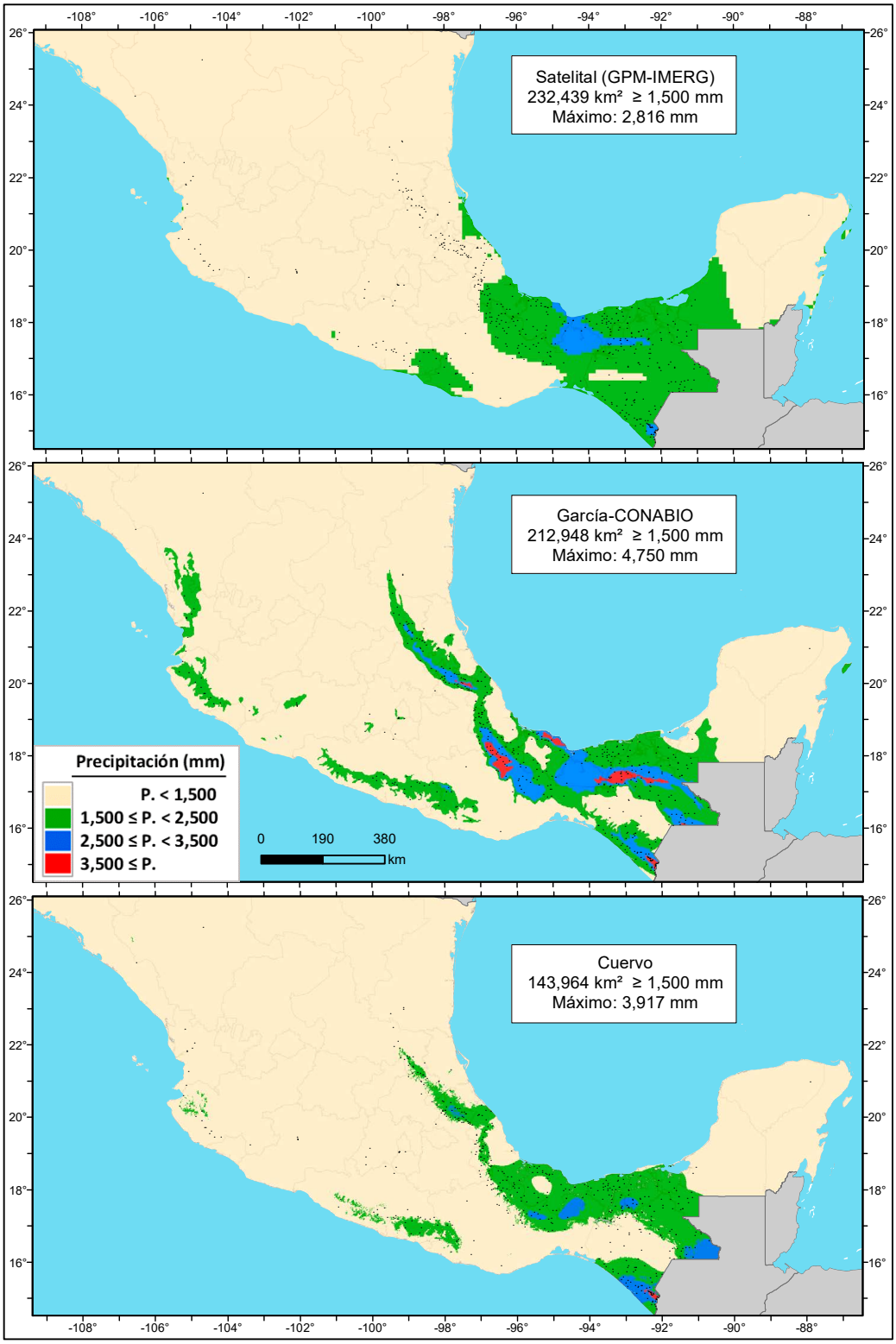


Figura 1. Identificación de alta precipitación anual (≥ 1500 mm en promedio) en México por tres de siete capas digitales. La capa "Satelital" estima la mayor superficie, "García" la segunda-mayor, y "Cuervo" la menor. Los puntos negros indican los sitios de las 504 estaciones de la CONAGUA que reportan valores de dos normales climatológicas (1951-2010) con alta precipitación anual.

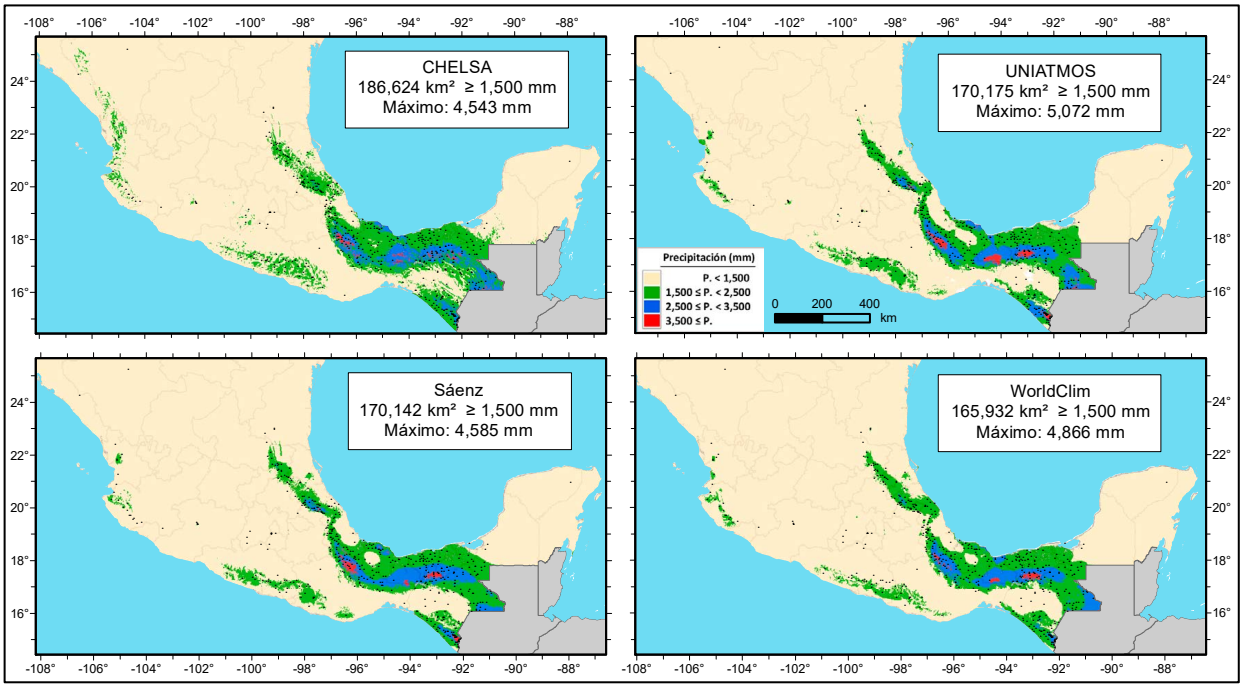


Figura 2. La misma información de la Figura 1 para las otras cuatro capas, con tamaño de superficies intermedias.

Tabla 2. Estadísticas para las diferencias de precipitación anual de cada capa y la precipitación medida en el mismo sitio para las 504 estaciones climatológicas, ordenadas según el intervalo entre cuantiles en la penúltima columna; todos los datos están en milímetros (mm).

Nombre de la capa	Diferencias mínima y máxima	Promedio de diferencias (“sesgo relativo”)	Cuantiles de 10% y 90%	Intervalo entre los cuantiles (“dispersión 1”)	Promedio de diferencias absolutas (“dispersión 2”)
“UNIATMOS”	−3134 a 1361	−110	−673 a 108	781	226
“García”	−3235 a 1667	−23	−424 a 381	805	276
“Sáenz”	−4100 a 1094	−222	−754 a 294	1048	375
“WorldClim”	−2829 a 1428	−284	−1000 a 201	1201	404
“CHELSA”	−2546 a 1328	−379	−1134 a 215	1349	491
“Cuervo”	−4765 a 1468	−447	−1327 a 148	1475	543
“Satelital”	−3941 a 766	−481	−1406 a 301	1707	630

Tabla 3. Estadísticas para las diferencias de precipitación anual en 110 525 sitios, equidistantes entre pares de las 504 estaciones, ordenadas según el intervalo entre cuantiles en la penúltima columna; todos los datos están en milímetros.

Nombre de la capa	Diferencias mínima y máxima	Promedio de diferencias (“sesgo relativo”)	Cuantiles de 10% y 90%	Intervalo entre los cuantiles (“dispersión 1”)	Promedio de diferencias absolutas (“dispersión 2”)
“Sáenz” y “UNIATMOS”	−1297 a 1 830	2	−264 a 289	553	176

Tabla 3. Continúa.

Nombre de la capa	Diferencias mínima y máxima	Promedio de diferencias (“sesgo relativo”)	Cuantiles de 10% y 90%	Intervalo entre los cuantiles (“dispersión 1”)	Promedio de diferencias absolutas (“dispersión 2”)
“UNIATMOS” y “WorldClim”	−1831 a 1822	−39	−371 a 218	589	185
“Sáenz” y “WorldClim”	−1886 a 1872	−37	−398 a 288	686	210
“García” y “UNIATMOS”	−2951 a 1977	−115	−508 a 235	743	256
“CHELSA” y “WorldClim”	−2143 a 2082	−61	−476 a 332	808	263
“Cuervo” y “Satelital”	−1506 a 1263	257	−164 a 651	815	371
“CHELSA” y “Sáenz”	−2185 a 1972	−25	−432 a 387	819	267
“Cuervo” y “WorldClim”	−1380 a 3852	182	−144 a 695	839	267
“García” y “Sáenz”	−2836 a 2139	−117	−576 a 268	844	272
“CHELSA” y “UNIATMOS”	−2112 a 2331	−22	−427 a 432	859	283
“Cuervo” y “Sáenz”	−1441 a 3430	219	−124 a 773	897	288
“CHELSA” y “García”	−1639 a 2702	92	−361 a 613	974	307
“García” y “WorldClim”	−2953 a 1705	−153	−718 a 261	979	305
“Cuervo” y “UNIATMOS”	−1445 a 4043	221	−141 a 847	988	301
“CHELSA” y “Cuervo”	−3497 a 1403	−243	−852 a 160	1012	339
“CHELSA” y “Satelital”	−2342 a 966	14	−592 a 460	1052	332
“Satelital” y “WorldClim”	−1110 a 2895	−75	−554 a 583	1137	368
“Sáenz” y “Satelital”	−2623 a 1091	38	−628 a 532	1160	394
“Cuervo” y “García”	−2182 a 3994	335	−152 a 1086	1238	412
“Satelital” y “UNIATMOS”	−1195 a 2987	−36	−614 a 745	1359	424
“García” y “Satelital”	−3105 a 1356	−78	−891 a 575	1466	444

Tabla 2. A pesar de que la Figura 4 solo muestra tres de las $(7^2 - 7)/2 = 21$ comparaciones entre pares de capas, en general se observan grandes inconsistencias en las estimaciones de la precipitación en los 110 525 sitios. El menor intervalo entre los cuantiles de 10% y 90% se da con 553 mm entre “Sáenz” y “UNIATMOS”, y el mayor intervalo con 1466 mm entre “García” y “Satelital” (2.7 veces el primero).

La Figura 5 muestra un panorama geográfico de la variación de la precipitación anual estimada entre las siete capas. Ambos mapas presentan el

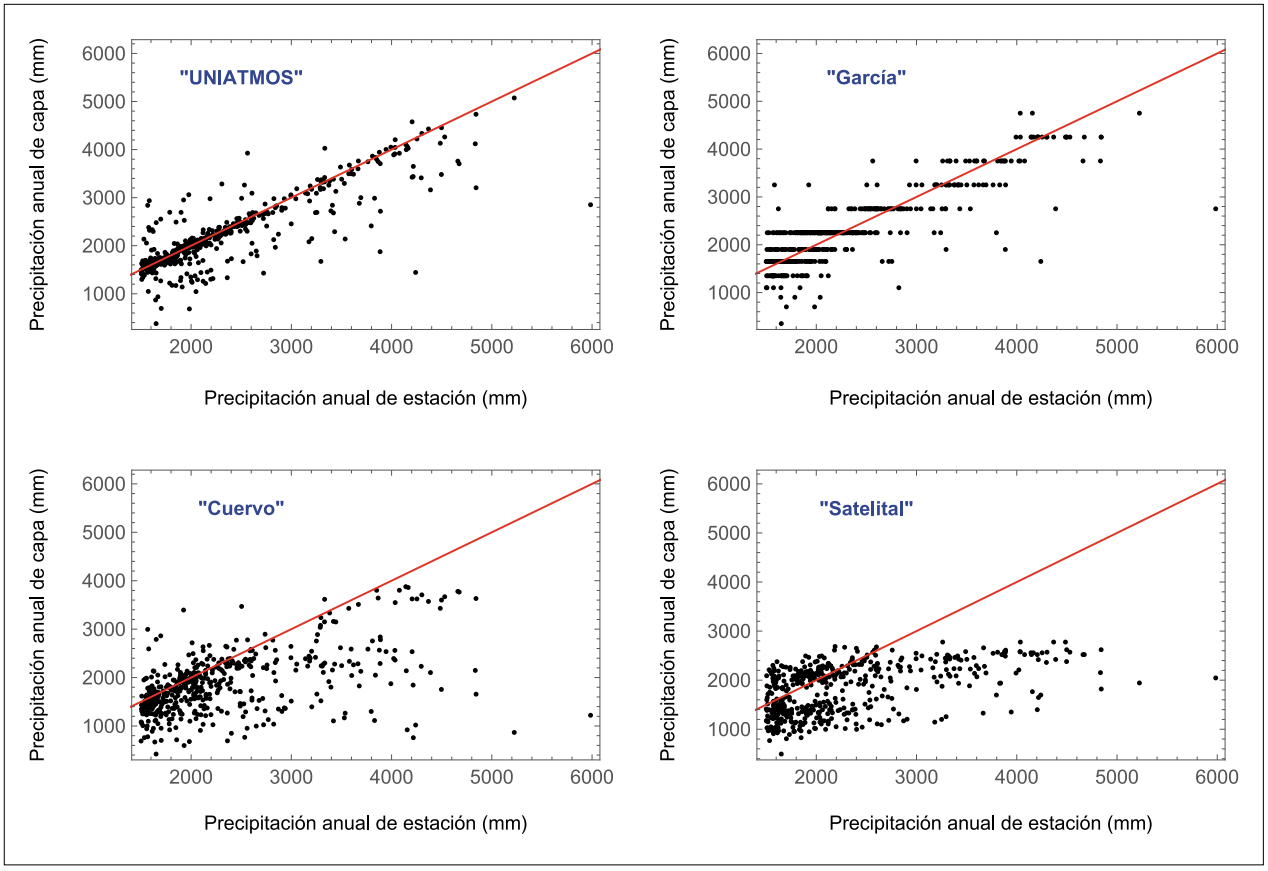


Figura 3. Comparación entre la precipitación anual de las estaciones climatológicas y la precipitación estimada en cuatro de las siete capas. La línea roja representa la diagonal, donde tendrían que estar los puntos si hubiera total coincidencia. Arriba: las dos estaciones con menor diferencia de los datos y también menor sesgo relativo. En el caso de "García", la estimación no es puntual sino para áreas con un solo valor. Abajo: las dos estaciones con la mayor diferencia de los datos y también el mayor sesgo relativo.

coeficiente de variación, uno en escala continua de 1.8 a 60.9% (arriba), y otro en tres categorías con curvas de nivel (abajo). La superficie donde al menos una de las siete capas estima un promedio de precipitación anual ≥ 1500 mm es de 287 042 km^2, o 14.7% de la superficie de México. La categoría con un coeficiente de variación relativamente bajo abarca 74.7% (214 403 km^2) de los 287 042 km^2. La categoría intermedia es de 24.1% (69 318 km^2), y la que tiene mayor variación de 1.2% (3320 km^2). En el mapa inferior de la Figura 5 se puede observar que las superficies con coeficiente de variación alto y medio siempre se encuentran en regiones montañosas, aunque algunas de estas regiones también tienen un coeficiente de variación bajo.

Heterogeneidad topográfica como factor que explica incertidumbre en las estimaciones de precipitación

Con el índice de heterogeneidad topográfica exploramos si en la vecindad de las 504 estaciones climatológicas hay mayor diferencia entre precipitación anual medida y estimada con mayor heterogeneidad topográfica (desviación estándar de altitudes). La Tabla 4 presenta los resultados de la regresión estadística. En la Figura 6 se puede observar que, con una desviación estándar cerca de cero, los valores positivos y negativos son similares en magnitud. Con mayor desviación estándar dominan cada vez más las diferencias negativas, es decir, la precipitación estimada por la capa subestima la precipitación medida en la estación. Finalmente,

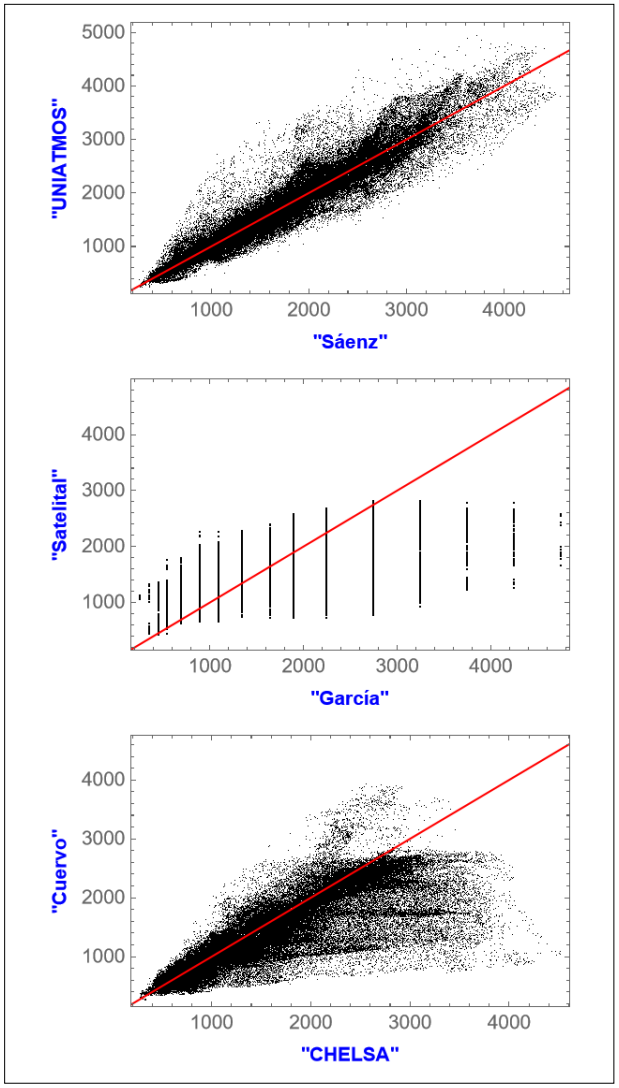


Figura 4. Comparación entre promedios de precipitación anual estimada (en mm) de tres pares de capas climáticas en 110 525 sitios equidistantes entre estaciones climáticas. La primera comparación (arriba) presenta el menor intervalo entre los cuantiles de 10 y 90% de las diferencias entre ambas capas (Tabla 3). La segunda comparación (en medio) tuvo el mayor intervalo, y la tercera (abajo) el mayor intervalo cuando se excluyen "García" y "Satelital" (capas de menor resolución).

la diferencia proyectada por la regresión se nivela con mayor desviación estándar.

"García" es la única capa donde ambos coeficientes b_1 (representando la inclinación) y b_2 (representando la curvatura) resultan no ser significativamente diferentes a cero con $\alpha = 0.05$. En segundo lugar queda "UNIATMOS", donde solamente b_1 es ligeramente significativo, mientas que para la capa "Satelital" en el último lugar ambos coeficientes son altamente significativos. A pesar de que b_2 no es significativo en los primeros tres casos, la distribución de los residuos con su inclusión es mejor que en un modelo linear (con solo b_1).

La desviación estándar de las altitudes para las 504 estaciones climatológicas varía en un rango de 0 a 149.52 m. Al insertar estos valores en cada ecuación de la regresión en la segunda columna de la Tabla 4 y tomar la diferencia $f(0)$- $f(149.52)$ resulta un intervalo de precipitación anual (última columna) que la desviación estándar de altitudes puede explicar. Destaca la capa "García" en el primer lugar, ya que parece tomar en cuenta de mejor manera la heterogeneidad topográfica, y en último lugar la capa "Satelital". La Figura 6 presenta las dos primeras y las dos últimas capas en la secuencia de la Tabla 4. Las otras tres capas tienen patrones intermedios. Con mayor variación altitudinal existe mayor diferencia entre precipitación anual medida y estimada. Además, las capas difieren en su habilidad de modelar el efecto de esta variación sobre la precipitación.

DISCUSIÓN

Analizamos en siete capas climáticas digitales sus estimaciones de alta precipitación anual (≥ 1 500 mm en promedio) en México. Este nivel de precipitación implica generalmente una vegetación natural forestal en una elevación de 0 a aproximadamente 4 000 m sobre nivel del mar (INEGI, 2017, p. 44). Hay enormes diferencias entre las estimaciones de las siete capas digitales: La superficie con promedios de precipitación anual ≥ 1 500 mm varía según la capa seleccionada entre 143 964 km^2 ("Cuervo") y 232 439 km^2 ("Satelital"), donde la segunda superficie es 1.6 veces la primera. Si tomamos como superficie terrestre de México 1 954 658 km^2, según la CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), el intervalo del posible porcentaje de la superficie con este nivel de precipitación en México es de 7.4% a 11.9%. Puede haber varias razones para estas discrepancias:

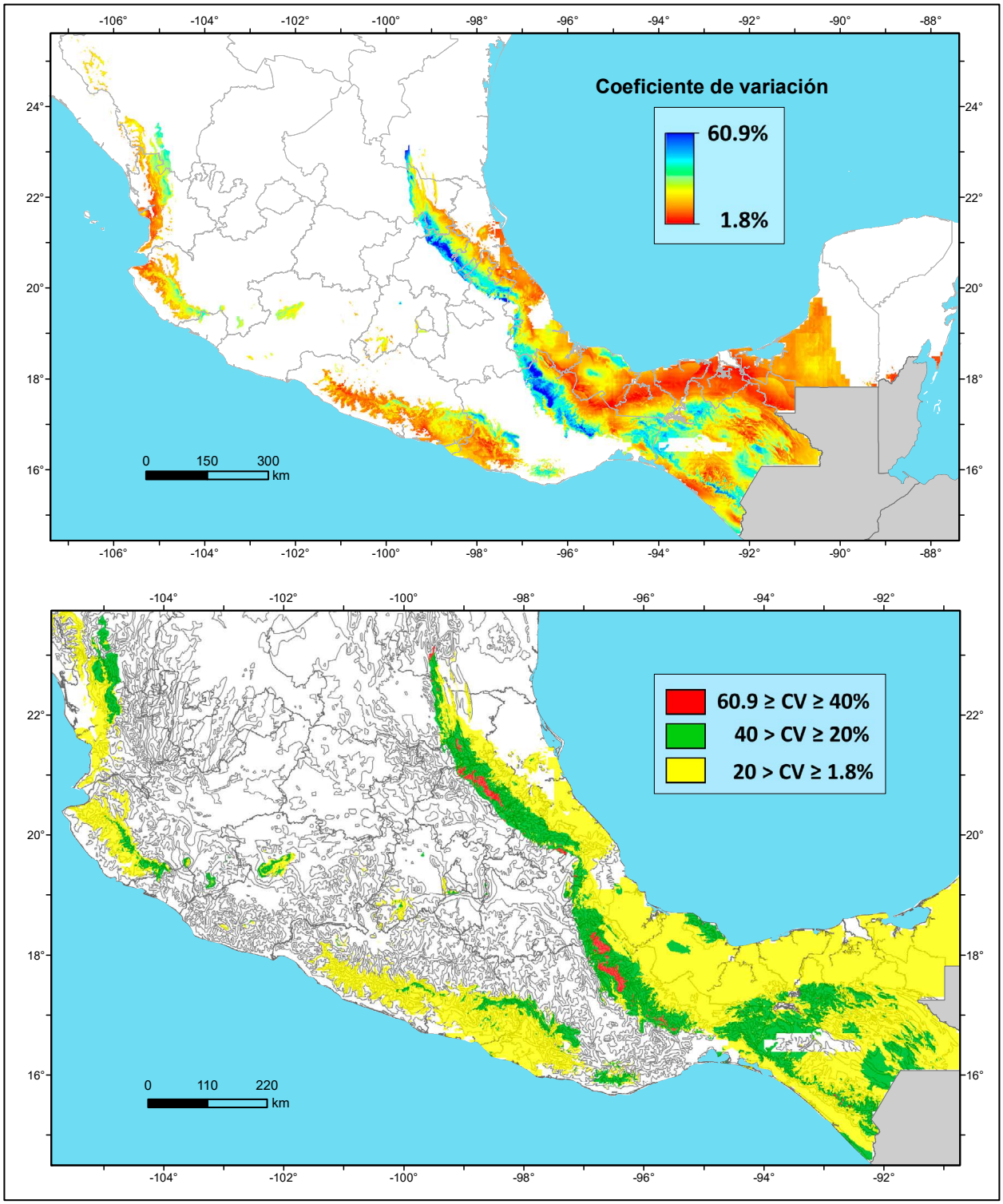


Figura 5. Mapas del coeficiente de variación (CV) de la precipitación anual estimada entre las siete capas, por pixel de 30 arcosegundos. Se muestra la superficie, donde al menos una de las siete capas estima un promedio de precipitación anual ≥ 1500 mm. Arriba: El coeficiente de variación en escala continua de 1.8% a 60.9%. Abajo: El coeficiente de variación por categoría, y con curvas de nivel en el mapa que tienen 500 m de diferencia en elevación entre sí. Aquí hicimos un acercamiento para presentar toda la superficie verde y roja (CV ≥ 20%).

Tabla 4. Resultados de la regresión estadística de las diferencias entre la precipitación anual medida (promedio de 1951 a 2010) y la estimada por cada capa, en función de la desviación estándar de las altitudes en círculos con radio de 500 m alrededor de cada una de las 504 estaciones.

Nombre de la capa	Ecuación de regresión $f(x) = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2$	Probabilidad que $b_1 = 0$	Probabilidad que $b_2 = 0$	$f(0) - f(149.52)$ en m
"García"	$45.3 - 3.04 \cdot x + 0.00980 \cdot x^2$	0.090	0.57	236
"UNIATMOS"	$-17.0 - 4.32 \cdot x + 0.0149 \cdot x^2$	0.014	0.38	312
"Sáenz"	$-55.3 - 8.48 \cdot x + 0.0324 \cdot x^2$	$3.9 \cdot 10^{-5}$	0.10	544
"CHELSA"	$-172 - 11.0 \cdot x + 0.0439 \cdot x^2$	$1.1 \cdot 10^{-6}$	0.044	661
"WorldClim"	$-63.2 - 11.0 \cdot x + 0.0408 \cdot x^2$	$7.6 \cdot 10^{-7}$	0.056	726
"Cuervo"	$-115 - 16.3 \cdot x + 0.0599 \cdot x^2$	$7.4 \cdot 10^{-9}$	0.027	1097
"Satelital"	$-105 - 19.6 \cdot x + 0.0769 \cdot x^2$	$2.6 \cdot 10^{-12}$	0.0041	1212

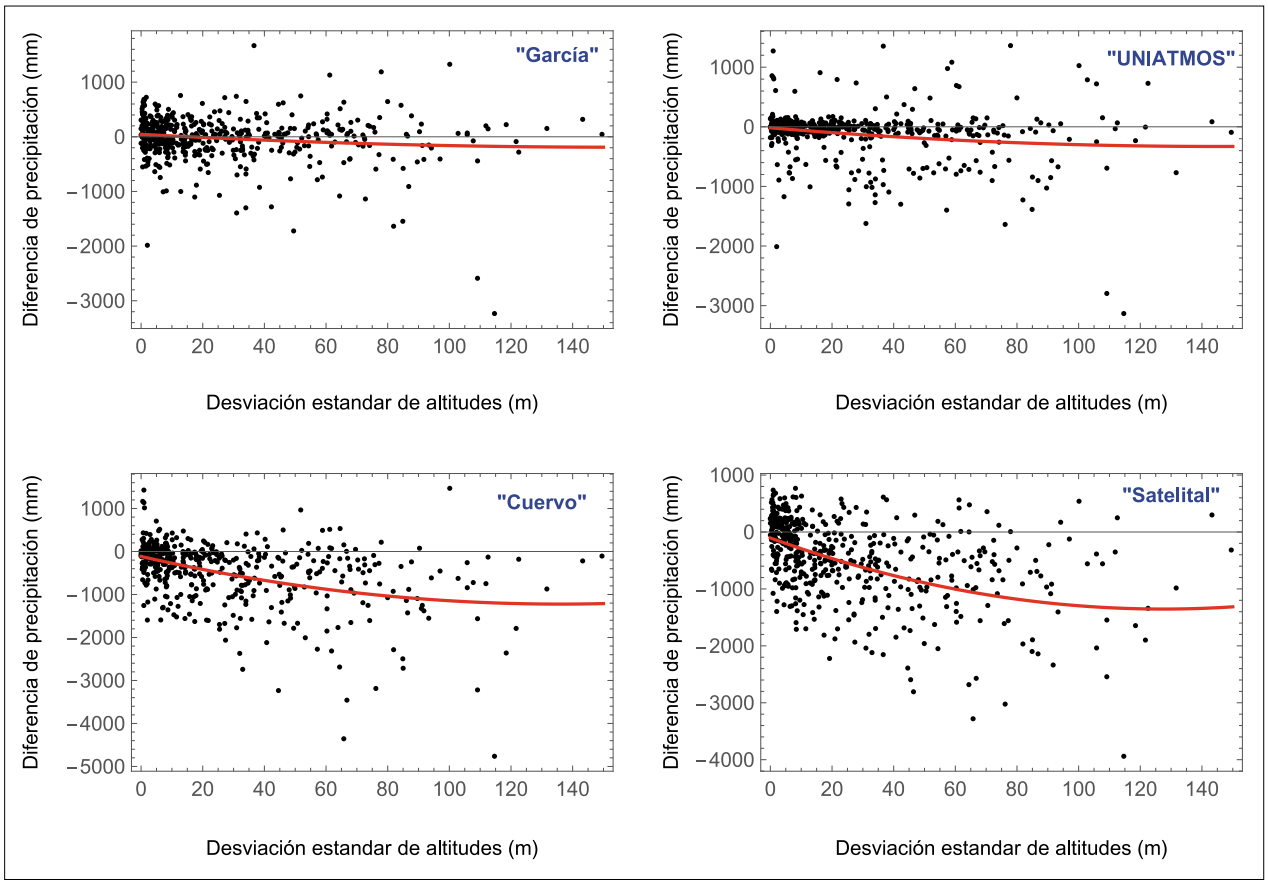


Figura 6. Arriba: gráficas de regresión para las dos primeras capas de la Tabla 4, donde la variación topográfica (desviación estándar de las altitudes) explica poco las diferencias entre la precipitación medida y la estimada. Abajo: gráficas para las dos últimas capas de la Tabla 4, donde la variación topográfica explica mucha más las diferencias.

- Modelar la distribución geográfica de alta precipitación parece implicar mayor incertidumbre. En el 14.7% del área continental de México (287 042 /1 954 658), al menos una de las siete capas analizadas estima un promedio de precipitación anual ≥ 1 500 mm. La superficie restante, con una precipitación menor a 1 500 mm, tiene 1 667 616 km^2. En 87% de esta última superficie, las siete capas tienden a ser más consistentes entre sí, con un coeficiente de variación de la precipitación anual estimada más bajo (< 20%). Esto contrasta con un 75% de la superficie en el área con alta precipitación anual con coeficiente de variación bajo. Las dos superficies difieren 12% (87–75%).
- Las capas no se ajustan a las condiciones particulares de cada sitio. Más bien representan modelos que no toman en cuenta todos los factores que determinan la precipitación en cada lugar. El modelo de una capa puede ser menos adecuado que el modelo de otra. No pudimos profundizar en este aspecto, debido a la carencia de la información detallada sobre la metodología empleada para su modelaje.
- Los datos de origen empírico disponibles de las estaciones climatológicas también tienen limitaciones, dado que pueden tener errores (instrumentales, de lectura, transcripción, etc.). Los datos faltantes pueden sesgar el promedio de la precipitación anual de 1951 a 2010. La CONAGUA proporciona para cada estación las coordenadas geográficas y la altitud. Al determinar las altitudes de las estaciones según las coordenadas geográficas proporcionadas por la CONAGUA con el modelo de elevaciones del INEGI, hay 80 (16%) de las 504 estaciones con una diferencia absoluta mayor a 100 m entre el modelo de elevaciones y la altitud proporcionada por la CONAGUA, y 21 estaciones (4%) con una diferencia absoluta mayor a 500 m (marcadas en rojo en "Input for comparing the prediction of high precipitation among 7 layers in Mexico.xlsx" en https://doi.org/10.17632/v2wvfgzm53.1). Hay dos posibilidades: o están incorrectas las altitudes o están incorrectas las coordenadas geográficas, como ya lo observaron Cuervo-Robayo *et al*. (2014, p. 2429) para algunos sitios.

La idea de obtener datos de precipitación por medio de satélites en forma independiente a la de los pluviómetros terrestres es atractiva (Masunaga, 2022). Sin embargo, ya es conocido que esta tecnología todavía no funciona bien para altos niveles de precipitación en México (Mayor *et al*., 2017), lo que se confirmó aquí plenamente.

Regresando a las preguntas de la introducción, sí es relevante con cuál capa se identifican las áreas con alta precipitación. La capa de mediciones satelitales tenía especialmente altos valores de incertidumbre y sesgo relativo. En contraste, la capa "UNIATMOS" pareció aquí con los mejores parámetros. De cualquier forma, la estimación de altos niveles de precipitación anual en México presenta todavía grandes problemas de incertidumbre.

RECOMENDACIONES

- Sería importante mejorar la base científica de datos empíricos de precipitación y otras variables climáticas para México, con menos datos faltantes en el futuro, con la descripción de los métodos e indicadores de calidad, y en lo posible con un mayor número de estaciones climáticos en regiones con alta precipitación.
- Se deberían incluir métodos reproducibles en la descripción de las capas: especificaciones de las estaciones climatológicas, datos faltantes y correcciones estadísticas realizadas, descripción de la interpolación con factores ambientales incluidos, indicadores de exactitud, etc.
- Sería recomendable modelar una capa específica para altos niveles de precipitación en la superficie correspondiente (estimada aquí en 14.7% de la superficie de México), donde se tome en cuenta a detalle la topografía.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Posgrado de Ciencias Biológicas de la UNAM su apoyo al primer autor (Armando

Rincón-Gutiérrez) como tesista de doctorado, y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por haberle otorgado una beca para tesistas.

REFERENCIAS

Booth, T. H. (2018). Why understanding the pioneering and continuing contributions of BIOCLIM to species distribution modelling is important. *Austral Ecology*, 43(8), 852-860. https://doi.org/10.1111/aec.12628

Busby, J. R. (1991). BIOCLIM - a bioclimate analysis and prediction system. *Plant Protection Quarterly*, 6(1), 8-9. https://caws.org.nz/PPQ567/PPQ%2006-1%20pp008-9%20Busby.pdf

Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., y Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2427-2437. https://doi.org/10.1002/joc.3848

Cuervo-Robayo, A. P., Ureta, C., Gómez-Albores, M. A., Meneses-Mosquera, A. K., Téllez-Valdés, O., y Martínez-Meyer, E. (2020). One hundred years of climate change in Mexico. *PLOS ONE*, 15(7), e0209808. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209808

Fernández-Eguiarte, A., Romero Centeno, R., y Zavala Hidalgo, J. (2014). Metodologías empleadas en el atlas climático digital de México para la generación de mapas de alta resolución. *Geoacta*, 39(1), 165-173. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-77442014000100013

Fick, S. E., y Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. https://doi.org/10.1002/joc.5086

García, E. (1965). Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas*, 1, 2-30. https://doi.org/10.14350/rig.59179

Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., y Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978. https://doi.org/10.1002/joc.1276

Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K., y Iguchi, T. (2014). The global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701-722. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1

Huffman, G. J., Bovin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C., Nelkin, E. J., Sorooshian, S., Tan, J., y Xie, P. (2020). *NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG)*. Greenbelt, Maryland, EUA: National Aeronautics and Space Administration (NASA). https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2020-05/IMERG_ATBD_V06.3.pdf

INEGI. (2017) *Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación, escala 1:250, 000, serie VI*. Ciudad de Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825092030.pdf

Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., y Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4(1), 170122. https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122

Lawrimore, J. H., Menne, M. J., Gleason, B. E., Williams, C. N., Wuertz, D. B., Vose, R. S., y Rennie, J. (2011). An overview of the Global Historical Climatology Network monthly mean temperature data set, version 3. *Journal of Geophysical Research*, 116(D19), D19121. https://doi.org/10.1029/2011JD016187

Masunaga, H. (2022). *Satellite Measurements of Clouds and Precipitation: Theoretical Basis*. Singapore: Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2243-5

Mayor, Y. G., Tereshchenko, I., Fonseca-Hernández, M., Pantoja, D. A., y Montes, J. M. (2017). Evaluation of error in IMERG precipitation estimates under different topographic conditions and temporal scales over Mexico. *Remote Sensing*, 9, 503. https://doi.org/10.3390/rs9050503

Portier, A., Kirschbaum, D., Gebremichael, M., Kemp, E., Kumar, S., Llabres, I., Snodgrass, E., y Wegiel, J. (2023). NASA's global precipitation measurement mission: Leveraging stakeholder engagement & applications activities to inform decision-making. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 29, 100853. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100853

Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J., y Richardson, B. A. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*, 102(3-4), 595-623. https://doi.org/10.1007/s10584-009-9753-5

Sokal, R. R., y Rohlf, F. J. (2012). *Biometry*. New York: W.H. Freeman and Company.

Strangeways, I. (2010). A history of rain gauges. *Weather*, 65(5), 133-138. https://doi.org/10.1002/wea.548

Xu, T., y Hutchinson, M. F. (2013). New developments and applications in the ANUCLIM spatial climatic and bioclimatic modelling package. *Environmental Modelling & Software*, 40, 267-279. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.10.003

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60765 • ARTÍCULOS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60765
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Una aproximación geoespacial para la estimación de la generación de energía fotovoltaica en Sonora

A geospatial approach for the estimation of photovoltaic power generation in Sonora

Leonardo Coronado Arvayo* y José Mauricio Galeana Pizaña**

Recibido: 10/7/2023. Aceptado: 3/3/2024. Publicado: 13/3/2024.

Resumen. A nivel internacional existe acuerdo en que la energía fotovoltaica (EF) es un pilar de la transición energética requerida para mitigar los efectos del calentamiento global. El presente artículo tiene por objetivo general aportar una primera aproximación geoespacial para estimar la proporción de territorio y la cantidad de electricidad factible de ser generada mediante el proceso fotovoltaico en el estado de Sonora. Para cumplir con esto, primero es necesario plantear que método es el más apto para identificar estos sitios. En la literatura se identificó que el proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) es una de las metodologías más empleadas para la selección de sitios para la producción de diferentes tipos de energías solares, incluyendo mayoritariamente a la fotovoltaica (Suprova *et al.*, 2020; Malemnganbi y Shimray, 2020; Al Garni y Awasthi, 2017; Solangi *et al.*, 2019). Una mezcla de GIS y AHP es uno de los submétodos más apto para identificar estos sitios y aplicarles condiciones específicas (Chandio *et al.*, 2012), en este caso en particular a través de la aplicación de ecuaciones, usando algebra de mapas, para estimar la producción teórica de electricidad para toda la entidad federativa con el proceso fotovoltaico. Ya que los sistemas de información geográfica (GIS-AHP permiten espacializar objetivos específicos.

De aquí que la primera tarea fuera espacializar las variables determinísticas del proceso fotovoltaico, así como los sitios donde no es posible producir esta energía. En este caso, se obtuvieron las variables meteorológicas gracias a datos de las estaciones de CESAVE-SIAFESON (2020). Por cuestiones de disponibilidad de datos y consistencia de estos en las estaciones, se emplearon 97 estaciones en total. Estas registran diferentes medidores. Como estos datos son geográficamente puntuales, se requirió utilizar técnicas de interpolación espacial para hacerlos continuos.

El resto de los criterios de selección se obtiene de diferentes fuentes de información. En el caso de la elevación del terreno del Continuo de Elevaciones Mexicano de INEGI (s.f.), la inclinación y la orientación del terreno se estimaron a partir de los datos de elevación con la técnica geodésica de su método respectivo en el software Arcmap. Las vialidades se tomaron de la Red Nacional de Caminos, obtenida de INEGI (2020), las manchas urbanas y rurales respectivas de INEGI (2016) y las líneas de transmisión eléctrica de CENACE (2016). El método de proximidad empleado para estas tres variables fue el de camino-distancia del software Arcmap.

Los criterios de exclusión son las líneas de transmisión (CENACE, 2016), los patrimonios de la humanidad (CONANP, 2021a), las áreas naturales protegidas (CONANP, 2021), los sitios de vegetación nativa y vida (INEGI, 2017), los cuerpos de agua (INEGI, 2009), las manchas urbanas y rurales (INEGI, 2016), la propiedad social que se encuentra en la carta catastral de Sonora (INEGI, 2016a), la red vial (INEGI, 2020c), lugares con una inclinación mayor a 10 grados (INEGI, s.f.) y los sitios turísticos, religiosos, aeropuertos y otros (INEGI, 2020c).

* Candidato a Doctor por el Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A.C., Ciudad de México, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6960-1060
** Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial. Contoy 137, Lomas de Padierna, 14240, Tlalpan, Ciudad de México, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3623-6851. Email: mgaleana@centrogeo.edu.mx. Autor de correspondencia.

Con esto se contó con las variables determinísticas y los sitos no aptos para instalar plantas solares. Para identificar la importancia relativa de las variables determinísticas se utilizaron estudios similares como son Sánchez-Lozano et al. (2013), Chen et al. (2014), Noorollahi et al. (2016), Zoghi et al. (2017), Doljak y Stanojević (2017), Al Garni y Awasthi (2017) y Doorga et al. (2018).

Posteriormente se aplicó el método de AHP a los datos espaciales para generar la clasificación de los sitios para cumplir con el objetivo de producir electricidad vía el proceso fotovoltaico. Tanto a los resultados como a Sonora en su totalidad, se le aplicaron ecuaciones especificas (Obukhov *et al.*, 2017; Ropp *et al.*, 1997; Faiman, 2008; Huld y Gracia Amillo, 2015) usando algebra de mapas para estimar la electricidad que es posible generar usando panales solares.

Se encontró que 35.85% del territorio puede ser usado para generar esta energía y con solo 0.58% de este territorio, equivalente a 1081 km^2, se podría abastecer el consumo total de electricidad mexicano del año 2020 (Expansión, s.f.). De esa forma, la energía fotovoltaica en el país es un recurso fundamental y con alta factibilidad para lograr la transición energética.

Palabras clave: criterios des exclusión, criterios de selección, proceso analítico jerárquico, transición energética, consumo total de electricidad.

Abstract. There is international agreement that photovoltaic energy (PE) is a pillar of the energy transition required to mitigate the effects of global warming. The general objective of this article is to make a first geospatial approximation to estimate the proportion of territory and the amount of electricity feasible to be generated by the photovoltaic process in the state of Sonora.

In order to achieve this objective, it is first necessary to determine the most appropriate method for identifying these sites. In the literature, it has been found that the Analytical Hierarchical Process (AHP) is one of the most used methods for the selection of sites for the production of different types of solar energy, mainly photovoltaic (Suprova *et al.*, 2020; Malemnganbi and Shimray, 2020; Al Garni and Awasthi, 2017; Solangi *et al.*, 2019).

Where the mixture of GIS and AHP is one of the most appropriate submethods to identify these sites and apply specific conditions to them (Chandio *et al.*, 2012), in this particular case through the application of equations using map algebra to estimate the theoretical electricity production for the entire federal entity with the photovoltaic process. Since Geographic Information Systems (GIS)-AHP allow the spatialization of specific objectives.

Therefore, the first task is to spatialize the deterministic variables of the photovoltaic process, as well as the locations where it is not possible to produce this energy. In this case, the meteorological variables were obtained thanks to the data of the CESAVE-SIAFESON weather stations (2020). Due to data availability and consistency issues, a total of 97 stations were used. The stations consist of a number of different climatological gauges. Since these data are geographically punctual, it was necessary to use spatial interpolation techniques to make them continuous.

The rest of the selection criteria are obtained from various sources of information. In the case of terrain elevations from the Mexican Continuum of Elevations of INEGI (n.d.), the slope and orientation of the terrain were estimated with the elevation data using the geodetic technique of its respective method in the Arcmap software. The roads were taken from the national road network obtained from INEGI (2020), the corresponding urban and rural areas from INEGI (2016), and the power lines from CENACE (2016). The proximity method used for these three variables was the path-distance method of the Arcmap software.

Exclusion criteria were power transmission lines (CENACE, 2016), World Heritage Sites (CONANP, 2021a), protected natural areas (CONANP, 2021), native vegetation and habitats (INEGI, 2017), water bodies (INEGI, 2009), urban and rural spots (INEGI, 2016), social property found in the Sonora cadastral map (INEGI, 2016a), road network (INEGI, 2020c), places with slopes greater than 10 degrees (INEGI, n. f.), and tourist, religious, airport, and other sites (INEGI, 2020c).

Thus, we had both the deterministic variables and the locations unsuitable for the installation of solar plants. To identify the relative importance of the deterministic variables, similar studies were used, such as Sanchez-Lozano *et al.* (2013), Chen *et al.* (2014), Noorollahi *et al.* (2016), Zoghi *et al.* (2017), Doljak and Stanojević (2017), Al Garni and Awasthi (2017) and Doorga *et al.* (2018).

In light of this, the AHP method was applied to the spatial data in order to generate the ranking of sites to achieve the goal of producing electricity through the photovoltaic process. A specific equation using map algebra (Obukhov *et al.*, 2017; Ropp *et al.*, 1997; Faiman, 2008; Huld and Gracia Amillo, 2015) was applied to both the results and the whole of Sonora to estimate the electricity that could be generated using solar panels.

It was found that 35.85% of the territory could be used to generate this energy, and that only 0.58% of this territory, corresponding to 1,081 km², could supply all of Mexico's electricity consumption in 2020 (Expansión, n.d.). Thus, photovoltaic energy in the country is a fundamental resource with high feasibility to achieve the energy transition.

Keywords: exclusion criteria, selection criteria, hierarchical analytical process, energy transition, total electricity consumption.

REVISIÓN DE LA LITERATURA ACTUAL

Existe una gran variedad de métodos usados para identificar sitios con mejores condiciones para la generación de energía solar en distintos lugares del mundo. Por ejemplo, autores como Al Garni y Awasthi (2018), Suprova *et al.* (2020) y Malemnganbi y Shimray (2020), recopilan artículos

que tienen este objetivo para diferentes formas de aprovechamiento de la radiación solar. Los autores encuentran que el proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), solo o integrado a otro método, es la forma más utilizada de los métodos de análisis de decisión multicriterio (MADM).

Algunas de las ventajas del AHP, es que puede tratar con problemas complejos (Elkarmi y Mustafa, 1993), permite evaluar alternativas para cumplir con un objetivo definido (Ozdemir y Sahin, 2018), y es una metodología sencilla en su aplicación e interpretación, pero con fundamentos robustos (Khemiri *et al.*, 2018) que se sustentan en la experiencia de expertos para determinar la importancia relativa de los factores que afectan el objetivo (Vaidya y Kumar, 2006).

A su vez, el AHP se puede usar junto con distintos métodos para obtener resultados más confiables y robustos (Koc *et al.*, 2019), como es el caso de los sistemas de información geográfica (GIS por sus siglas en inglés), que complementan a los AHP al manejar y procesar los datos de entrada, así como visualizar los resultados (Taibi y Atmani, 2017). Los GIS-AHP son una herramienta eficiente para evaluar la factibilidad de las características de un lugar para cumplir con un objetivo específico, especialmente en el aspecto costo-eficiencia (Chandio *et al.*, 2012).

De esta forma, las aplicaciones de GIS-AHP para analizar y buscar cumplir con objetivos espaciales específicos ha aumentado (Al Garni y Awasthi, 2018; Chandio *et al.*, 2012), sin embargo, existen relativamente pocas investigaciones que usan un GIS-AHP para la selección de sitios con mejores condiciones para la generación de electricidad con base en el proceso fotovoltaico (Colak *et al.*, 2019).

Cabe mencionar que los diferentes autores mencionados previamente (Solangi *et al.*, 2019; Al Garni y Awasthi, 2017; Malemnganbi y Shimray, 2020; Suprova *et al.*, 2020; Al Garni y Awasthi, 2018), solo en unos pocos casos mencionan que se trata de un GIS en conjunto con el AHP (GIS-AHP) y ninguno de los que presentan los lugares geográficos, contemplan a Sonora o México para el cumplir con este objetivo.

Existen pocos estudios que abordan la estimación de electricidad usando EF. Huld y Gracia Amillo (2015) estudian el papel de diferentes variables para la estimación de electricidad usando tecnología fotovoltaica en regiones geográficas grandes. Los autores encuentran que existe un fuerte efecto en la eficiencia de las celdas solares con relación a la radiación solar, temperatura y, en menor grado, la velocidad del viento en el sitio.

Por su parte, Ropp *et al.* (1997) plantean una ecuación para la estimación de la eficiencia solar con relación a la temperatura de las celdas solares durante su operación. Chung (2020) realiza estimaciones de electricidad complementando dicha ecuación con otra para estimar la temperatura de la celda y encuentra que la modelación se acerca a los valores reales tanto con radiación medida como estimada. Ayvazoğluyüksel y Filik (2018) comparan el método anterior con otros, también complementado con ecuaciones para la estimación de la temperatura de la celda considerando tanto la temperatura ambiente como la velocidad del viento, y encuentran poca diferencia entre los diversos instrumentos empleados.

En cuanto a la literatura de las plantas fotovoltaicas en Sonora, la revisión arrojó que existe una importante carencia en el desarrollo de este tema, sin embargo, se lograron identificar algunas referencias. Una es Engie (2018), donde se menciona que la radiación promedio del sitio y la cercanía a la red eléctrica nacional son factores relevantes para la selección del sitio. De forma similar, los informes de dos plantas fotovoltaicas para obtener financiamiento del Banco de Desarrollo de América del Norte –BDAN– (BDAN, 2017, 2017a), hacen alusión a la importancia de la alta radiación incidente en el sitio como factor de selección.

INTRODUCCIÓN

La transición energética consiste en transitar al uso de energías renovables para disminuir la participación de las energías tradicionales. A diferencia de las primeras, las energías tradicionales son fuentes finitas con mayor grado de daño al medio ambiente y la humanidad por la aceleración que producen en la generación de gases de efecto invernadero, incrementando con ello el calentamiento global

del planeta (Barasa y Olanrewaju, 2022; Kyriakopoulos *et al.*, 2022; IPCC, 2021).

En este escenario, las renovables son el recurso necesario para sustentar una civilización con crecientes necesidades energéticas, que también requiere mantener un equilibrio con el mundo en el que vive (IRENA, 2018; IPCC, 2012). Según IRENA (2019), la energía fotovoltaica será la fuente renovable más relevante en las próximas décadas, si se quiere llegar a un escenario positivo en cuanto a la mitigación del cambio climático. En su caso, México tiene una locación geográfica privilegiada en términos de esta energía, ya que cuenta con algunas de las zonas con mayor radiación solar en el mundo, en promedio cada día recibe 5.5 kWh/m^2, llegando a 6.12 kWh/m^2 en el verano (ProMéxico, 2017; Limón, 2017; IRENA, 2015; GIZ, 2018).

Aunque no se ha probado, se estima que el país tiene la posibilidad de producir hasta 6 500 000 GWh al año (INERE en GIZ, 2018). Para ponerlo en perspectiva, en el año 2020 el país consumió 267,340 GWh de electricidad (*Expansión*, s.f.), por lo que la capacidad de generación de electricidad fotovoltaica mexicana es más de 24 veces su consumo total eléctrico. Sin embargo, la electricidad producida con el proceso fotovoltaico sigue siendo marginal en el país, debido su poca explotación comercial a gran escala (ProMéxico, 2017; IRENA, 2015). En 2016 el uso de radiación solar para generar electricidad representó solo el 0.5% del total energético producido en nuestro país (ProMéxico, s.f.).

Cabe mencionar en especial que Sonora y Baja California Sur tienen una radiación solar incidente promedio de 6.2 kWh/m^2 diarios (González García, 2019). Tan solo en Sonora se estima que el 0.29% de su territorio es suficiente para abastecer toda la demanda eléctrica que existía en el país en 2017 (González García, 2019). Aunque este cálculo se hizo sin considerar características espaciales, que afectan la eficiencia de las celdas, por lo que los cálculos pueden tener sobreestimaciones (González García, 2019).

Esta investigación analiza el potencial de energía fotovoltaica en Sonora, México, por varias razones. La primera de ellas es que, de acuerdo con diversos autores, Sonora tiene uno de los potenciales fotovoltaicos más elevados del mundo (Taddei *et al.*, 2014; Universidad de Sonora, s.f.; Arancibia-Bulnes *et al.*, 2014), lo que representa un área de oportunidad para México, si se desarrolla energía que aproveche la radiación solar. Otra de los motivos es que han existido una serie de proyectos públicos que buscaban, junto con la iniciativa privada, poner a esta entidad federativa en la frontera de la generación de esta energía en el país, lo cual habla del interés de diversos actores para desarrollarla (Comité de Energía de la Comisión Sonora-Arizona, 2017; COEES, 2018; CENACE, 2016). Por último, no existen datos meteorológicos libres a nivel nacional, pero gracias a las Redes Meteorológicas Automáticas de Sonora, las cuales son parte del Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Sonora-Sistema de Alerta Fitosanitaria del Estado de Sonora (CESAVE-SIAFESON, 2020), se tienen datos meteorológicos que permiten identificar las zonas con mejores condiciones para la generación de energía fotovoltaica.

El objetivo general de esta investigación es evaluar la cantidad de energía fotovoltaica potencial que se puede generar en Sonora. Por su parte, los objetivos específicos son:

- Identificar las zonas con mejores condiciones para la generación de EF, con base en variables geoespaciales que determinan la capacidad de producción de esta energía.
- Estimar la cantidad de electricidad que se puede producir en estas zonas.

La metodología propuesta para identificar los sitios con mejores condiciones para la producción de electricidad vía el proceso fotovoltaico propone primero aplicar el GIS-AHP, que contempla lugares donde no es posible instalar plantas fotovoltaicas y las variables espaciales que afectan la generación de esta energía. Posteriormente, se aplican ecuaciones simples que usan la radiación solar incidente y otras variables que afectan la tecnología fotovoltaica para estimar qué tanta electricidad fotovoltaica se puede producir en estos sitios.

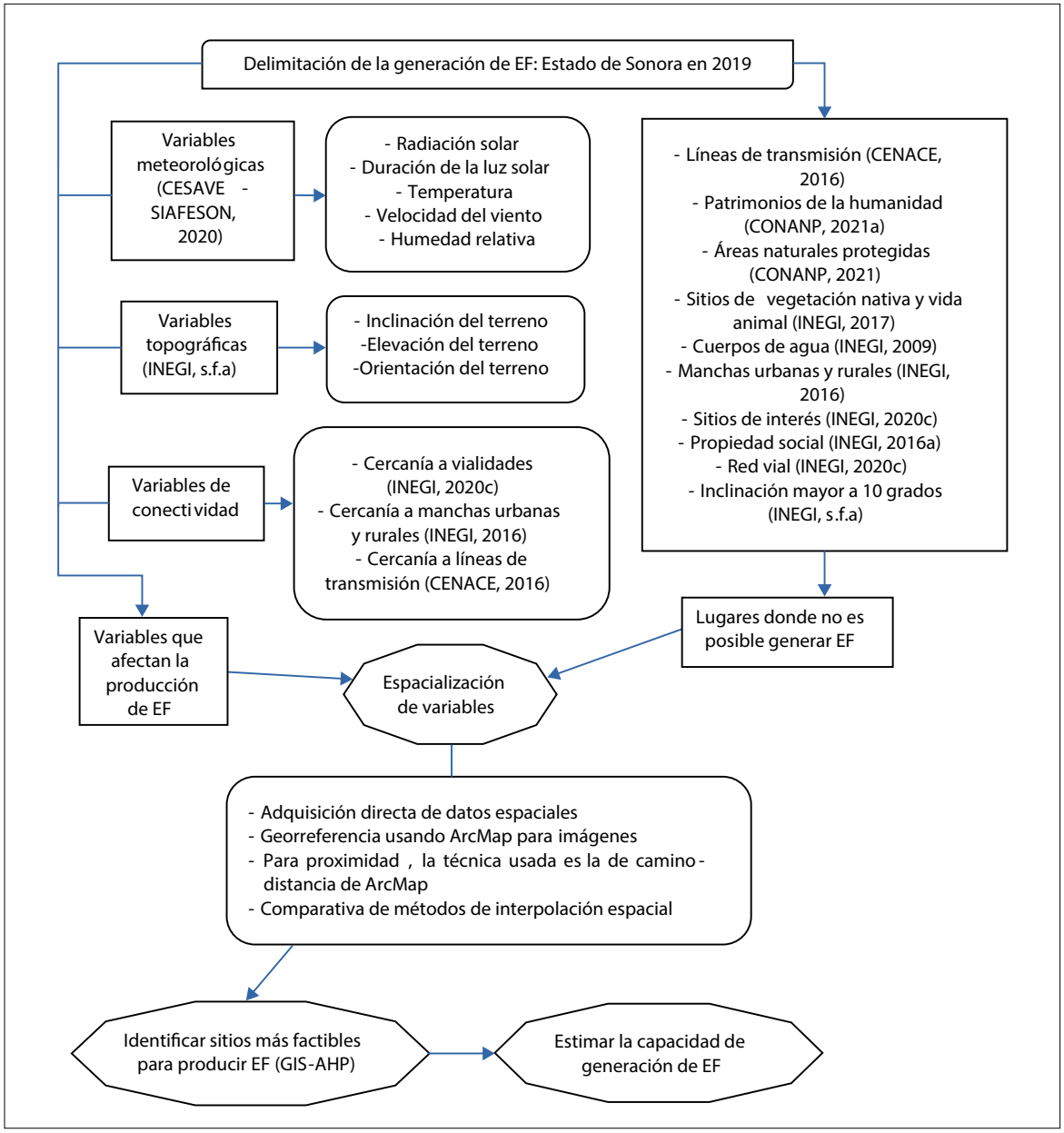
En general, los resultados del trabajo son que 35.85% del espacio en Sonora es apto para producir electricidad vía el proceso fotovoltaico. Y sería

suficiente el 0.58% de este territorio, equivalente a 1081 km^2, para satisfacer el consumo total de electricidad mexicano del año 2020 (*Expansión*, s.f.).

METODOLOGÍA

La Figura 1 resume el diseño metodológico de la investigación, mostrando las diferentes variables que se emplearon en este trabajo, las fuentes de donde se obtuvieron los datos, los principales procedimientos analíticos seguidos, así como las delimitaciones espaciales del estudio.

En una primera instancia cabe mencionar que los datos meteorológicos, como radiación solar, duración de la luz solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, se obtienen gracias a las Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas



Nota: los cuadrados significan insumos, los cuadrados sin esquinas son explicaciones para mayor detalle y los decágonos son resultados.

Figura 1. Mapa de insumos-procesos-resultados de la metodología de investigación. Fuente: elaboración propia.

de Sonora (REMAS), que son parte del CESAVE-SIAFESON (2020). Estos datos corresponden al periodo del 1º de enero 31 de diciembre de 2019. Se cuenta con 97 puntos de medición, de las cuales se emplearon el 80%, equivalente a 78 estaciones, para aplicar los métodos de interpolación espacial y 20% para probar qué tan buena es la estimación.

Los métodos de interpolación espacial usados son la distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés), el kriging ordinario, el kriging simple, la regresión kriging y un método propuesto en esta investigación, denominado Regresión basado en Distancia Inversa Ponderada (IDW), que es un método propuesto en este trabajo, en el cual se aplica una regresión con una variable espacial explicativa aplicándose con algebra de mapas. Paso siguiente, se emplea el método IDW sobre el error de la regresión en su forma de datos espaciales y, por último, se suma la parte determinística de la regresión con el error estimado.

Las métricas de error que se usan para comparar la precisión de la estimación de los métodos de interpolación espacial son:

- El error cuadrático promedio (ECP):

$$ECP = \frac{1}{N}\sum_{n}^{N}(y_n - f_n)^2$$

- El error absoluto promedio (EAP):

$$EAP = \frac{1}{N}\sum_{n}^{N} y_n - f_n \vee$$

- Y la bondad de ajuste (R^2) tomada de la regresión sin constante relacionando con la radiación solar observada y la estimada por la interpolación espacial. No se utilizó constante debido a que se encontró que solo así había correlación entre las variables.

En las ecuaciones anteriores N es el total de observaciones, y_n es el registro real de radiación solar en la estación de prueba y f_n es el valor de la interpolación espacial en el mismo lugar.

El resto de los criterios de selección se obtienen de diferentes fuentes de información. En el caso de la elevación del terreno del Continuo de Elevaciones Mexicano de INEGI (s.f.), la inclinación y la orientación del terreno se estimaron con los datos de elevación con la técnica geodésica de su método respectivo en el software Arcmap. Las vialidades se tomaron de la Red Nacional de Caminos obtenida de INEGI (2020), las manchas urbanas y rurales respectivas de INEGI (2016) y las líneas de transmisión eléctrica de CENACE (2016). El método de proximidad empleado para estas tres variables fue el de camino-distancia del software Arcmap.

DATOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los datos meteorológicos se obtienen gracias a CESAVE-SIAFESON (2020). SIAFESON es un proyecto que tiene como objetivo proporcionarles a los productores agrícolas las herramientas para estar preparados contra posibles eventualidades que tengan una causa meteorológica, como heladas, plagas, entre otros (SIAFESON, s.f.).

En el pasado, Sonora contaba con la red Agroson, que era la fuente de datos meteorológicos más importante de la entidad, no obstante, un diagnóstico efectuado en 2011 reveló que se encontraba en condiciones inadecuadas para garantizar su funcionamiento, por lo que SAGARHPA encargó su cuidado y mantenimiento al CESAVE, que contaba con personal e infraestructura para mantener la red a partir de octubre de 2014, renombrada REMAS, y a la cual se le han agregado estaciones con el paso del tiempo (CESAVE-SIAFESON, s.f.a).

De esta forma, la REMAS tiene el propósito de generar, procesar, almacenar e informar sobre datos meteorológicos (CESAVE-SIAFESON, 2020). Para ello se cuenta con más de 100 estaciones meteorológicas repartidas a lo largo de la entidad (CESAVE-SIAFESON, 2020).

Cada estación meteorológica consiste en un sensor de viento, un sensor de radiación solar (LP02), un panel solar para dar energía a la estación, una unidad de transmisión remota, un sensor de temperatura y humedad (TR1), un barómetro (BP1), un pluviómetro y un sensor de suelo (CESAVE-SIAFESON, 2017). M´ss detalles de la estación se pueden apreciar en la Figura 2.

Veleta y cazoletas (sensor de viento): la veleta registra la dirección del viento y las cazoletas miden la velocidad. Rango de medición: velocidad hasta 75 m/s y dirección de 0 a 360º.

Sensor de radiación solar (LP02): Mide radiación solar. Rango de medición de 0 a 2000 wm^{-2}.

Panel solar: Es la fuente de energía de la estación. Voltaje en punto máximo 9.4 v.

Unidad de transmisión remota (UTR): Recibe y envía la información captada por los sensores.

Sensor de temperatura y humedad relativa (TR1): Mide temperatura y humedad relativa del aire. Rango de medición: temperatura de -40º C a 60º C y humedad de 0 a 100 %.

Barómetro (BP1): Mide presión barométrica. Rango de medición de 500 mbar a 1500 mbar.

Pluviómetro: Mide precipitación en mm. Rango de medición Max. 6mm/min.

Sensor de suelo (Hydraprobe): Mide humedad, temperatura y conductividad del suelo. Rango de medición: rango de humedad completo de seco a húmedo, temperatura de -10º (-30) a +55º C y conductividad de 0.01 a 1.5 S/m.

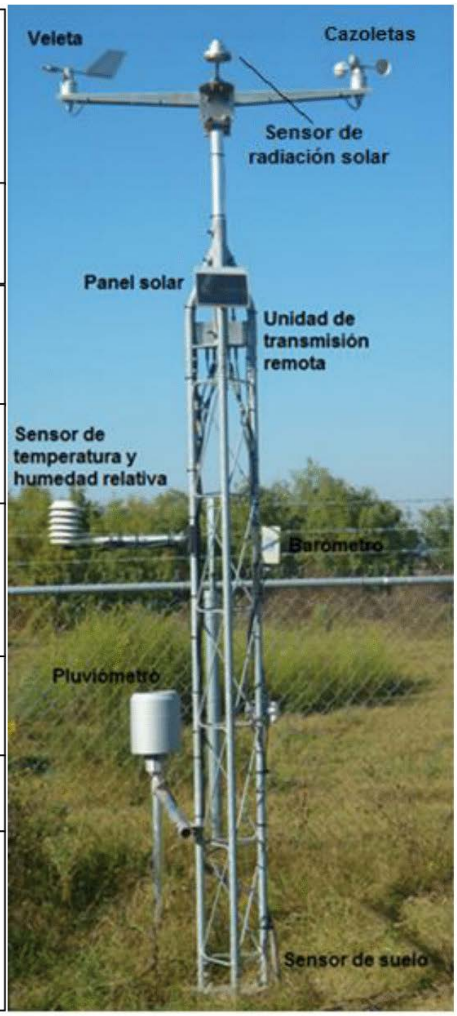


Figura 2. Estación meteorológica de REMAS. Fuente: CESAVE-SIAFESON (2017: 3).

El sensor LP02 es de clase C (segunda clase), espectralmente plano, que se alinea al ISO 9060:2018 y monitorea el espectro solar completo (Campbell Scientific, s.f). Cuenta con una termopila que permite su uso en condiciones desfavorables, como días nublados, con rayos reflejados, bajo sombra, entre otros (Campbell Scientific, s.f).

En CESAVE-SIAFESON (s.f.) se presentan diversos documentos para la correcta limpieza de los elementos que conforman la estación meteorológica, cambio de baterías, conexiones de la unidad de transmisión remota (necesaria para enviar la información captada), entre otros. De acuerdo con CESAVE-SIAFESON (s.f.a), las estaciones se visitan cada 15 días, para revisar su condición, así como realizar procedimientos de limpieza y mantenimiento. El cambio de los sensores se realiza cada cuatro años, siguiendo especificaciones del productor.

Sobre los datos de CESAVE-SIAFESON (2020), el comportamiento de la radiación solar es diferente a la mayoría de los demás fenómenos meteorológicos, ya que solo se tienen valores las horas del día con sol visible, es decir, la radiación solar es prácticamente nula durante la noche. Se probaron distintos valores mínimos de radiación solar para observar el comportamiento de la radiación solar, horas de luz solar y la generación vatios/m^2 y vatios-hora/m^2. Los resultados se presentan en la Tabla 1. Las 97 estaciones empleadas para este trabajo, separadas en estaciones para realizar interpolación espacial y para probar métodos, se observan en la Figura 3.

Tabla 1. Radiación solar, horas de luz y generación de electricidad en las estaciones meteorológicas con diferentes valores límites de radiación solar medida.

	1 watt	15 watt	50 watt	100 watt	200 watt	300 watt	400 watt	500 watt	600 watt	700 watt
Radiación solar (vatios/m^2)	434.75	470.79	501.02	531.97	584.42	631.64	680.78	725.20	776.92	836.24
Horas de luz (horas)	12.73	11.70	10.88	10.09	8.84	7.76	6.66	5.64	4.46	3.31
Generación (Vatios/m^2)	60.58	65.21	69.04	72.94	79.44	85.19	91.08	96.27	102.19	108.57
Generación por día (Vatios-hora/m2)	772.55	764.20	752.58	737.56	703.86	663.62	609.16	545.82	458.62	361.85

Fuente: elaboración propia con base en datos de CESAVE-SIAFESON (2020).

Una primera aclaración es que las horas de luz solar no son una variable medida por las estaciones de CESAVE-SIAFESON (2020), pero es posible inferir la variable al contar las horas en las que se tiene una radiación solar mayor a un cierto límite para cada estación.

De la Tabla 1 se aprecia que, conforme aumenta el valor límite de radiación solar, mayor es la radiación solar promedio diaria, así como la generación de electricidad vía el proceso fotovoltaico en vatios/m^2, sin embargo, las horas luz y la generación por día en vatios-hora/m^2 disminuye. Lo anterior tiene lugar debido a que, conforme mayor es el límite, mayor es el promedio de radiación solar, pero disminuyen las horas diarias de luz a esos valores.

Para esta investigación se eligió el valor límite de 100 vatios, debido a que ofrece un valor más representativo de la radiación solar promedio al día con respecto al valor promedio de radiación solar por hora, considerando que existen horas de radiación solar muy bajas, las primeras y últimas del día, así como horas con promedios de radiación solar muy altas en el mediodía. Por ello, se estableció un límite de radiación solar mínima para el cálculo del promedio, con el fin de eliminar las horas del día con niveles muy bajos de radiación solar.

Un ejemplo de estos problemas es que había estaciones con datos cercanos a 0 en horas con poco o nula luz solar, que, de incluirlo en los datos, haría que la estación tuviera horas de sol al día mayores a las que realmente tiene, por lo que la generación por día podría ser considerablemente más alta de la real.

Los promedios diarios de la temperatura, velocidad del viento y humedad relativa también corresponden solo a las horas en las cuales se tiene radiación solar mayor a 100 vatios. De forma que estas variables serán más representativas de la parte del día en las que estaría funcionando la tecnología fotovoltaica.

Para analizar la consistencia de los datos, primero se analizó el número de observaciones de cada estación. Solo cuatro estaciones obtuvieron menos de 3500 observaciones por hora, dos cerca de 3000 y dos de 3400, que se mantuvieron debido a que se encuentran en zonas con pocas estaciones y que el promedio de sus variables era similar al de las demás.

Criterios de exclusión

En la Figura 4 se presenta tanto el polígono que representa a Sonora como los lugares donde sería posible poner plantas fotovoltaicas, es decir, se quitan los sitios de exclusión del polígono del estado. El resultado es que, alrededor de

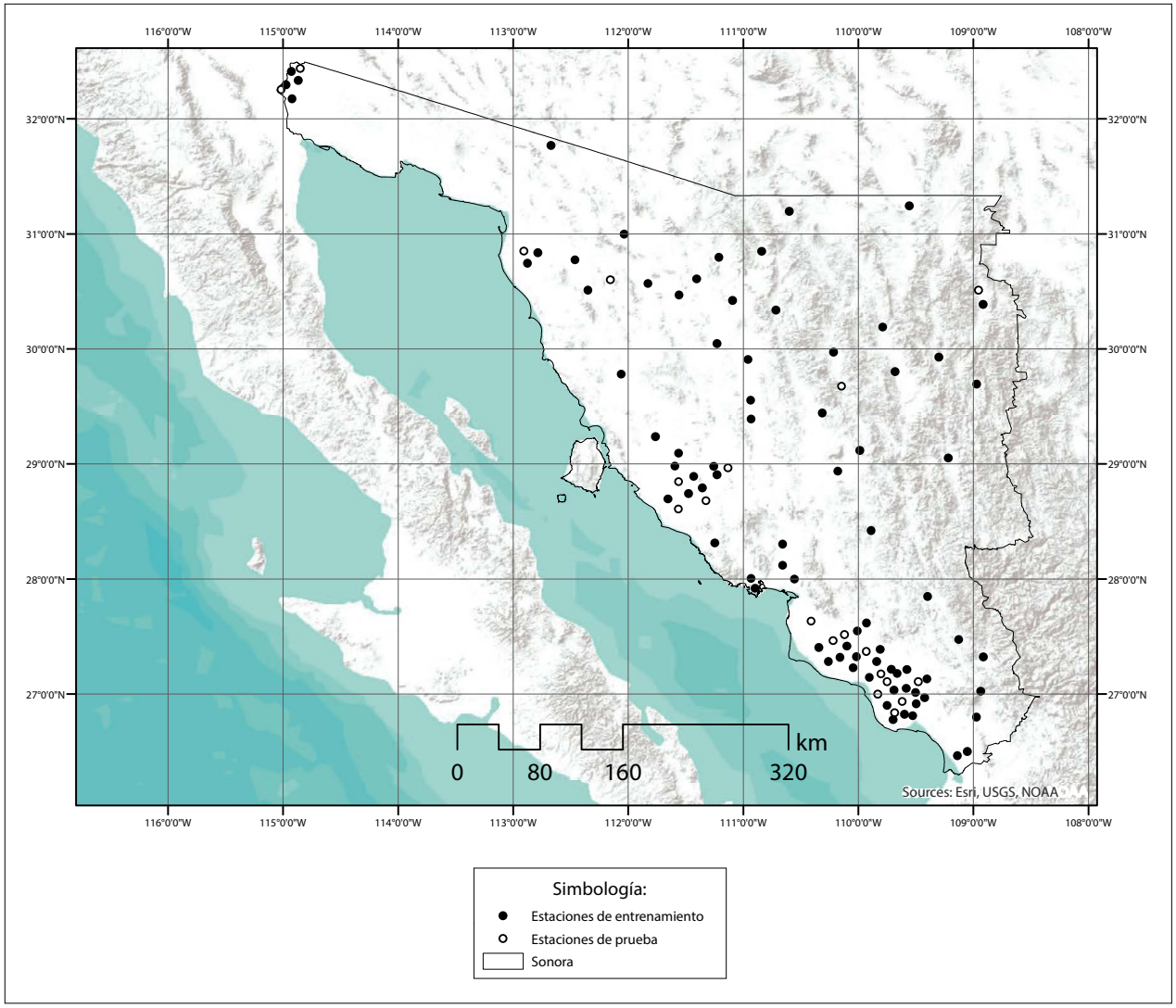


Figura 3. Estación meteorológica de REMAS. Fuente: elaboración propia con base en datos de CESAVE-SIAFESON (2020).

115 998 282 598.79 m^2 no son adecuados para instalar plantas solares. En total, Sonora cuenta con 180 840 617,117 m^2 y 35.85% del territorio esta fuera de los criterios de exclusión.

Los criterios de exclusión son las líneas de transmisión (CENACE, 2016), los patrimonios de la humanidad (CONANP, 2021a), las áreas naturales protegidas (CONANP, 2021), los sitios de vegetación nativa y vida (INEGI, 2017), los cuerpos de agua (INEGI, 2009), las manchas urbanas y rurales (INEGI, 2016), la propiedad social que se encuentra en la carta catastral de Sonora (INEGI, 2016a), La red vial (INEGI, 2020c), lugares con una inclinación mayor a 10 grados (INEGI, s.f.), y los sitios turísticos, religiosos, aeropuertos y otros (INEGI, 2020c).

Identificación de los sitios óptimos

La estimación de la cantidad de electricidad generada a través del proceso fotovoltaico se realizó en dos etapas. Primero se identificaron las zonas óptimas para la instalación de plantas/celdas solares y, en una segunda fase, se estimó de la cantidad de electricidad potencialmente puede ser producida con celdas fotovoltaicas. Para la identificación de las zonas óptimas de instalación de plantas/celdas

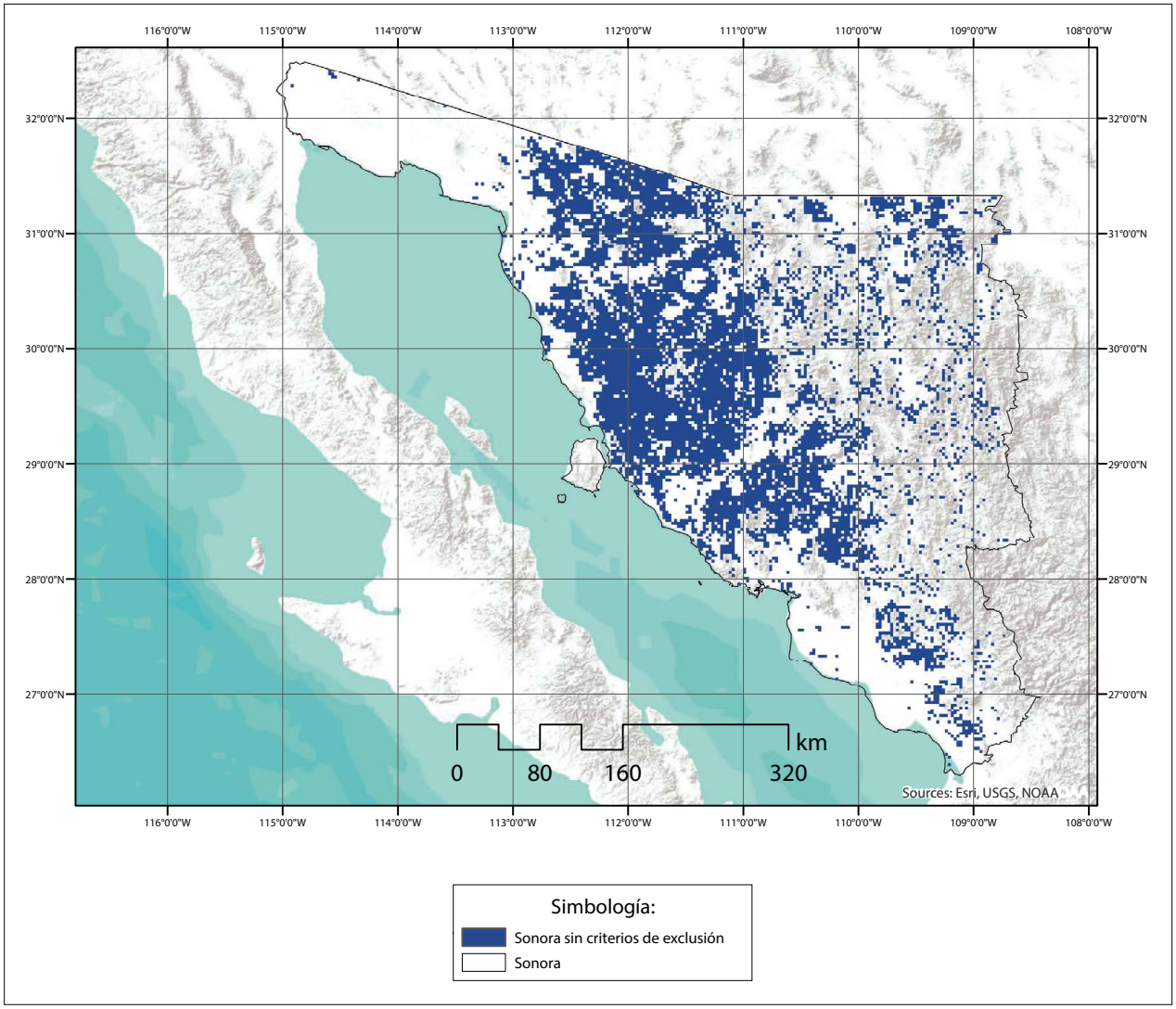


Figura 4. Sonora sin sitios de exclusión. Fuente: elaboración propia con datos de CONANP (2021, 2021a), CENACE (2016) e INEGI (2009, 2016, 2016a, 2017, 2020, s.f.).

solares, se determinaron los criterios de selección de factores que influyen en el funcionamiento de la tecnología fotovoltaica. Estos dependen principalmente de tres categorías de análisis: climatología, topografía y proximidad (Doorga *et al.*, 2018).

Una vez seleccionados los criterios, se llevó a cabo el Proceso Analítico Jerárquico para la ponderación de los factores geolocalizados que afectan la generación de energía fotovoltaica, después de excluir los lugares donde no es posible instalar esta tecnología (Alami *et al.*, 2018; Doorga *et al.*, 2018).

El funcionamiento del AHP-GIS se sustenta en la estimación de ponderaciones prioritarias de una serie de criterios en una matriz cuadrada de comparación de pares múltiples; dicha matriz es positiva y, si los pares de comparación son totalmente consistentes, es recíproca (Amini y Amin, 2016). Los elementos de decisión se comparan en pares en términos de su importancia relativa, que se determina en una escala de nueve puntos, llamada "Escala Fundamental de Saaty" (Bottero *et al.*, 2011). La definición e implicación de la escala de intensidad de nueve puntos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Definición e implicación de la escala de intensidad de nueve puntos.

Intensidad del peso relativo	Definición	Implicación
1	De igual importancia	Dos criterios contribuyen igualmente a los objetivos
3	Moderada importancia	Un criterio contribuye ligeramente más que otro
5	Importancia fuerte	Un criterio contribuye significativamente más que otro
7	Importancia muy fuerte	Un criterio contribuye muy significativamente más que otro
9	Importancia extrema	Un criterio contribuye extremamente más que otro
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Se emplean para representar compromiso entre las prioridades enlistadas arriba

Nota: propiedad de reciprocidad, si un criterio i tiene asignado un número no cero en comparación con j, entonces j tiene un valor recíproco al compararse con i (Doorga *et al.*, 2018; Amini y Amin, 2016).

Fuente: elaboración propia con base en Doorga *et al.* (2018).

Una vez que se dieron valores a las matrices de comparación, los pesos relativos de los elementos de cada criterio de selección con respecto a un elemento adyacente del próximo criterio se designan como componentes del eigenvector asociado al eigenvalor más grande de la matriz de comparación (Bottero *et al.*, 2011). Las inconsistencias salientes del método de eigenvector se determinan por el Índice de Consistencia (CI, por sus siglas en inglés) como (Doorga *et al.*, 2018):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Donde λ_{max} es el máximo eigenvalor y n es el número de columnas o renglones en la matriz de selección o ponderación. Además, del método de eigenvector se desprende una medida natural de consistencia, denominada Ratio de Consistencia (CR por sus siglas en inglés) y se expresa como (Bottero *et al.*, 2011):

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

RI es el Índice Aleatorio (RI, por sus siglas en inglés) del índice de consistencia, en escala de nueve puntos, generado aleatoriamente por una matriz recíproca (Amini y Amin, 2016), es decir, se generan matrices aleatorias con los números $\frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \ldots, 1, \ldots, 8, 9$, y se obtiene el índice de la matriz (Teknomo, 2006). Por lo general, el proceso se repite al menos 500 veces para obtener un RI confiable (Teknomo, 2006).

Según Amini y Amin (2016), el CR donde RI es función del tamaño de la matriz y CR es menor a 0.1 o 10% es el límite aceptable, en caso de no cumplirse se debe revisar y ajustar la metodología.

Una vez aplicado el proceso analítico, se obtienen los valores de ponderación de los criterios de selección, los cuales representan la importancia relativa de esos criterios.

Cabe mencionar que, dentro de esta metodología, se considera que los expertos o tomadores de decisiones lleven a cabo la asignación de los pesos relativos con base en el contexto del lugar y fenómeno de estudio, porque en realidad no existe un protocolo general para aplicar estas herramientas (Doorga *et al.*, 2018).

Por último, para la identificación de sitios más factibles para producir EF, se emplea el método de Ponderación de Combinaciones lineales (WLC, por sus siglas en inglés), que se usa para combinar las capas ráster resultantes del proceso de jerarquización y reclasificación de los criterios de evaluación usando el entorno GIS (Doorga *et al.*, 2018).

La superposición ponderada es un análisis combinatorio relativamente simple en el que se asignan pesos a los factores causales en su relación con el objeto de estudio (Pardeshi *et al.*, 2013). Para determinar la significancia estadística y el valor

numérico del peso relativo de los aspectos causales se usa la función de discriminación bi-variada, que tiene la siguiente forma (Nagarajan *et al.*, 2000; Doorga *et al.*, 2018; Malczewski, 2000):

$$SA_i = w_1X_{i1} + w_2X_{i2} + w_3X_{i3} + \cdots + w_nX$$

Lo cual se puede expresar como:

$$SA_i = \sum_{j=1}^{n} w_jX_{ij}$$

Donde SA_i es el indicador de idoneidad para el i-ésima área, es decir, el indicador resultado de sumar los criterios de selección (en este caso, las variables espaciales interpoladas) multiplicados por su peso relativo; w_j es el peso relativo de criterio j; X_{ij} es el valor estandarizado del criterio de selección j en el área i, y n es el número total de criterios de evaluación (Malczewski en Doorga *et al.*, 2018; Malczewski, 2000).

Generación de energía eléctrica en los sitios óptimos

La cantidad de energía eléctrica por hora generada por m^2 en condiciones de sitio es principalmente estimada con una ecuación basada en Obukhov *et al.* (2017), multiplicada por el número de horas luz, que es:

$$W = S * n_1 * n_2 * H_{luz}$$

Donde W es la cantidad de energía eléctrica estimada (Wh/m^2), S es la intensidad promedio de radiación solar por unidad de área (W/m^2), n_1 es la eficiencia de las celdas (cantidad de luz solar que se convierte en electricidad sobre el total de luz solar incidente), H_{luz} es el número de horas de luz solar que se tienen en promedio al día y n_2 es la eficiencia de la conversión de energía (cantidad de electricidad que se transmite a la red eléctrica sobre el total de electricidad generado), que en se toma de 96% con referencia en Chung (2020). Esta ecuación tiene el supuesto de que hay celdas solares en toda área usable.

Para mejores estimaciones, se usa la ecuación de la eficiencia de las celdas solares de Ropp *et al.* (1997), también usada en investigaciones como Chung (2020) y Omran (2010), que tiene la forma siguiente:

$$n_1 = n_{stc} * \left(1 + K_T * (T_c - T_{STC})\right)$$

La eficiencia máxima de la celda a temperatura de prueba en condiciones estándares (n_{stc}) se toma como 15.34%, siguiendo a Chung (2020), el coeficiente termal de la celda solar (K_T) es de -0.0037°C^{-1} (Ropp *et al.* 1997, Omran, 2010), T_c es la temperatura de la celda solar y T_{STC} es la temperatura de prueba en condiciones estándar de la celda, que generalmente es de 25°C (Ropp *et al.*, 1997; Chung, 2020; Omran, 2010).

La ecuación de Faiman (2008) se usa para predecir la temperatura de la celda, que es:

$$T_c = T_{amb} + \frac{S}{U_o + U_1 * W_c}$$

Donde T_{amb} es la temperatura ambiente, W_c es la velocidad del viento en la celda, U_0 y U_1 son constantes de la ecuación. Aquí U_o se tomó de 25 y de 6.84 (PVPMC, 2018; pvlib Python. s.f.). La estimación de la velocidad del viento en la celda está dada como (Huld y Gracia Amillo, 2015):

$$W_c = \left(\frac{d_c}{d_{ane}}\right)^{0.2} * W_{ane}$$

Con d_c es la altura de la celda solar, W_{ane} y d_{ane} son la velocidad del viento y la altura del anemómetro. Para la altura de la celda se emplearon los valores de 0.2 y 0.5 m (PurePoint Energy, 2020). La altura de la medición de la velocidad del viento es de 3 m de acuerdo con CESAVE-SIAFESON (2020).

RESULTADOS

Antes de comenzar con la matriz de pesos relativos de los criterios de selección, fue necesario hacer una reclasificación de los valores de estas variables. Esta reclasificación es necesaria para aplicar el proceso de estandarización que permite sobreponer y comparar las capas en las que se representan los criterios

de selección. A su vez, la estandarización permite asignar la intensidad del peso relativo de cada variable de acuerdo con su relación con el proceso fotovoltaico (Doorga *et al.*, 2018). En este caso se siguió a Doorga *et al.* (2018) y se clasificaron las variables en un rango de 1 a 9. Esta reclasificación va progresivamente de menor a mayor idoneidad. Los rangos de clasificación se obtuvieron usando nueve clases de rupturas naturales (Jenks) en Arcmap, debido a que lo emplean estudios similares, como Wong *et al.* (2016), Magar *et al.* (2023) y Beriro *et al.* (2022), así como porque es mejor en un rango de 7-10 clases (1967).

En la Figura 5 se muestran los mapas de los diferentes criterios de selección, con excepción de la inclinación del terreno, que por sus características solo puede mapearse en los sitios con valores menores a los 10 grados. Cabe recordar que el análisis de la información vertida en los mapas se refiere a los sitios donde es posible establecer plantas fotovoltaicas.

En la Tabla 3, la columna sitios presenta los pesos relativos de los criterios de selección después de usar la escala de Saaty. Por su parte, la columna que se llama sitios con velocidad del viento agrupa a todos estos criterios, pero se agrega la velocidad del viento, como criterio de selección de los sitios más factibles.

En ambos casos, el ratio de consistencia fue muy cercano a 0, por lo que se considera dentro del límite aceptable en términos de consistencia y se pueden usar estos pesos relativos para identificar los sitios con características más factibles para producir electricidad vía el proceso fotovoltaico.

En la Figura 6 se ven los resultados de aplicar el AHP usando los criterios de ponderación. Una primera apreciación es que los valores y rangos de los dos casos son bastante similares, aunque existen pequeñas diferencias en términos de los sitios que se adjudican a cada intervalo. La idoneidad va de menor valor (idoneidad más baja) a mayor valor (idoneidad más alta).

Un ejemplo es en el oeste de Sonora, donde algunos sitios que estarían en el cuarto intervalo de idoneidad de no considerarse la velocidad del viento pasan a estar en el quinto lugar. Esto se puede apreciar principalmente en el norcentro y centro de Sonora, que corresponde a sitios con un bajo promedio de la velocidad del viento. En el primer caso aumenta el intervalo menor y en el segundo disminuye el mayor.

De esta forma, es posible inferir que la inclusión de la velocidad del viento como criterio de selección de sitios con mejores condiciones para generar energía fotovoltaica, principalmente afecta los lugares donde esta variable tiene valores bajos.

Los resultados de la generación de electricidad por m^2 se presentan en la Figura 7, tanto para el total de la superficie de la entidad federativa. Teniendo en las zonas de exclusión, una diferencia notable es el área que cubren los mapas, en el caso de Sonora en su totalidad se cuenta con 27 107 pixeles, cada pixel mide alrededor de 6771.07 km^2, por lo que el área cubierta seria alrededor de 183 543 km^2 en el espacio del mapa. Por su parte, los sitios no excluidos cuentan con 5325 pixeles, lo que corresponden a 36 055 km^2. Los sitios, entonces, representan 19.64% del total de la superficie de Sonora.

Otra distinción importante es el intervalo de la capacidad de generación entre los mapas, mientras el intervalo del total de la superficie del estado va de alrededor de 580 a poco más de 832 vatios-hora/m^2 por hora, lo sitios con mayor idoneidad están entre 597 y 821 vatios-hora/m^2 por hora. Estos valores son coherentes con la eficiencia promedio de los paneles solares según diferentes fuentes, como Lane (2021), Howell (2021), Stenhouse (2021) y Svarc (2022).

También es posible estimar la cantidad de Vatios por hora que se pueden generar en todo el territorio al multiplicar la generación de electricidad promedio diaria por m^2 por el área de la celda. De esta forma, en los sitios con mayor idoneidad se puede generar un total de 260 860 GWH en promedio por día (suponiendo que toda el área tiene celdas solares). En 2020 México consumió 267 340 GWh (Expansión, s.f.), por lo que, de instalarse plantas solares en todos los sitios, tomaría alrededor de 11 días para cubrir el consumo anual de electricidad mexicano o, usando alrededor del 3% de los sitios o 0.58% de Sonora, equivalente a 1081 km^2, para abastecer el consumo eléctrico total del país en un año.

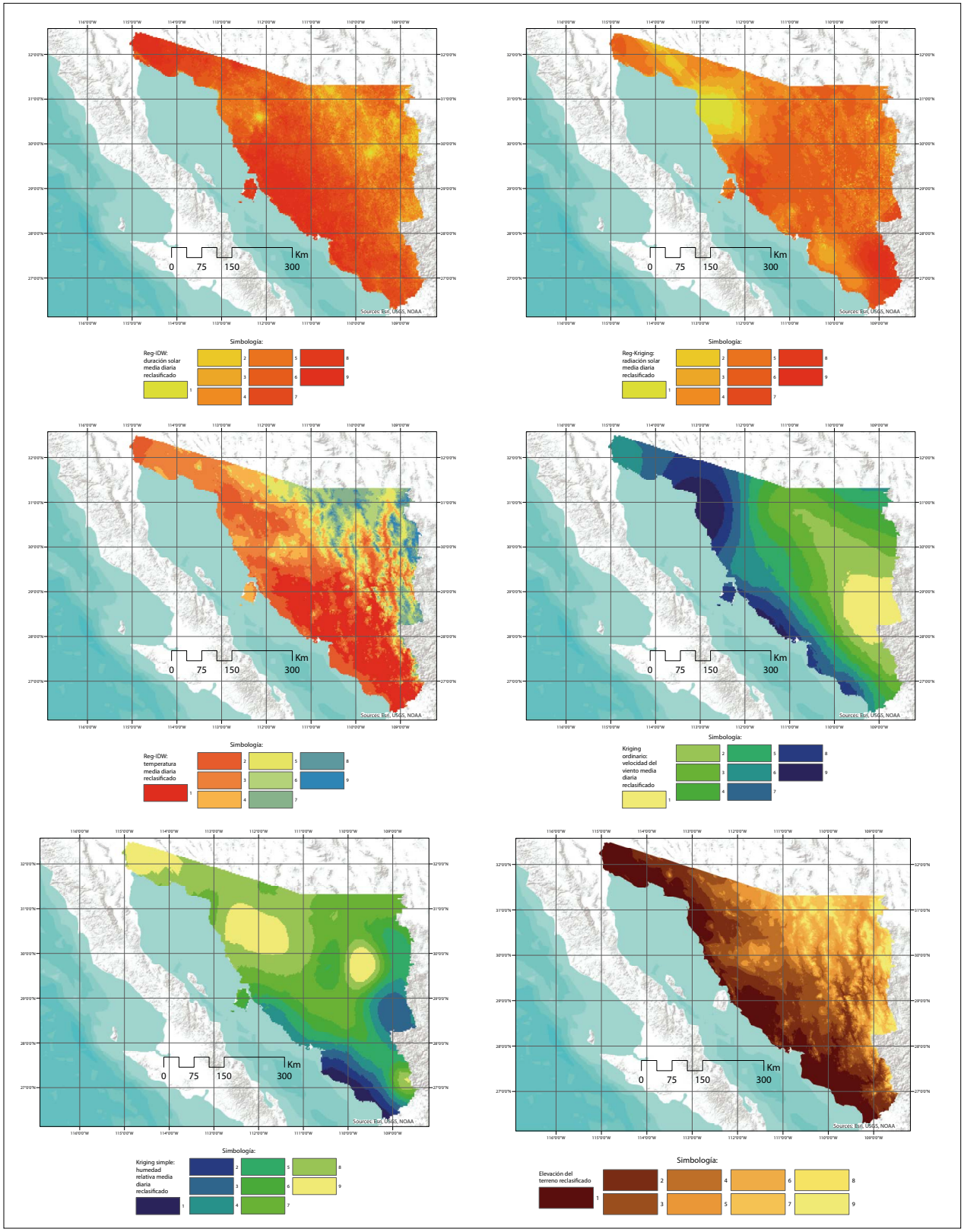


Figura 5. Criterios de selección reclasificados (parte 1). Fuente: elaboración propia con datos de CESAVE-SIAFESON (2020), CENACE (2016), INEGI (2016, 2020 y s.f), The European Space Agency (s.f.), Solargis (2017) y USGS (s.f.)

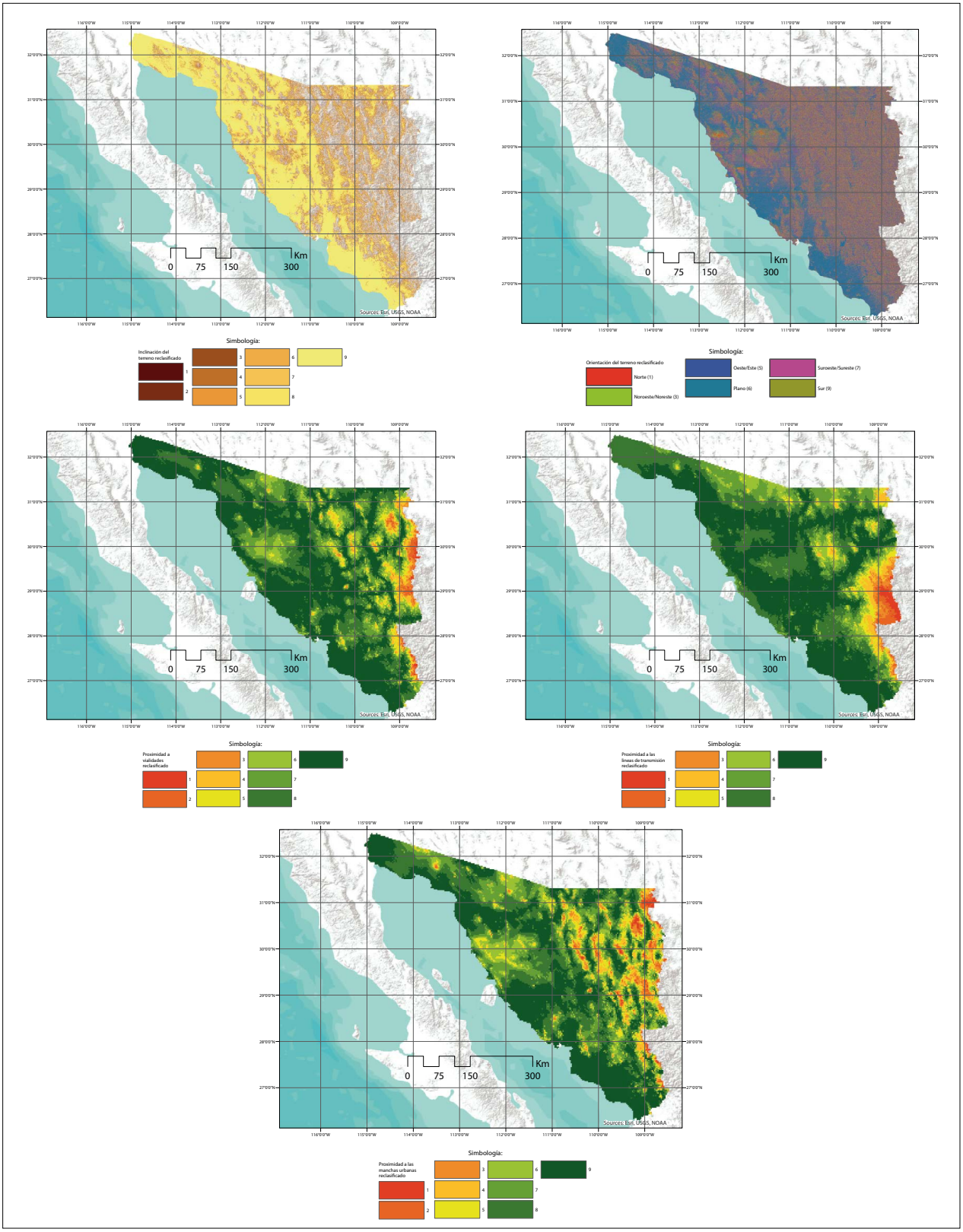


Figura 5. Criterios de selección reclasificados (parte 2). Fuente: elaboración propia con datos de CESAVE-SIAFESON (2020), CENACE (2016), INEGI (2016, 2020 y s.f), The European Space Agency (s.f.), Solargis (2017) y USGS (s.f.).

Tabla 3. Pesos atribuidos a los criterios de selección.

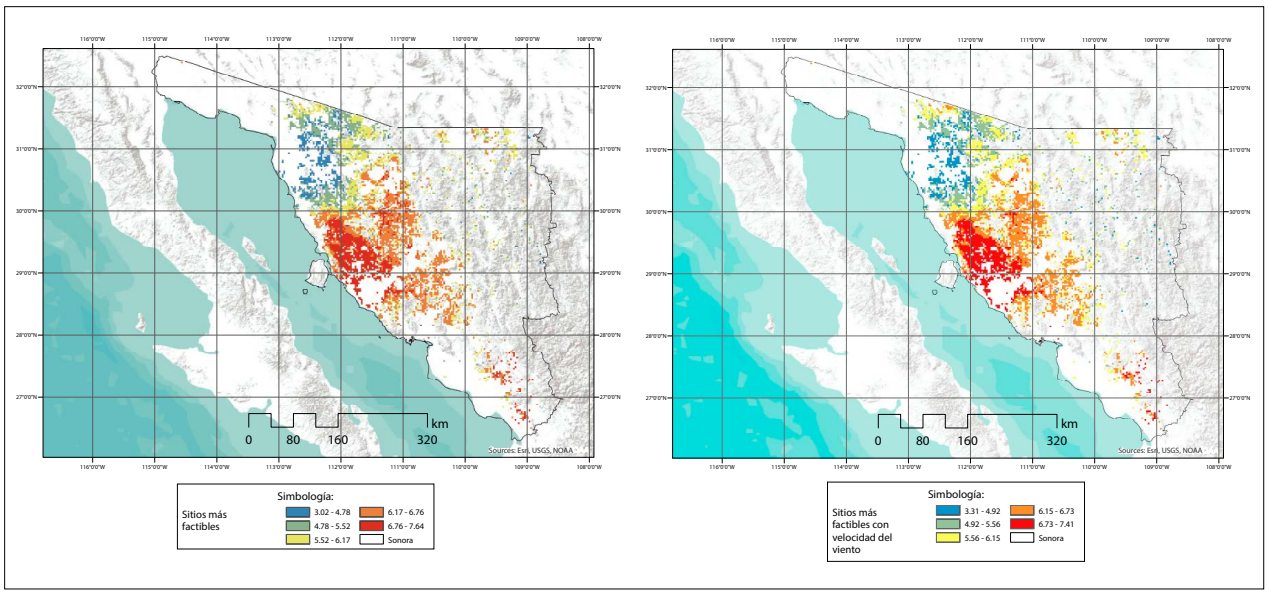
Criterio de evaluación	Sitios	Sitios con velocidad del viento
Radiación solar (W/m^2)	0.40077	0.37523
Duración de luz solar (horas)	0.19259	0.18572
Temperatura ambiente (°C)	0.06976	0.0664
Velocidad del viento (km/hr)	N.A.	0.05911
Humedad relativa (%)	0.01378	0.01247
Elevación del terreno (m)	0.02363	0.02093
Inclinación del terreno (%)	0.09687	0.09419
Orientación de la inclinación (%)	0.04017	0.03464
Proximidad a red eléctrica	0.11144	0.10703
Proximidad a vialidades	0.03455	0.02958
Proximidad a zonas urbanas	0.01645	0.0147

DISCUSIÓN

Esta investigación tiene la novedad de aplicar procesos y metodologías establecidos en el área geográfica de Sonora, donde no existen estudios similares y, por ende, sectores públicos, académicos y privados tendrían la posibilidad de aprovechar información nueva para tomar decisiones referentes a esta energía.

Si bien no existen estudios públicos específicos para la identificación de sitios con mejores condiciones para la localización de plantas fotovoltaicas, Sonora cuenta con diez parques solares fotovoltaicos (COEES, 2018), once si se suma la planta de Puerto Peñasco, que actualmente está en sus procesos iniciales de construcción y cuya ubicación se aproximó con Zarco (2022) y Flores (2022). En la Figura 8 se observa la distribución de las once plantas y su relación con los sitios más factibles, así como la generación de electricidad.

De estas, cuatro plantas se encuentran dentro del área de influencia de 5 km y nueve dentro de un área de 10 km. Contrariamente, solo tres de las diez plantas parecen ubicarse en zonas con un po-



Nota: la imagen de la izquierda usa todos los criterios de selección con excepción de la velocidad del viento y la de la derecha usa todos.

Figura 6. Sitios con condiciones más factibles para generar energía fotovoltaica. Fuente: elaboración propia con datos de CESAVE-SIAFESON (2020), CENACE (2016), CONANP (2021, 2021a), INEGI (2009, 2016, 2016a, 2017, 2020, s.f.), The European Space Agency (s.f.), Solargis (2017) y USGS (s.f.).

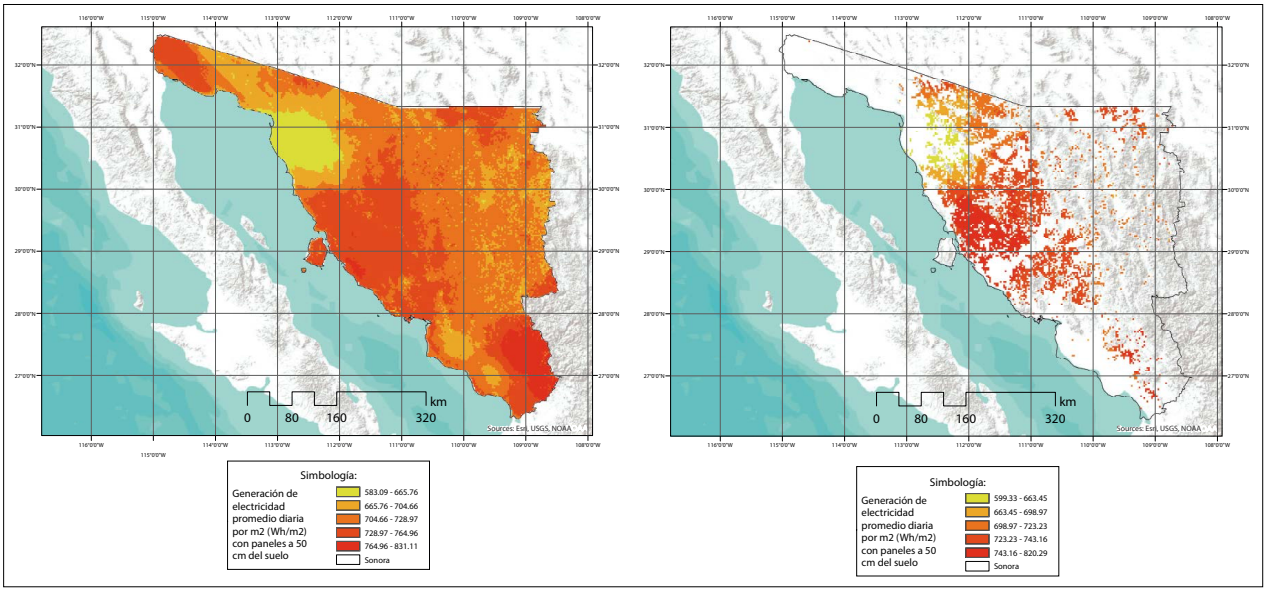


Figura 7. Potencial promedio de generación de electricidad diario por m^2 en Sonora y zonas donde es posible instalar plantas solares con celdas a 50 cm de altura del suelo. Fuente: elaboración propia con datos de CESAVE-SIAFESON (2020), CENACE (2016), CONANP (2021, 2021a), INEGI (2009, 2016, 2016a, 2017, 2020, s.f), The European Space Agency (s.f.), Solargis (2017) y USGS (s.f.).

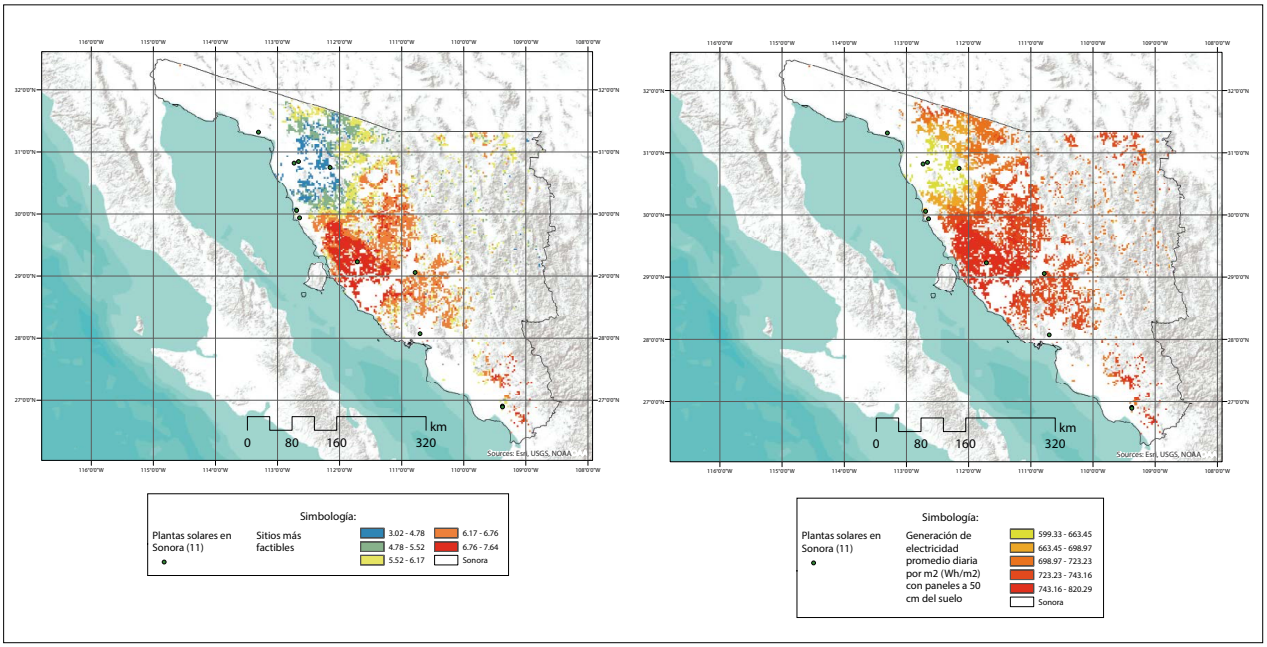


Figura 8. Potencial promedio de generación de electricidad diario por m^2, lo sitios más factibles y plantas solares en Sonora. Fuente: elaboración propia con datos de CESAVE-SIAFESON (2020), CENACE (2016), CONANP (2021, 2021a), INEGI (2009, 2016, 2016a, 2017, 2020, s.f), The European Space Agency (s.f.), Solargis (2017) y USGS (s.f.).

tencial de generación de electricidad relativamente bajo (zonas amarillas). Hay diferentes razones para esta discrepancia. Una es que el gobierno facilita las zonas para las plantas solares sin considerar estos criterios de exclusión, por ejemplo, el caso de la nueva planta en Puerto Peñasco, que está

localizada cerca de vegetación desértica, propiedad social, carreteras y un aeropuerto (INEGI, 2016a, 2017, 2020), que es construida por la CFE y donde se tuvo que construir una línea de transmisión para garantizar el funcionamiento de la planta (Hernández, 2022).

Por otro lado, Arancibia-Bulnes *et al.* (2014) estiman que con menos del 1% del territorio de Sonora, sería posible abastecer de electricidad al país, lo cual se comprueba en este estudio con mayor precisión.

Un área específica de oportunidad para futuros estudios, que se encuentra fuera del marco de esta investigación, son los medios de distribución o traslado de la electricidad, ya que, si bien solo se requiere conectar las plantas a la red nacional eléctrica, para plantas grandes el proceso puede ser más complicado y requerir de análisis adicional para poder llevarse a cabo.

Un aspecto novedoso a lo encontrado en la literatura es la inclusión de la velocidad del viento como factor determinístico para generar esta energía, como es el caso de Sánchez-Lozano *et al.* (2013), Chen *et al.* (2014), Noorollahi *et al.* (2016), Zoghi *et al.* (2017), Doljak y Stanojević (2017), Al Garni y Awasthi (2017) y Doorga *et al.* (2018). Aparentemente los resultados sin y con esta variable son similares, pero sí existen ligero cambios en las categorías más y menos factibles, que en general se pueden relacionar con espacios con baja velocidad del viento.

Otra variante con respecto a estudios similares es la comparación de diferentes métodos de interpolación espacial para poder elegir el método que tenga menores métricas de error. Y que se propone el método de Regresión IDW, que tuvo mejores resultados en algunas de las variables en las que se usó interpolación espacial. Posiblemente porque hay una relación espacial determinística entre las variables, así como que existe evidencia que ligeras mejoras en este instrumento aumentan su eficiencia (Barrios *et al.*, 2018). Las métricas de error para cada variable interpolada se presentan en la Tabla 4:

Este estudio se limita al año 2019, por lo que valdría la pena hacer estudios con datos históricos que nos permitan analizar las tendencias futuras en

Tabla 4. Pesos atribuidos a los criterios de selección.

Variable espacial	Metrica de error	Regresión kriging	Kriging simple	Kriging ordinario	IDW	Regresión-IDW	Metodo empleado
Radiación Solar	ECP	208.372	268.8484	216.4485	229.1728	222.5986	Regresión kriging
	EAP	10.4208	11.9342	10.7383	11.12146	11.0182	
	R2	0.9993	0.9991	0.9993	0.9992	0.9992	
Temperatura	ECP	0.3836	0.5472	0.8114	0.6027	0.3623	Regresión-IDW
	EAP	0.5004	0.4889	0.6229	0.4936	0.4551	
	R2	0.9995	0.9993	0.9989	0.9992	0.9995	
Velocidad del viento	ECP	4.8171	4.6517	4.5201	5.4616	5.5719	Kriging ordinario
	EAP	1.7328	1.6581	1.6399	1.8608	1.8715	
	R2	0.9472	0.949	0.9506	0.9405	0.9394	
Humedad relativa	ECP	7.8633	6.6648	7.6185	10.0522	9.1476	Kriging simple
	EAP	2.3727	2.0996	2.1589	2.4191	2.3668	
	R2	0.9964	0.9971	0.9968	0.9955	0.9957	
Duración de la luz solar	ECP	0.0735	0.0741	0.079	0.0719	0.069	Regresión-IDW
	EAP	0.1741	0.1667	0.1847	0.1803	0.1838	
	R2	0.9993	0.9993	0.9993	0.9993	0.9994	

Fuente: elaboración propia con datos de CESAVE-SIAFESON (2020), USGS (s.f.), The European Space Agency (s.f.) y Solargis (2017).

temas de generación de EF. Otra limitación es que, si bien Sonora cuenta con condiciones favorables para producir este tipo de energía, otros estados, como Durango y Chihuahua, podrían beneficiarse de estudios similares.

Resulta relevante seguir trabajando en la búsqueda de ecuaciones más precisas que permitan estimar la electricidad que sería posible generar bajo ciertas condiciones; por ejemplo, incluir variables como sombra, humedad relativa, entre otros, y comparar estas predicciones contra valores específicos de sitio en esta región geográfica. También queda la posibilidad de realizar análisis similares con metodologías diferentes a las presentadas en este artículo, como es el caso del GIS-Fuzzy AHP, GIS-AHP-Topsis, GIS-Boolean Fuzzy, GIS-Best Worst Method, GIS-Fuzzy Topsis, entre otros (para más detalle puede revisarse Suprova *et al.*, 2020; Malemnganbi y Shimray, 2020), para realizar comparaciones en cuanto a la efectividad de cada método para este caso en específico.

Por último, es relevante que estudios futuros involucren tanto a tomadores de decisiones como al sector energético privado y público, en materia de tecnología fotovoltaica, para obtener elementos que permitan hacer investigaciones con mayor nivel de profundidad y que estén conectadas con las necesidades presentes de estos actores.

CONCLUSIONES

El objetivo general de este trabajo fue hacer una primera aproximación para la estimación de electricidad vía el proceso fotovoltaico en Sonora. Tiene la intención de coadyuvar al desarrollo racional de esta energía en México a través de la elaboración, recolección o unión de un conjunto de instrumentos y herramientas replicables que, al aplicarse a datos geoespaciales, permitan obtener información relevante para la toma de decisiones con respecto a la generación de electricidad vía el proceso fotovoltaico.

Específicamente, para aportar a la generación de conocimiento necesaria para lograr una transición energética en las próximas décadas, esta investigación evaluó la cantidad de electricidad potencial que se puede generar en Sonora usando el proceso fotovoltaico. Considerando tanto los sitios más factibles donde se podrían ubicar estas plantas, así como una estimación de la electricidad que sería posible generar en sitio.

De esta forma, podemos afirmar que, considerando el consumo eléctrico total de México en 2020 (*Expansión*, s.f.), se requerirían de alrededor de 1081 km^2 del territorio de Sonora para abastecer al país usando tecnología fotovoltaica, y esto solo representaría el 3% de todo el espacio disponible en la entidad para emplear EF. Así, es posible afirmar que el potencial fotovoltaico en Sonora es privilegiado y presenta un área de oportunidad para la entidad y el país.

Poder pasar de las energías fósiles, que generan problemas importantes al ambiente y por su naturaleza son finitos, hacia energías renovables que tienen el potencial de contener los efectos negativos que la humanidad ha y sigue produciendo, es una responsabilidad relevante para la sociedad actual. En este escenario, el aprovechamiento de la radiación solar es fundamental, pero requiere de investigación para disminuir su impacto en el ambiente, así como eficientizar su aplicación

REFERENCIAS

Al Garni, H. Z. y Awasthi, A. (2017). Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied Energy*, *206*, 1225–1240. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024

Al Garni, H. Z., y Awasthi, A. (2018). Solar PV Power Plants Site Selection: A Review. En Imene Yahyaoui (Ed), *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*. Volume 1: Solar and Wind Energies (pp. 57–75). ScienceDirect.https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00002-2

Alami Merrouni, A., Elwali Elalaoui, F., Mezrhab, A., Mezrhab, A., y Ghennioui, A. (2018) Large scale PV sites selection by combining GIS and Analytical Hierarchy Process. Case study: Eastern Morocco. *Renewable Energy. 119*, 863-873. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.044

Amini, S. y Amin Asoodar, M. (2016). Selecting the most appropriate tractor using Analytic Hierarchy Process – An Iranian case study. *Information Processing in*

Agriculture, *3*, 223–234. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.08.003

Arancibia-Bulnes, C. A., Peón-Anaya, R., Riveros-Rosas, D., Quiñones, J. J., Cabanillas, R.E., y Estrada, C. A. (2014). Beam solar irradiation assessment for Sonora, Mexico. *Energy Procedia, 49*, 2290–2296. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.242

Ayvazoğluyüksel, Ö., y Filik, Ü. B. (2018). Estimation methods of global solar radiation, cell temperature and solar power forecasting: A review and case study in Eskişehir. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *91*, 639–653. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.084

Barasa, M. J. y Olanrewaju, O. A. (2022). Sustainable Energy Transition for Renewable and Low Carbon Grid Electricity Generation and Supply. *Frontiers in Energy Research*, *9*. https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.743114

Barrios, A., Trincado, G., y Garreaud, R. (2018). Alternative approaches for estimating missing climate data: application to monthly precipitation records in South-Central Chile. *Ecosystems*, *5*(28), 1-10. https://doi.org/10.1186/s40663-018-0147-x

BDAN (Banco de Desarrollo de América del Norte). (2017). Propuesta de certificación y financiamiento parque de energía fotovoltaica "Puerto Libertad" en el municipio de Pitiquito, Sonora. BDAN. https://www.nadb.org/uploads/files/certprojspabd202018_0220puerto20libertad20solar20park20project20span.pdf

BDAN (2017a). Propuesta de certificación y financiamiento proyecto de energía fotovoltaica "Orejana" en el municipio de Hermosillo, Sonora. BDAN. https://www.nadb.org/uploads/files/certprojspabd_2017_16_orejana_solar_park_project_proposal_span_public.pdf

Beriro, D., Nathanail, J., Salazar, J., Kingdon, A., Marchant, A., Richardson, S., Gillet, A., Rautenberg, S., Hammond, E., Beardmore, J., Moore, T., Angus, P., Waldron, J., Rodrigues, L., y Nathanail, P. (2022). A decision support system to assess the feasibility of onshore renewable energy infrastructure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *168*, 112771. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112771

Bottero, M., Comino, E., y Riggio, V. (2011) Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems. *Environmental Modelling & Software. 26*, 1211-1224. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.04.002

Campbell Scientific (s.f). LP02 Pyranometer. Campbell Scientific. [online] https://www.campbellsci.eu/lp02, consultado el 20 de febrero de 2023.

CEDRSSA (2015). La propiedad social rural y su perfil productivo. Camara de Diputados. Anteriormente disponible en: http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/74Reporte%2030%20La%20Propiedad%20Social%20Rural.pdf

CENACE (2016). Diagramas unifilares del sistema eléctrico nacional. Programa de ampliación y modernización 2016-2030. CENACE. https://www.cenace.gob.mx/Docs/MercadoOperacion/ModGralPlaneacion/Mod%20Gral%20Planeaci%C3%B3n%202016-2021%20Diagramas%20Unifilares%20RNT%20y%20RGD%20del%20MEM.pdf

CESAVE-SIAFESON (2017). REMAS: Manual para limpieza de las estaciones. [online] https://www.siafeson.com/remas/assets/documentos/Manual_Limpieza.pdf, consultado el 20 de febrero de 2022.

CESAVE-SIAFESON (2020) Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora. [online] www.siafeson.com/remas consultado el 7 de julio de 2020.

CESAVE-SIAFESON (s.f.). Documentos. [online] https://www.siafeson.com/remas/index.php/home/documentos consultado el 2 de febrero de 2023.

CESAVE-SIAFESON (s.f.a.). Red de Estaciones Meteorológicas Automatizadas de Sonora. [online] https://www.siafeson.com/remas/assets/documentos/psnt_REMAS_20022016.pptx consultado el 20 de febrero de 2023.

Chandio, I. A., Matori, A. N. B., WanYusof, K. B., Talpur, M. A. H., Balogun, A.-L., y Lawal, D. U. (2013). GIS-based analytic hierarchy process as a multicriteria decision analysis instrument: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, *6*(8), 3059–3066. https://doi.org/10.1007/s12517-012-0568-8

Chen, C.-R., Huang, C.-C., y Tsuei, H.-J. (2014). A hybrid MCDM model for improving GIS based solar farms site selection. *International Journal of Photoenergy,* Article ID 925370, 1-9. https://doi.org/10.1155/2014/925370

Chung, M. H. (2020). Estimating Solar Insolation and Power Generation of Photovoltaic Systems Using Previous Day Weather Data. *Advances in Civil Engineering*, 1–13. https://doi.org/10.1155/2020/8701368

Clifton, J. y Boruff, B. (2010). WDC, Site Options for Concentrated Solar Power Generation in the Wheatbelt Final Report. https://www.wheatbelt.wa.gov.au/files/9413/9711/1915/Concentrated_Solar_Power_Generation_in_the_Wheatbelt_Report.pdf

COEES. (2018). Proyectos de Energía fotovoltaica en Sonora. COEES. [online] https://coees.sonora.gob.mx/noticias-coees/208-proyectos-de-energia-solar-en-sonora.html

Comité de Energía de la Comisión Sonora- Arizona. (2017). Ruta Estratégica de Energía de la Megarregión Sonora-Arizona. Comisión Arizona-México | Comisión Sonora- Arizona. https://coees.sonora.gob.mx/images/archivos/Ruta_Estrategica_de_Ener-

gia_de_la_Megarregion_Sonora_-_Arizona_Final_final_.pdf

CONANP. (2021). Información Espacial. Áreas Naturales Protegidas. Gobierno de México. http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm

CONANP. (2021a). Información Espacial. Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación. Gobierno de México. http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm

Colak, H. E., Memisoglu, T., y Gercek, Y. (2020). Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey. *Renewable Energy*, *149*, 565-576. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.078

Corkish, R. (2013). Solar Cells. Reference Module in *Earth Systems and Environmental Sciences*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.01481-0

Doljak, D., y Stanojević, G. (2017). Evaluation of natural conditions for site selection of ground-mounted photovoltaic power plants in Serbia. *Energy*, *127*, 291-300. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.140

Doorga, J. R. S., Rughooputh, S. D. D. V., y Boojhawon, R. (2018). Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: A case study in Mauritius. *Renewable Energy,* 1-19. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.105

Elkarmi, F., y Mustafa, I. (1993) Increasing the utilization of solar energy technologies (SET) in Jordan. *Energy Policy, 21*(9), 978-984. https://doi.org/10.1016/0301-4215(93)90186-J

Engie. (2018). Resumen ejecutivo de la manifestación del impacto ambiental, modalidad regional para el proyecto: parque solar abril. Engie. https://solarabril.com/pdf/manifestacion-abril.pdf

ESRI. (s.f.). How the path distance tools work. ESRI. https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-the-path-distance-tools-work.htm

Expansión. (s.f.) México. Consumo de electricidad. Expansión/Datosmacro.com. [online] https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/electricidad-consumo/mexico consultado el 1 de junio de 2022.

Faiman, D. (2008). Assessing the Outdoor Operating Temperature of Photovoltaic Modules. *Progress in Photovoltaics*, *16*, 307–315. https://doi.org/10.1002/pip.813

Flores, S. (2022). Planta solar en Puerto Peñasco, Sonora: Datos clave del proyecto eléctrico y las dudas que genera. *Animal* Político. https://animalpolitico.com/verificacion-de-hechos/te-explico/planta-solar-en-puerto-penasco-sonora-claves-proyecto-dudas

GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit). (2018). New investment opportunities: Solar Energy Investment in Mexico. Context, perspectives and trends. Deutsche Gesellschaft fürInternationale Zusammenarbeit (GIZ). https://energypedia.info/images/archive/0/00/20180903193554%21Investment_Opportunities_Solar_2018.pdf

González García, M. A., Cárdenas, V., y Álvarez, R. (2019). Inversores inteligentes en sistemas de energía solar fotovoltaica. *Universitarios Potosianos, 16*(238), 24-29. Anteriormente disponible en: https://www.uaslp.mx/Comunicacion-Social/Documents/Divulgacion/Revista/Dieciseis/universitarios%20potosinos%20238.pdf#page=26

Hernández, E. (2022). CRE da luz verde a la planta solar de Puerto Peñasco. *Forbes México*. https://www.forbes.com.mx/cre-da-luz-verde-a-la-planta-solar-de-puerto-penasco/

Howell, B. (2021). Solar Panel Output: How Much Electricity Do They Produce? The EcoExperts. https://www.theecoexperts.co.uk/solar-panels/electricity-power-output

Huld, T., y Gracia Amillo, A. M. (2015). Estimating PV Module Performance over Large Geographical Regions: The Role of Irradiance, Air Temperature, Wind Speed and Solar Spectrum. *Energies*, *8*, 5159-5181. https://doi.org/10.3390/en8065159

INEGI. (2009). Hidrología. INEGI. https://www.inegi.org.mx/temas/hidrologia/#Descargas

INEGI. (2016). Manchas urbanas y rurales, 2015. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/murinegi15gw.xml?_httpcache=yesy_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsly_indent=no

INEGI. (2016a). Carta catastral. Estado de Sonora. 1:1 200 000. INEGI. Anteriormente disponible en: www.inegi.org.mx

INEGI. (2017). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI. Conjunto NacionalInformación de Interés Nacional. INEGI. https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598459

INEGI. (2020). Vías de comunicación. INEGI. https://www.inegi.org.mx/temas/viascomunicacion/#Descargas

INEGI. (s.f). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). INEGI. https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/

IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change-(2012). Renewable energy sources and climate change mitigation. Summary for policymakers and technical summary. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_FD_SPM_final-1.pdf

IPCC. (2021). Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. IPCC. https://

www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf

IRENA. (2015). Renewable Energy Prospects: Mexico. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_REmap_Mexico_report_2015.pdf?la=enyhash=8A259915297B04B0D50A422EDF48AD87007B56B1

IRENA. (2018). A road map to 2050. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf

IRENA. (2019). Future of solar photovoltaic. Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects. IRENA. https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic

Jenks, G. F. (1967). The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography*, 7, 186-190.

Khemiri, W., Yaagoubi, R., y Miky, Y. (2018). Optimal Placement of Solar Photovoltaic Farms Using Analytical Hierarchical Process and Geographic Information System in Mekkah, Saudi Arabia. 1st International Congress on Solar Energy Research, Technology and Applications (ICSERTA 2018). AIP Publishing. https://doi.org/10.1063/1.5084998

Koc, A., Turk, S., y Şahin, G. (2019). Multi-criteria of wind-solar site selection problem using a GIS-AHP-based approach with an application in Igdir Province/Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*, 32298–32310. https://doi.org/10.1007/s11356-019-06260-1

Koehl, M., Heck, M., Wiesmeier, S., y Wirth, J. (2011). Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95, 1638–1646. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.020

Knier, G. (2021). How do Photovoltaics Work? NASA. https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells

Kyriakopoulos, G. L., Streimikiene, D., y Baležentis, T. (2022). Addressing Challenges of Low-Carbon Energy Transition. *Energies*, *15*, 5718. . https://doi.org/10.3390/en15155718

Lane, C. (2021). How much energy does a solar panel produce? *SolarReviews*. https://www.solarreviews.com/blog/how-much-electricity-does-a-solar-panel-produce

Limón Portillo, A. (2017). Energía fotovoltaica en México: su potencial y aprovechamiento. CIEP. https://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/

Magar, V., Peña, A., Hahmann, A. N., Pacheco-Rosas, D. A., García-Hernández, L. S., y Goss, M. S. (2023). Wind Energy and the Energy Transition: Challenges and Opportunities for Mexico. *Sustainability, 15*(6), 5496. https://doi.org/10.3390/su15065496

Malczewski, J. (2000). On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches. *Transactions in GIS*, 4(1), 5-22. https://doi.org/10.1111/1467-9671.00035

Malemnganbi, R. y Shimray, B. A. (2020). Solar Power Plant Site Selection: A Systematic Literature Review on MCDM Techniques Used. En P. K. Mallick, Meher, P., Majumder, A., Das, S. K. (Coord.) *Electronic Systems and Intelligent Computing. Lecture Notes in Electrical Engineering* (pp. 37–48). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7031-5_5

Merrouni, A. A.; Mezrhab, A., y Mezrhab A. (2016). PV sites suitability analysis in the Eastern region of Morocco, Sustain. *Energy Technol. Assess, 18*, 6-15. https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.09.006

Nagarajan, R., Roy, A., Vinod Kumar, R., Mukherjee, A., y Khire, M. V. (2000). Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *58*, 275–287. https://doi.org/10.1007/s100649900032

Noorollahi, E., Fadai, D., Akbarpour Shirazi, M., y Ghodsipour, S.H. (2016). Land suitability analysis for solar farms exploitation using GIS and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP): A case study of Iran. *Energies*, *9*(8), 643. https://doi.org/10.3390/en9080643

Obukhov, S. G.; Plotnikov, I. A.; Surzhikova, O. A., y Savkin, K. D. (2017). *Method for Prediction of the Power Output from Photovoltaic Power Plant under Actual Operating Conditions*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 189. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/189/1/012008/pdf

Omran, W. (2010). Performance Analysis of Grid-Connected Photovoltaic System. UWSpace. http://hdl.handle.net/10012/4943

Ozdemir, S., y Sahin, G. (2018). Multi-criteria decision-making in the location selection for a solar PV power plant using AHP. *Measurement*, *129*, 218–226. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.020

Pardeshi, S. D., Autade, S. E., y Pardeshi, S. S. (2013). Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. *SpringerPlus 2*, 523. https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-523

Piazena, H. (1996). The effect of altitude upon the solar UV-B and UV-A irradiance in the tropical Chilean Andes. Solar *Energy*, *57*(2), 133-140. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00049-7

ProMéxico. (s.f.). Sector de Energías renovables en México. Anteriormente disponible en: http://mim.

promexico.gob.mx/swb/mim/Perfil_del_sector_erenovables/_lang/es

ProMéxico. (2017). La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México. ProMéxico. Anteriormente disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/428621/La_industria_solar_fv_y_ft_en_M_xico-compressed.pdf

PurePoint Energy. (2020). Tips for installing a Solar Ground Mount. PurePoint Energy. Anteriormente disponible en: https://www.purepointenergy.com/blog/2020/february/tips-for-installing-a-solar-ground-mount/

pvlib Python. (s.f.). pvlib temperature faiman. Pvlib Python. Anteriormente disponible en: https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/generated/pvlib.temperature.faiman.html

PVPMC. (2018). Faiman module temperature model. PV-Performance Modelling Collaborative. https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/module-temperature/faiman-module-temperature-model/

Rinner, C., y Voss, S. (2013). MCDA4ArcMap – An Open-Source Multi-Criteria Decision Analysis and Geovisualization Tool for ArcGIS 10. Toronto Metropolitan University. Journal contribution. https://doi.org/10.32920/ryerson.14637438.v1

Ropp, M. E., Begovic, M., y Rohatgi, A. (1997). Determination of the curvature derating factor for the Georgia Tech Aquatic Center photovoltaic array. Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1997. https://doi.org/10.1109/PVSC.1997.654326

Sánchez-Lozano, J. M.; Teruel-Solano, J.; Soto-Elvira, P. L., y Socorro García-Cascales, M. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *24*, 544–556. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.019

SIAFESON. (s.f.). ¿Quienes Somos? SIAFESON CESAVE Sonora. [online] http://ftp.siafeson.com/index.php/quienessomos#:~:text=El%20Sistema%20de%20Alerta%20Fitosanitaria%20del%20Estado%20de,de%20plagas%20y%2Fo%20enfermedades%20en%20los%20cultivos%2C%20etc.%29

Solangi, Y. A., Shah, S. A. A., Zameer, H., Ikram, M., y Saracoglu, B. O. (2019). Assessing the solar PV power project site selection in Pakistan: based on AHP-fuzzy VIKOR approach. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*, 30286–30302. https://doi.org/10.1007/s11356-019-06172-0

Solargis. (2017). Mapas de recursos solares de Mexico. The World Bank. https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/mexico

Stenhouse, E. (2021). Solar Panel Output: How Much Power Does a Solar Panel Produce? Treehugger https://www.treehugger.com/how-much-electricity-does-a-solar-panel-produce-5194148

Suprova, N. T., Zidan, A. R., y Harunur Rashid, A. R. M. (2020). Optimal Site Selection for Solar Farms Using GIS and AHP: A Literature Review. *Proceedings of the International Conference on Industrial y Mechanical Engineering and Operations Management*. Dhaka, Bangladesh. http://www.ieomsociety.org/imeom/253.pdf

Svarc, J. (2022). Most efficient solar panels 2022. Clean Energy Reviews. https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels

Taddei Bringas, J. L., Navarrete Hinojosa, M. de los A., Taddei Arriola, P. D., y Cabanillas López, R. (2014). Estimación del potencial de energías renovables en el Estado de Sonora. *EPISTEMUS*, *17*(8), 88-94. Anteriormente disponible en: http://www.epistemus.uson.mx/revistas/articulos/17-13ENERGIAS_RENOVABLES_EN_SONORA.pdf

Taibi, A., y Atmani, B. (2017). Combining Fuzzy AHP with GIS and Decision Rules for Industrial Site Selection. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, *4*(6), 60-69. https://doi.org/10.9781/ijimai.2017.06.001

Teknomo, K. (2006). Analytic hierarchy process (AHP) tutorial. NALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP) TUTORIAL. [online] https://people.revoledu.com/kardi/tutorial/AHP/ consultado el 20 de septiembre de 2023.

The European Space Agency (s.f.). Level-2A. The European Space Agency. https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types/level-2a

Universidad de Sonora. (s.f.). Potencial de Energías Renovables Para el Estado de Sonora. Comisión de Energía del Estado de Sonora. https://coees.sonora.gob.mx/images/descargas/Energias-Renovables/Potencial-de-Energias-Renovables-Sonora.pdf

USGS -United States Geological Survey. (s.f.). Landsat Missions. USGS. https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat

Wong, M. A., Zhu, R., Liu, Z., Lu, L., Peng, J., Tang, Z., Ho Lo, C., y Chan, W.K. (2016) Estimation of Hong Kong's solar energy potential using GIS and remote sensing technologies. *Renewable Energy*, *99*, 325-335. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.003

Vaidya, O. S., y Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, *169*(1), 1–29. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028

Zarco, J. (2022). Central fotovoltaica Puerto Peñasco. *PV Magazine*. https://www.pv-magazine-mexico.

com/2022/06/14/central-fotovoltaica-puerto-penasco/

Zoghi, M., Houshang Ehsani, A., Sadat, M., Javad Amiri, M., y Karimi, S. (2017). Optimization solar site selection by fuzzy logic model and weighted-linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan-IRAN. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *68*, 986–996. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.014

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60771 • ARTÍCULOS
Núm.113 • Abril • 2024 • e60771
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

¿Es detectable empíricamente la protección normativa del territorio? Análisis de las tendencias de temperatura y vegetación del área norte de Bogotá con sensores remotos

Is regulatory protection of the territory empirically detectable? Analysis of temperature and vegetation trends in the northern area of Bogota with remote sensing.

Luis Inostroza* y Richard Lemoine-Rodriguez**

Recibido: 24/08/2023. Aceptado: 6/12/2023. Publicado: 15/02/2024.

Resumen. Este trabajo presenta un análisis de las tendencias de desarrollo urbano del sector norte de Bogotá, en un área de 6930 hectáreas que incluye el Plan de Ordenamiento Zonal del Norte (POZN) y parte de la reserva natural Thomas Van der Hammen (RTVH). El plan propuesto por la Alcaldía mediante el Decreto 088 de 2017 intenta dar coherencia a un desarrollo urbano que ha ocurrido de facto y con importantes consecuencias ecológicas y sociales mientras que la RTVH intenta proteger las características ecológicas de este sector entre los cerros y el rio Bogotá. El método consistió en analizar series de tiempo de temperatura de la superficie y de vegetación mediante técnicas de teledetección e indicadores radiométricos para identificar los cambios estructurales que ha experimentado el sector en términos de sus componentes biofísicos. Los resultados del análisis ponen en evidencia que el proceso de urbanización instalado en el sector norte de Bogotá es el determinante de las tendencias del espacio biofísico observadas, más allá de las figuras de protección legal que existen que incluyen el POZN y la RTVH. En el caso de la RTVH, el marco de protección no ha sido efectivo para preservar las características ecológicas que justificaron su creación. La inclusión de evidencia empírica como la mostrada en este trabajo en la planificación del desarrollo urbano es clave para avanzar en la protección activa del medio ambiente, más allá del discurso normativo.

Palabras clave: teledetección, EVI, temperatura de la superficie de la tierra, planificación urbana, reserva Thomas van der Hammen, análisis multitemporal.

Abstract. This article analyzes the trends in urban development in an area of 6930 hectares in the northern sector of Bogotá that includes the Northern Zonal Management Plan (POZN, in Spanish) and part of the Thomas Van der Hammen Nature Reserve (RTVH, in Spanish). The plan established by the Mayor's Office through Decree 088 of 2017 seeks to manage an urban development trend that has occurred de facto, with important ecological and social consequences, while the RTVH intends to protect the ecological characteristics of this sector located between the hills and the Bogotá River. The method consisted of analyzing time series of surface temperature and vegetation using remote sensing techniques and radiometric indicators to identify the structural changes experienced by the sector in terms of its biophysical components. The results of the analysis show

* Mendel University in Brno, Faculty of Regional Development and International Studies, Zemědělská 1665/1, Černá Pole, 613 00 Brno-sever, República Checa y Universidad Autónoma de Chile, Chile. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6303-4529. Email: luis.inostroza@mendelu.cz. Autor de correspondencia.
** Geolingual Studies, University of Würzburg, Alemania y Earth Observation Center, German Aerospace Center, Alemania. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3679-6958. Email: richard.lemoine-rodriguez@uni-wuerzburg.de

that the urbanization process taking place in the northern sector of Bogotá is the driver of the observed trends in the biophysical space beyond the legal protection instruments currently in force, including POZN and RTVH. In the case of RTVH, the protection framework has been insufficient to preserve the ecological characteristics that led to its creation. The inclusion of empirical evidence in urban development planning, such as that shown in this work, is key to advancing the active protection of the environment beyond the regulatory discourse.

Keywords: remote sensing, EVI, land surface temperature, urban planning, Thomas van der Hammen reserve, multitemporal analysis

INTRODUCCIÓN

La crisis socioecológica del siglo XXI, cruzada por una evidente crisis climática y social, requiere de nuevos modelos de planificación y monitoreo que permitan impulsar un desarrollo urbano realmente sostenible (Seto *et al.*, 2016). La planificación urbana se enfrenta al gran dilema de conciliar las necesidades de una población creciente que demanda mejores estándares y calidad de vida con la necesidad de proteger una naturaleza que se encuentra amenazada local y globalmente (Grimm *et al.*, 2008; United Nations, 2015). La planificación urbana tradicional se encuentra en crisis (Seto *et al.*, 2016), y requiere nuevos y frescos enfoques basados en evidencia científica que le permitan enfrentar los enormes desafíos socioecológicos que el siglo XXI impone a la ciudad y sus habitantes, mediante la inclusión del análisis del clima urbano, de los servicios ecosistémicos y la incorporación de soluciones basadas en naturaleza, aspectos que deben ser urgentemente incluidos tanto en la planificación urbana que desarrollan instituciones públicas y privadas de manera práctica, como también ser incorporados de manera explícita y formal en las redes académicas y currículos de las carreras profesionales *ad hoc*.

La ciencia puede jugar un rol fundamental para enfrentar los retos de la sustentabilidad urbana, al poseer la capacidad de informar los posibles efectos de distintas alternativas de desarrollo, permitiendo explorar medidas que minimicen los efectos indeseados de políticas públicas, planes y proyectos que podrían estar basados en consideraciones infundadas o incluso sesgadas de la realidad. La ciencia puede ser una herramienta que informe a las instituciones locales, y aporte evidencia empírica e información ecológica clave para la toma de decisiones de los actores públicos y privados.

Las ciudades latinoamericanas se expanden a velocidades muy altas que rondan los 20 m^2 por minuto, alterando sus ecosistemas aledaños (Artmann *et al.*, 2019b). Bogotá, a pesar de presentar una expansión urbana compacta, ha experimentado un importante crecimiento en su vector norte con efectos directos en el medio biofísico (Gomez-Rodriguez y Beltrán-Vargas, 2018; Inostroza *et al.*, 2013; Salas-Pérez *et al.*, 2019). Este desarrollo urbano es espontáneo, no planificado, intenso y también informal (Inostroza, 2017) y produce cambios importantes en los ecosistemas, tanto en términos de la intensidad y calidad de la vegetación existente como de la densidad y características del espacio construido (Inostroza *et al.*, 2013). Es importante identificar cuáles son las tendencias de cambio en términos de la evolución del espacio biofísico analizando el desarrollo urbano como un proceso continuo y sobre evidencia empírica (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022b). El análisis de dinámicas de cambio con sensores remotos puede hacer una potente contribución para monitorear el desarrollo urbano y sus implicaciones (Figura 1; Inostroza *et al.*, 2013; Lemoine-Rodríguez *et al.*, 2020). En la última década, un número creciente de trabajos científicos ha demostrado que el uso de imágenes de satélite y métodos de análisis geoestadístico permite identificar las tendencias y la heterogeneidad espacial de distintas dinámicas interrelacionadas de las ciudades, tales como la expansión física urbana, los cambios en la cobertura vegetal y la evolución de las islas de calor urbano (K. Huang *et al.*, 2019; Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022a). En un escenario ideal, la información generada mediante este tipo de estudios debe ser considerada por los tomadores de decisiones para planear el desarrollo de las ciudades con base en evidencia empírica.

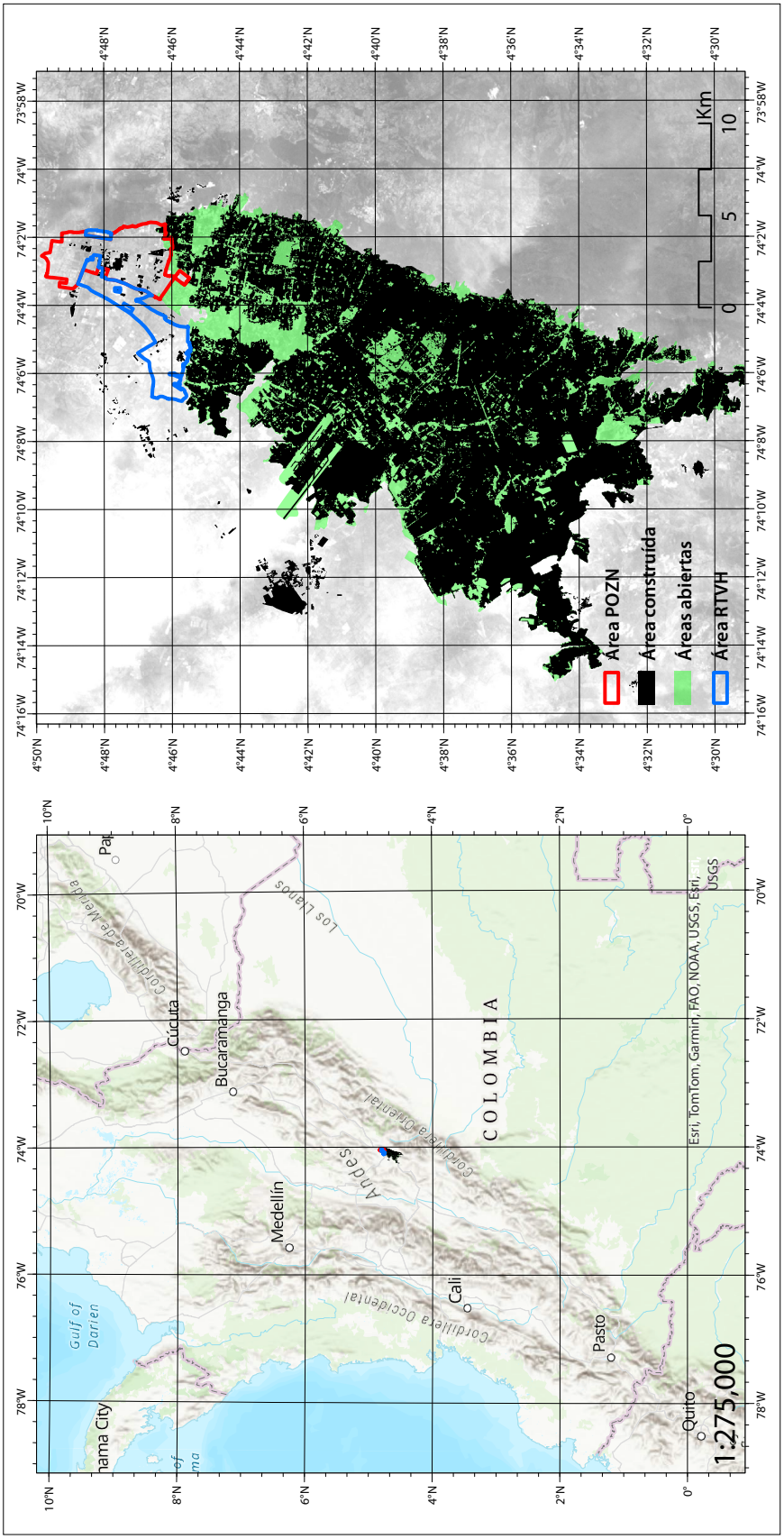


Figura 1. Expansión urbana experimentada por Bogotá entre los años 1988 y 2010, que muestra la relación entre el área de estudio (POZN y RTVH) y el resto de Bogotá. Fuente: elaboración propia sobre imágenes satelitales LANDSAT.

Este trabajo presenta un análisis de las tendencias de desarrollo del sector norte de Bogotá, en un área de 6930 hectáreas, que incluyen una extensión de 1873 ha planificadas por la alcaldía de Bogotá, a través del Plan de Ordenamiento Zonal del Norte (POZN), y parte de la reserva natural Thomas Van der Hammen (RTVH). El plan propuesto por la alcaldía, mediante el decreto 088 de 2017, intenta dar coherencia a un desarrollo urbano que ha ocurrido *de facto* y con importantes consecuencias ambientales y sociales, mientras que la RTVH intenta proteger las características ecológicas de este sector entre los cerros y el rio Bogotá. En su origen, la RTVH fue inspirada en las ideas de Thomas Van der Hammen, quien propiciaba propiciaba formas de conservación ecológica típicas del siglo XX mediante la protección y generación de corredores ecológicos que mantuvieran la funcionalidad de los ecosistemas.

OBJETO DEL ANÁLISIS

El análisis presentado tiene como objetivo evaluar las tendencias de desarrollo del área norte de Bogotá. El objetivo específico es determinar las diferencias y similitudes que han experimentado las áreas correspondientes al Plan de Ordenamiento Zonal Norte (POZN) y el área de la reserva natural Thomas Van der Hammen (RTVH).

MÉTODO

El análisis de la evolución del espacio biofísico mediante técnicas de teledetección abarcó un periodo de 22 años (2000-2021). Este análisis permite utilizar las tendencias en la intensidad de la vegetación (análisis fenológico, siguiendo Zewdie *et al*., 2017) y del espacio construido, a fin de analizar los cambios experimentados en el área de estudio, cubriendo un total de 6930.5 ha (Figura 2; AOI), incluyendo la totalidad del POZN y la parte norte de la RTVH. El análisis se llevó a cabo en el ambiente para análisis estadístico R (R Core Team, 2020).

Preprocesamiento de datos de temperatura y vegetación (AOI MODIS)

Para analizar el clima y la vegetación locales se utilizaron 2 indicadores radiométricos: el EVI (Enhanced Vegetation Index) y Land Surface Temperature (Temperatura de la Superficie Terrestre, TST). El EVI fue representado mediante el producto Terra MODIS Vegetation Indices (NDVI&EVI, MOD13A2). El EVI es un indicador de la intensidad y verdor de la vegetación, que ha demostrado ser efectivo para su uso en ambientes urbanizados (Clinton y Gong, 2013; Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022a; Peng *et a*l., 2012). La TST también refleja el efecto de la urbanización de manera indirecta a través de los cambios en la temperatura de la superficie, donde los valores más altos corresponden a áreas urbanizadas y los más bajos a áreas con cobertura vegetal (Oke *et al*., 2017).

Para representar las temperaturas en el área de estudio de forma espacialmente explícita, se emplearon imágenes MODIS MOD11A2 diurnas, que incluyen valores de TST promedio por pixel en intervalos de 8 días con 1 km de resolución espacial. Se emplearon todas las escenas disponibles para el periodo 2000-2021, que derivaron en un volumen total de 1004 imágenes. Las imágenes fueron filtradas con base en las bandas de calidad de los datos (*i.e*., QA), con el fin de incluir en nuestro análisis solo pixeles con un error ≤ 2 ºK.

Las dinámicas espaciotemporales de la vegetación del área de estudio fueron analizadas mediante el producto MODIS MOD13A2, que contiene el valor del índice de vegetación mejorado EVI de mejor calidad por pixel con base en intervalos de 16 días a una resolución de 1 km alcanzando un volúmen de 496 imágenes para nuestro periodo de estudio. Los criterios empleados para seleccionar el valor final de cada pixel son: baja presencia de nubes, bajo ángulo de toma y el valor de EVI más elevado.

Los productos MODIS de TST y EVI fueron transformados de su proyección nativa sinusoidal al sistema de proyección de coordenadas PCS_CarMAGBOG. Los números digitales contenidos en las imágenes MOD11A2 fueron reescalados para obtener valores de TST en kelvin, los cuales fueron finalmente transformados a grados centígrados. Los números digitales de los productos MOD13A2

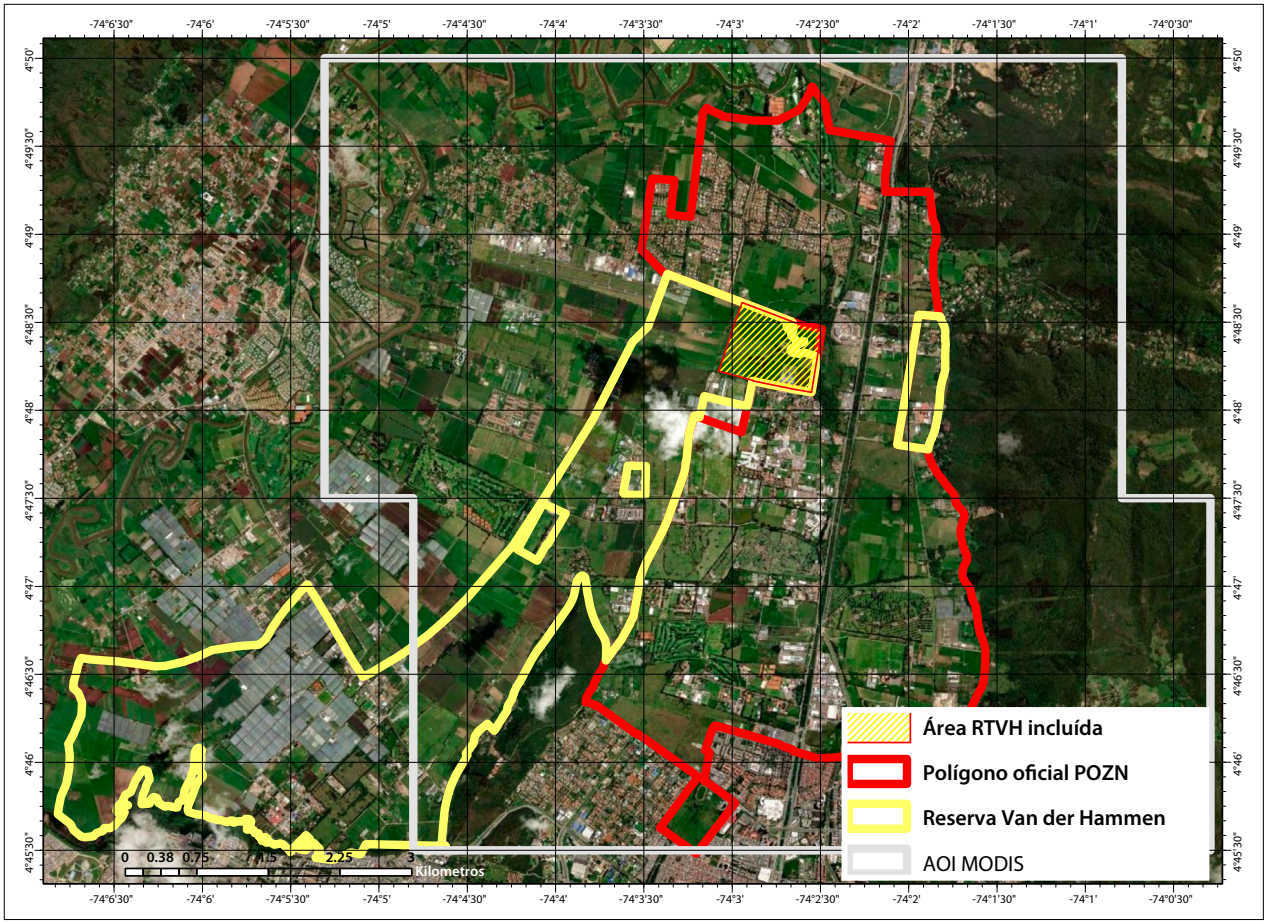


Figura 2. Extensión total del área de estudio y desglose de áreas. Fuente: elaboración propia.

fueron reescalados para obtener valores de EVI en el rango de -1 a 1. Para generar datos a intervalos consistentes que representaran la evolución tanto de los valores de TST como de EVI a través del tiempo, se calcularon promedios anuales por pixel para ambos indicadores, obteniendo un volumen final de 22 imágenes para cada serie de tiempo representando el periodo 2000-2021.

Análisis de tendencias de temperatura y vegetación

Se analizaron las tendencias de TST tanto a nivel de pixel como de polígono, tomando el AOI MODIS (Figura 2) como una unidad espacial. La tendencia a escala del polígono del POZN fue analizada mediante una regresión lineal, empleando el promedio de la TST de cada año como variable dependiente y el tiempo como variable explicativa. Además, se estimó la correlación de Pearson entre cada variable en los polígonos del POZN y RTVH.

Para analizar a detalle las tendencias espacio-temporales de TST y EVI, se aplicaron regresiones lineales para cada indicador, definiendo modelos similares a los del paso anterior, pero esta vez de forma espacialmente explícita. Para esto, se definió un modelo independiente por pixel, es decir, cada pixel representó una serie de tiempo. Así, se obtuvieron los valores de pendiente y valores de significancia estadística (i.e., p) de TST y EVI por pixel correspondientes al periodo 2000-2021.

Distribución espacial de tendencias de temperatura

La evolución espaciotemporal de las TST fue explorada a través de un método de detección de tendencias de valores agrupados espacialmente

en el periodo 2000-2021. Para esto, los datos de TST fueron analizados con las estructuras de un cubo de espacio-tiempo, empleando el paquete LSTtools de R (Lemoine-Rodríguez y Mas, 2020; R Core Team, 2020). El cubo de espacio-tiempo es la representación multidimensional de la serie de tiempo de TST, donde las coordenadas representan la dimensión espacial, las fechas correspondientes a cada año representan la dimensión temporal y los valores del promedio de TST anual de cada pixel son el indicador dinámico que se evalúa (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022b). La finalidad de este método es producir una clasificación que combina estadísticas espaciales (*i.e.*, detección de puntos calientes y fríos; análisis de *hot/cold spots*) y temporales (prueba de tendencias de Mann-Kendall) para reflejar las tendencias espaciotemporales de la TST, siguiendo a (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022b). Esto brinda mayor poder explicativo sobre la evolución de la TST que los enfoques tradicionales que solo incluyen la detección de puntos calientes y fríos o solo se enfocan en el análisis de tendencias temporales, por separado. Como parte de este método, primero se detectaron los grupos de pixeles con valores extremos de TST altos (*i.e.*, *hot spots*), bajos (*i.e.*, *cold spots*) y promedio para cada año, empleando la prueba de Getis-Ord Gi* con base en un nivel de significancia de $p<0.05$ (Anselin, 1995). Posteriormente, se empleó cada pixel como una serie de tiempo para identificar tendencias monotónicas significativas ($p<0.05$) en los valores de TST durante el periodo 2020-2021 (Kendall, 1975; Sen, 1968). Este método calcula la proporción de años en los que cada pixel perteneció a las clases de valores extremos altos y bajos, incluyendo así la dimensión temporal de manera explícita en el análisis (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022b). Los pixeles fueron clasificados en áreas sin tendencia (pixeles que presentaron valores extremos altos o bajos en <90% de los años), valores en incremento (pixeles con tendencia positiva), valores en disminución (pixeles con tendencia negativa), valores altos sin cambio (pixeles con valores extremos altos en >90% de los años del periodo de estudio y sin tendencia temporal), valores bajos sin cambios (pixeles con valores extremos bajos en >90% de los años del periodo de estudio y sin tendencia temporal), valores altos nuevos (pixeles con valores extremos altos solo en 2021) y valores bajos nuevos (pixeles con valores extremos bajos solo en 2021). Estas son todas las posibilidades de clasificación en que pueden agruparse los pixeles del área de estudio. En los resultados se presentan únicamente las clases que fueron detectadas durante el periodo analizado.

RESULTADOS

Macrotendencias de temperatura y vegetación

La Figura 3 muestra los resultados de los cálculos de temperatura anuales promedio para el periodo 2000-2021. Se observan 3 tipos de tendencias por pixel en la TST: 1) valores de temperatura bajos, sin tendencia de cambio significativa concentrados al nororiente del área de estudio (AOI-MODIS) y que corresponden a áreas cercanas al sistema orográfico de los Andes; 2) un área central diagonal al anterior sin tendencia espacial ni temporal significativa, y 3) el área sur occidente con valores de temperatura altos también sin tendencia temporal. La mayor temperatura de esta área puede obedecer tanto a su mayor grado de urbanización como a su mayor cercanía a Bogotá y su respectiva isla de calor.

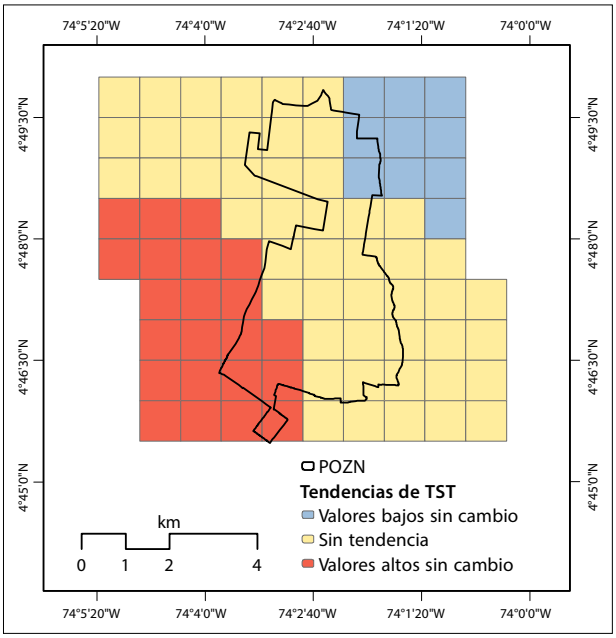


Figura 3. Macrotendencias en la temperatura de la superficie terrestre (TST) en el área del POZN y circundante. Fuente: elaboración propia.

Sin considerar las áreas circundantes, el ajuste lineal de tendencias de temperatura multitemporales para el polígono de estudio total muestra una ligera pendiente positiva, de incremento. Al igual que en el caso anterior, esta tendencia de incremento posiblemente se debe a los crecientes grados de urbanización que ha experimentado el sector durante las últimas dos décadas.

Al interior del polígono del POZN los pixeles muestran valores de pendiente de la TST generalmente bajos, siendo algunos de los más altos los que no muestran una tendencia significativa. Los valores de pendiente de TST más altos (i.e., aumento de temperaturas) se encuentran al sur y norte del polígono del POZN, algunos de ellos siendo significativos. Por el contrario, los valores más bajos se distribuyen al centro del polígono y en su zona este y oeste. Dichas tendencias obedecen a dinámicas de desarrollo específicas que afectan los cambios en las temperaturas de manera diferencial (Figura 4).

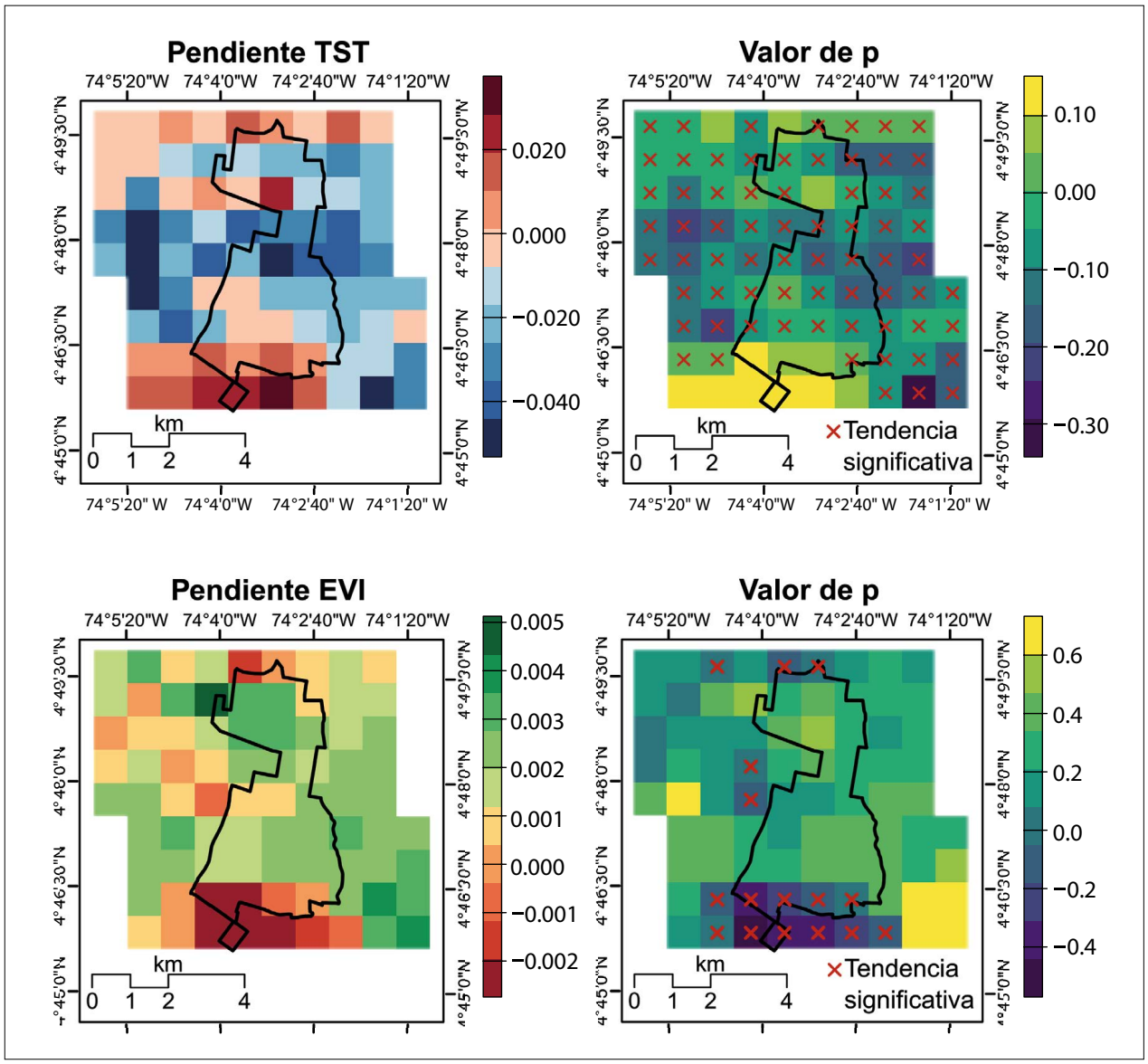


Figura 4. Tendencia multitemporal en la temperatura de la superficie terrestre (TST, arriba) e intensidad de la vegetación (EVI, abajo) en el área del POZN y circundante. Se resaltan los pixeles con valores de p <0.05 en los mapas correspondientes (paneles de la derecha). Fuente: elaboración propia.

Al observar las tendencias en la intensidad de la vegetación reflejadas por el indicador EVI se muestra claramente una relación con las dinámicas de las temperaturas a nivel pixel. Las mayores pendientes significativas negativas (i.e., reducción de la vegetación) se encuentran al norte y al sur del polígono POZN, cercanas al área urbana consolidada de Bogotá. Lo valores de significancia estadística (p-value) son mayormente significativos en la zona sur del polígono de estudio (Figura 4).

Al comparar las tendencias tanto de temperatura como de intensidad de la vegetación de los polígonos del POZN y RTVH se observa una alta correlación en cada unidad espacial. Las temperaturas medidas al interior de ambos polígonos siguen las mismas fluctuaciones (Figura 5). Mientras que la intensidad de la vegetación, si bien es ligeramente mayor al interior del polígono RTVH, presenta tendencias a largo plazo acopladas a la temperatura. En efecto, la mayor intensidad de la vegetación existente en el polígono RTVH manifiesta no obstante las mismas fluctuaciones temporales que la vegetación al interior del polígono del POZN, con una correlación significativa de 0.87 ($p>0.001$). La TST también exhibe una tendencia sumamente similar entre el POZN y RTVH, con una correlación significativa de 0.92 ($p<0.001$). Este acoplamiento evidencia que ambas áreas están sometidas a dinámicas similares de cambio de la configuración del espacio biofísico, derivadas de procesos de urbanización que no muestran diferencias significativas que reflejen la contrastante normativa que rige sobre ambas áreas.

DISCUSIÓN

El patrón de desarrollo urbano latinoamericano es fragmentado y disperso (Inostroza *et al.*, 2013; Lemoine-Rodríguez *et al.*, 2019), lo que afecta radicalmente los ecosistemas internos y externos de las ciudades, alterando su estructura y funciones primordiales, así como su biodiversidad (Inostroza, 2022). Con un comportamiento tan dinámico, las consecuencias, impactos y transformaciones inducidas en los ecosistemas, ya sea de manera directa o indirecta, son evidentes y de gran magnitud, y

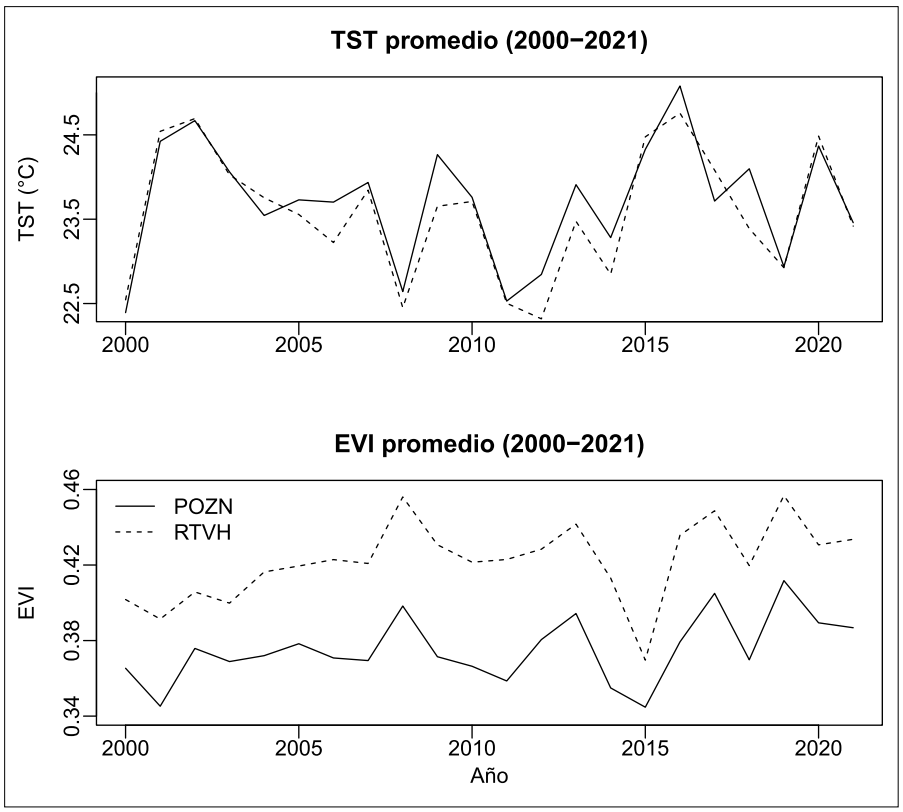


Figura 5. Comparación de tendencias de temperatura (arriba) y de vegetación (abajo) con ajuste lineal multitemporal entre las áreas del POZN y RTVH. Fuente: elaboración propia.

abarcan diversas escalas y áreas de influencia (Jones *et al.*, 2022). La rápida expansión urbana y la fragmentación producen incrementos significativos en la segregación socio-espacial y pérdida crítica de áreas con vegetación nativa (Barrera *et al.*, 2018; Lemoine-Rodríguez *et al.*, 2019). El desarrollo urbano fragmenta, aísla e incluso degrada los ecosistemas naturales, homogeneizando su composición de especies e alterando sus sistemas hidrológicos, energéticos y de flujos de materia y nutrientes (Alberti, 2005). El actual paradigma de la ciudad compacta, que se ha consolidado como la meta de la planificación urbana, tampoco es la panacea, ya que eventualmente limita el espacio para la infraestructura verde urbana, con lo cual se producen asimetrías (*trade-offs*) en términos de la forma urbana que es necesario resolver (Artmann *et al.*, 2019a; Baró *et al.*, 2017). Esto es muy claro en cuanto al rol hegemónico del automóvil, cuya dictadura en la planificación urbana lleva la dispersión a escalas absurdas (J. Huang *et al.*, 2007). Sin embargo, a escalas mayores se ha observado que el desarrollo urbano compacto produce menos impactos ecológicos que el modelo de sub-urbanización tipo disperso (denominado *sprawl*; Zhong *et al.*, 2022).

Nuestro trabajo analiza las tendencias del espacio biofísico del vector de desarrollo norte de Bogotá con técnicas de teledetección. Los resultados muestran que las áreas estudiadas (POZN y RTVH) presentan tendencias de urbanización incrementales y similares, medidas con indicadores radiométricos *ad hoc*. Estas conclusiones son corroboradas por trabajos previos realizados por Gomez-Rodriguez y Beltrán-Vargas (2018) y Salas-Pérez *et al.* (2019) utilizando dos imágenes Landsat y por Hurtado *et al.* (2020) que utilizó 7 imágenes de diversos sensores. Nuestro aporte metodológico y analítico es la utilización de técnicas multitemporales que incluyen una cantidad mayor de imágenes (1 044 imágenes de TST y 496 de EVI, agregadas en 22 escenas anuales), lo que permite establecer que las tendencias presentadas son robustas en el horizonte temporal analizado (2000-2021). Además, en este estudio integramos el análisis de tendencias de TST y de vegetación con base en unidades aisladas (pixeles) y contextualizadas espacialmente con sus pixeles adyacentes (polígonos). Esto permitió captar tanto la heterogeneidad de las tendencias de cada pixel como su efecto combinado en la tendencia general de cada polígono. Esto combinado con la identificación empírica de grupos de pixeles con tendencias espaciotemporales de TST particulares permite una interpretación más robusta de los cambios de temperatura y su relación con la vegetación a través del tiempo (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022a, 2022b).

Aunque nuestros resultados muestran que la TST incrementa como consecuencia de la disminución en la vegetación, hay diversos factores que influencian este fenómeno y que deben considerarse en estudios posteriores. Distintas estructuras vegetales afectan el clima local de forma diferente. Por ejemplo, el aporte de la cubierta arbórea para mitigar las temperaturas es mucho mayor que el de la vegetación herbácea, por lo que el reemplazo de estas cubiertas representa diferentes implicaciones en términos de la intensidad del aumento de TST (Lemoine-Rodríguez, Inostroza, Falfán *et al.*, 2022; Stewart y Oke, 2012). En estudios posteriores estos dos tipos de cubiertas pueden ser diferenciados para lograr un análisis más detallado de la relación entre la disminución de distintas cubiertas vegetales y el aumento de TST. Otro aspecto a considerar es la configuración espacial de los parches tanto urbanizados como de vegetación (Deng *et al.*, 2009). A medida que disminuye la vegetación debido al establecimiento de infraestructura urbana, emergen diversos patrones espaciales. En este proceso, los patrones de urbanización más densificados suelen corresponder a mayor aumento de TST (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022a; Stewart & Oke, 2012). A escala más detallada, la magnitud a la cual las temperaturas aumentan también está relacionada a los materiales específicos con los que son construidas las edificaciones (Palme *et al.*, 2018). Debido a estos factores, se pueden presentar discordancias entre los cambios de TST y el EVI, ya que este índice de vegetación captura la composición vegetal pero no la configuración espacial ni los materiales específicos del tejido urbano y sus alrededores.

La falta de eficiencia normativa

Mantener la integridad ecológica de los ecosistemas urbanos en un contexto de altas tasas de expansión

y fragmentación urbana es uno de los desafíos más importantes de la planificación urbana latinoamericana. Para enfrentar este desafío es indispensable la incorporación sistemática de conocimiento científico que permita proteger el valor ecológico de los ecosistemas regionales a través de un trabajo conjunto entre ciencia y política que reproduzca círculos virtuosos de aprendizaje reciproco (Rozas-Vásquez *et al.*, 2017). La incorporación de estándares paramétricos que aseguren una rica estructura ecológica de infraestructura verde y azul con diversidad de especies y adecuado manejo ecológico que incluya mínima poda de césped y descomposición de biomasa in situ (Inostroza, 2022), fomentar la agricultura urbana en espacios intersticiales y vacíos (Azunre et al., 2019), en distribuciones espaciales adecuadas (Zepp *et al.*, 2021), son medidas necesarias y urgentes. Sin embargo, todavía se requieren mayores esfuerzos tanto conceptuales como operacionales para facilitar la aplicabilidad del conocimiento ecológico en la planificación urbana real, esa que desarrollan planificadores y empresas en sus computadores y que luego se implementa y construye a través de proyectos concretos en lugares específicos. El presente trabajo tuvo como objetivo ilustrar como pueden evaluarse los resultados de los planes de desarrollo urbano implementados previamente, con el fin de identificar su efectividad mediante datos empíricos y adaptar los futuros planes con base en las tendencias detectadas.

En el presente estudio el análisis con sensores remotos evidencia que ambas áreas manifiestan tendencias de cambio de la configuración del espacio biofísico altamente similares, las que obedecen al proceso de urbanización instalado en el área norte de Bogotá que ha sido documentado en trabajos previos (Inostroza, 2017; Inostroza *et al.*, 2013). El vector de urbanización del área norte de Bogotá es potente y también ha sido analizado en el caso específico de las dinámicas biofísicas al interior de la RTVH (Hurtado *et al.*, 2020; Salas-Pérez *et al.*, 2019) y de cambios de usos del suelo y provisión de servicios ecosistémicos (Gomez-Rodriguez y Beltrán-Vargas, 2018). Las tendencias identificadas tanto en trabajos previos como en el nuestro no reflejan la normativa de protección que rige sobre la RTVH, evidenciando que existe una discordancia entre la realidad biofísica que experimenta el sector y la normativa que lo regula. Esta situación no es particular de Bogotá y ha sido analizada en otros contextos latinoamericanos mediante otros enfoques y análisis cuantitativos (Daunt *et al.*, 2021). La planificación discursiva practicada en Latinoamérica requiere reforzarse con trabajos de monitoreo recurriendo a técnicas como las presentadas en este trabajo, que aportan evidencia para la toma de decisiones que eviten pérdidas de los valores ecológicos existentes.

La RTVH forma parte de la estructura ecológica principal bogotana con un uso predominante de reserva forestal, junto a actividades de conservación e investigación y recreativas de bajo impacto. También existen en el sector diversas infraestructuras junto a usos residenciales y agropecuarios (Salas-Pérez *et al.*, 2019). De acuerdo con la percepción de expertos locales, "*existe una riqueza ecológica y paisajística en la Zona Norte de Bogotá para la dinámica ecológica regional, en virtud de lo cual la recuperación y conservación de la misma debe ser un objetivo prioritario*" (CAR de Cundinamarca, 2011, p. 1). Sin embargo, esta situación no se ve reflejada en nuestro análisis y requiere no solamente la revisión de los paradigmas de conservación existentes sino fundamentalmente la inclusión de formas activas de protección, que involucren a la ciudadanía de maneras más activas sobre la base de la identificación, cuantificación y valoración de los beneficios que dichas áreas proveen a las poblaciones locales, tarea que se está llevando a cabo en otras latitudes sobre la base de la ciencia de los servicios ecosistémicos (SE) (Inostroza *et al.*, 2017).

Limitaciones del análisis

Los desafíos técnicos que este tipo de análisis presenta para áreas geográficas como la Bogotana son importantes, por razones climáticas que producen prolongados lapsos de tiempo con altas coberturas nubosas que dificultan la obtención sistemática y periódica de datos radiométricos. Las dificultades en la obtención de imágenes satelitales de alta calidad, con cobertura de nubes no superiores al 3%, constituyeron una restricción importante en la recolección de información. La alta cobertura nubosa

sobre el área de estudio en prolongados periodos de tiempo dificultó la obtención del volumen de datos en alta resolución espacial necesario para un análisis multitemporal estadísticamente robusto con las técnicas presentadas. Por esta razón no fue posible utilizar imágenes satelitales de alta resolución disponibles mediante los sensores Landsat (de 30 metros de resolución por pixel), pues la densidad y periodicidad de datos disponibles no es suficiente. La mayor frecuencia de tomas del sensor MODIS (datos diarios agregados en promedios de 8 y 16 días) permitió un mayor volumen de datos y se optó por esta base de datos, sobre la cual se desarrolló el análisis. De este modo, fue posible identificar tendencias de cambio monotónicas de una forma estadísticamente robusta (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022b). Sin embargo, en áreas con mayor disponibilidad de imágenes Landsat de alta calidad (baja cobertura de nubes), se sugiere emplear este tipo de datos para realizar un análisis con mayor resolución espacial.

El espacio biofísico bogotano y sus tendencias. Mas allá de los mitos

El análisis multitemporal de indicadores radiométricos evidencia los cambios estructurales que ha experimentado el sector norte de Bogotá en términos de sus componentes biofísicos. Este tipo de análisis permite extraer conclusiones científicas validadas en evidencia empírica sobre los procesos de cambio que experimenta la superficie de la tierra y que se construyen utilizando la información radiométrica (espectrográfica) que emite la superficie terrestre y que es capturada por sensores remotos que orbitan el planeta de manera regular almacenando información cuantitativa de manera sistemática. Esté enfoque permite analizar los cambios en series de tiempo consistentes, dada la periodicidad de la información disponible. El método utilizado es verdaderamente multitemporal, es decir, incluye el tiempo como una variable fundamental en los cambios de la superficie terrestre tal como se introduce en Wentz *et al.* (2018) y se aplicó en Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp (2022a, 2022b). La multitemporalidad real se logra al utilizar un gran volumen de imágenes satelitales con técnicas de análisis cuantitativo adecuadas. Es un análisis que permite extraer conclusiones estructurales de los cambios experimentados en un periodo largo de tiempo y difiere de otros tipos de análisis que incluyen solo uno o algunos pocos momentos de toma de datos y que, por esta razón, pueden eventualmente esconder las tendencias estructurales subyacentes. Esto es particularmente importante en el caso de indicadores como la TST, que exhibe una gran variabilidad temporal (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022b). Futuros estudios podrían avocarse al análisis de distintas representaciones temporales de la TST y sus tendencias. Por ejemplo, agregando los datos en series semanales, mensuales o estacionales, lo que permitiría identificar otras tendencias de la TST influenciadas por ciclos temporales específicos. Esto es especialmente importante en el caso de las estaciones del año, las cuales afectan de forma importante la temperatura.

CONCLUSIÓN

El proceso de urbanización pone en jaque los actuales sistemas de gobernanza y planificación con el surgimiento de nuevos patrones de desarrollo que escapan a las estructuras de planificación y ordenamiento territorial heredadas del siglo pasado, y construidas fundamentalmente sobre percepciones estéticas y consideraciones economicistas más que sobre fundamentos científicos y ecológicos. Es necesario incorporar nuevas formas de planificación que no solo reconozcan y cuantifiquen, sino que principalmente incorporen los diversos valores de la naturaleza en la planificación urbana, de manera conceptualmente clara y operativamente robusta, idealmente sobre la base de indicadores biofísicos espacialmente explícitos. Este desafío se enfrenta con profundas barreras disciplinares que requieren la reconceptualización e integración de las disciplinas que diseñan y proyectan la ciudad, con las que la estudian desde el punto de vista científico. Esta integración requiere ser conceptual y operacional para romper las brechas que existen entre ambos mundos y que hoy siguen corriendo en paralelo. Para que una transformación de esta magnitud pueda ocurrir, se requieren importantes

cambios en los sistemas educativos y curriculares existentes en las universidades a fin de educar a los futuros profesionales del desarrollo urbano con los conocimientos que demanda el siglo XXI, específicamente en relación con la revalorización práctica y operacional de la naturaleza y su inmensa contribución a nuestro bienestar a fin de dotarlos con herramientas prácticas que les permitan valorar esta contribución al bienestar humano.

El presente análisis con sensores remotos proporciona una descripción científica del desarrollo urbano norte de Bogotá que puede ayudar a construir una toma de decisiones basadas en evidencia empírica, más allá de percepciones asistemáticas propensas a sesgos.

El análisis con sensores remotos permite extraer dos conclusiones importantes. La primera es que las tendencias del espacio biofísico de los polígonos POZN y RTVH son prácticamente equivalentes. Esto tanto para los indicadores de temperatura de superficie como de intensidad de la vegetación. Esta es una conclusión sorprendente, si se considera que ambas áreas poseen un espíritu y una normativa completamente distinta, las que a la luz de la evidencia que presenta este trabajo han quedado subyugadas a las tendencias estructurales de desarrollo urbano experimentadas por el vector norte de Bogotá.

La segunda conclusión es que estas tendencias son de incremento para las temperaturas y de disminución de la intensidad de la vegetación. Esto significa que el proceso de urbanización instalado en el sector norte de Bogotá es el determinante de las tendencias del espacio biofísico observadas, más allá de las figuras de protección legales que allí existen, como es el caso de la RTVH, la que no ha sido efectiva en la protección de las características ecológicas que ameritan su existencia. Esto deja en evidencia que mecanismos actuales tales como la simple declaración de sitios como reservas naturales no es suficiente para controlar sus cambios biofísicos cuando estos se ven influenciados por las dinámicas del desarrollo urbano. Generar información empírica y espacialmente explícita que evidencie las tendencias efectivas del espacio biofísico es el primer paso hacia nuevas soluciones que se ajusten a los retos actuales del desarrollo urbano.

AGRADECIMIENTOS

PROBOGOTÁ REGIÓNw es el titular de los derechos de propiedad intelectual del proyecto de investigación que origino los resultados presentados en esta publicación.

REFERENCIAS

Alberti, M. (2005). The effects of urban patterns on ecosystem function. *International Regional Science Review*, *28*(2), 168–192. https://doi.org/10.1177/0160017605275160

Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, *27*(2), 93–115. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x

Artmann, M., Inostroza, L. y Fan, P. (2019a). Urban sprawl, compact urban development and green cities. How much do we know, how much do we agree? *Ecological Indicators*, *96*, 3–9. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.059

Artmann, M., Inostroza, L. y Fan, P. (2019b). Urban sprawl, compact urban development and green cities. How much do we know, how much do we agree? *Ecological Indicators*, *96*. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.059

Azunre, G. A., Amponsah, O., Peprah, C., Takyi, S. A. y Braimah, I. (2019). A review of the role of urban agriculture in the sustainable city discourse. *Cities*, *93*, 104–119. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.04.006

Baró, F., Gómez-Baggethun, E. y Haase, D. (2017). Ecosystem service bundles along the urban-rural gradient: Insights for landscape planning and management. *Ecosystem Services*, *24*, 147–159. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.02.021

Barrera, F. De, Henríquez, C., Coulombié, F., Dobbs, C. y Salazar, A. (2018). Periurbanization and conservation pressures over remnants of native vegetation : impact on ecosystem services for a Latin-American capital city. *Change and Adaptation in Socio-Ecological Systems*, *4*(1), 21–32.

Corporación Autónoma Regional (CAR) de Cundinamarca. (2011). Acuerdo 011 del 19 de julio del 2011, por medio del cual se declara la Reserva Forestal Regional Productora Del Norte De Bogotá "Thomas van der Hammen", se adoptan unas determinantes ambientales para su manejo y se dictan otras disposiciones.

Clinton, N., y Gong, P. (2013). MODIS detected surface urban heat islands and sinks: Global locations

and controls. *Remote Sensing of Environment*, *134*, 294–304. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.008

Daunt, A. B. P., Inostroza, L. y Hersperger, A. M. (2021). The role of spatial planning in land change: An assessment of urban planning and nature conservation efficiency at the southeastern coast of Brazil. *Land Use Policy*, *111*(xxxx). https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105771

Deng, J. S., Wang, K., Hong, Y. y Qi, J. G. (2009). Spatio-temporal dynamics and evolution of land use change and landscape pattern in response to rapid urbanization. *Landscape and Urban Planning*, *92*(3–4), 187–198. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.05.001

Gomez-Rodriguez, D., y Beltrán-Vargas, J. (2018). Modelación Dinámica de Bienes y Servicios Ecosistémicos. *Colombia Forestal*, *21*(2), 188–204. revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/index

Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X. y Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, *319*(5864), 756–760. https://doi.org/10.1126/science.1150195

Huang, J., Lu, X. X. y Sellers, J. M. (2007). A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. *Landscape and Urban Planning*, *82*(4), 184–197. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.010

Huang, K., Li, X., Liu, X. y Seto, K. C. (2019). Projecting global urban land expansion and heat island intensification through 2050. *Environmental Research Letters*, *14*(11). https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4b71

Hurtado, L., Pulido, D. M., y Lizarazo, A. (2020). Analisis Multitemporal en la Cobertura del Suelo para la Reserva Forestal Thomas Van der Hammen - Bogota. *Revista Geografica de Chile Terra Australis*, *56*, 71–86.

Inostroza, L. (2017). Informal urban development in Latin American urban peripheries. Spatial assessment in Bogotá, Lima and Santiago de Chile. *Landscape and Urban Planning*, *165*. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.03.021

Inostroza, L. (2022). Biodiversity and Region: A Unitary System. The Paradigm Shift in 21st Century Urban Development. En M. A. Mejia y J. D. Amaya-Espinel (Eds.), *BIODIVERCITIES BY 2030. Transforming Cities with Biodiversity*. Instituto de Investigaciones de Recursos Biologicos Alexander von Humboldt.

Inostroza, L., Baur, R. y Csaplovics, E. (2013). Urban sprawl and fragmentation in Latin America : A dynamic quantification and characterization of spatial patterns. *Journal of Environmental Management*, *115*, 87–97.

Inostroza, L., König, H. J., Pickard, B. y Zhen, L. (2017). Putting ecosystem services into practice: Trade-off assessment tools, indicators and decision support systems. *Ecosystem Services*, *26*. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.07.004

Jones, L., Reis, S., Hutchins, M., Miller, J., He, B., Xu, C., Hagen-zanker, A., Yu, J., Lin, T., Jia, H., Seifert-d, I., Loiselle, S., Russel, D., Sabel, C. E., Fletcher, D., Fitch, A. e Inostroza, L. (2022). Airsheds, watersheds and more – The flows that drive intra-extra-urban connections , and their implications for nature-based solutions (NBS). *Nature-Based Solutions*, *2*(October). https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100040

Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods*. Griffin.

Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L., Falfán, I. y MacGregor-Fors, I. (2022). Too hot to handle? On the cooling capacity of urban green spaces in a Neotropical Mexican city. *Urban Forestry & Urban Greening*, *74*, 127633. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127633

Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L. y Zepp, H. (2020). The global homogenization of urban form. An assessment of 194 cities across time. *Landscape and Urban Planning*, *204*. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103949

Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L. y Zepp, H. (2022a). Does urban climate follow urban form? Analysing intraurban LST trajectories versus urban form trends in 3 cities with different background climates. *Science of the Total Environment*, *830*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154570

Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L.y Zepp, H. (2022b). Intraurban heterogeneity of space-time land surface temperature trends in six climate-diverse cities. *Science of the Total Environment*, *804*, 150037. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150037

Lemoine-Rodríguez, R., MacGregor-Fors, I. y Muñoz-Robles, C. (2019). Six decades of urban green change in a neotropical city: a case study of Xalapa, Veracruz, Mexico. *Urban Ecosystems*, *22*(3), 609–618. https://doi.org/10.1007/s11252-019-00839-9

Lemoine-Rodríguez, R. y Mas, J.-F. (2020). *LSTtools: An R package to process thermal data derived from Landsat and MODIS images* (v0.0.2). https://doi.org/10.5281/zenodo.4010732

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. y Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University press. https://doi.org/10.1017/9781139016476

Palme, M., Inostroza, L. y Salvati, A. (2018). Technomass and cooling demand in South America: A superlinear relationship? *Building Research and Information*, *46*(8), 864–880. https://doi.org/10.1080/09613218.2018.1483868

Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Ottle, C., Bréon, F. M., Nan, H., Zhou, L. y Myneni, R. B. (2012). Surface urban heat island across 419 global

big cities. *Environmental Science and Technology*, *46*(2), 696–703. https://doi.org/10.1021/es2030438

R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing* (3.6.1). R Foundation for Statistical Computing.

Rozas-Vásquez, D., Fürst, C., Geneletti, D. y Muñoz, F. (2017). Multi-actor involvement for integrating ecosystem services in strategic environmental assessment of spatial plans. *Environmental Impact Assessment Review*, *62*, 135–146. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.09.001

Salas-Pérez, C., Coy-Castro, D., Acuña-Ramírez, K., Páez-Cuervo, L. y Upegui, E. (2019). Crecimiento urbano e impermeabilización del suelo alrededor de la Reserva Forestal Thomas van der Hammen, en la ciudad de Bogotá. *Ambiente y Desarrollo*, *23*(44). https://doi.org/10.11144/javeriana.ayd23-44.cuis

Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, *63*(324), 1379–1389. https://doi.org/10.2307/2285891

Seto, K. C., Solecki, W. D. y Griffith, C. A. (2016). *The Routledge Handbook of Urbanization and Global Environmental Change*. Routledge.

United Nations. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. UN.

Wentz, E. A., York, A. M., Alberti, M., Conrow, L., Fischer, H., Inostroza, L., Jantz, C., Pickett, S. T. A., Seto, K. C. y Taubenböck, H. (2018). Six fundamental aspects for conceptualizing multidimensional urban form: A spatial mapping perspective. *Landscape and Urban Planning*, *179*. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.07.007

Zepp, H., Falke, M., Gunther, F., Gruenhagen, L., Inostroza, L., Zhou, W., Huang, Q. y Dong, N. (2021). China's Ecosystem Services Planning: Will Shanghai Lead the Way? *Erdkunde*, *75*(4), 271–293.

Zewdie, W., Csaplovics, E. y Inostroza, L. (2017). Monitoring ecosystem dynamics in northwestern Ethiopia using NDVI and climate variables to assess long term trends in dryland vegetation variability. *Applied Geography*, *79*. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.12.019

Zhong, J., Jiao, L., Droin, A., Liu, J., Lian, X. y Taubenböck, H. (2022). Greener cities cost more green: Examining the impacts of different urban expansion patterns on NPP. *Building and Environment*, 100358. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109876

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60784 • ARTÍCULOS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60784
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Trayectoria de la cubierta vegetal de la Sierra de Guadalupe, Valle de México (1994-2019)

Trajectory of the vegetation cover at Sierra de Guadalupe, Valle de México (1994-2019)

Erick Eduardo Mendoza Ruiz,* Dante Arturo Rodríguez Trejo,** Diódoro Granados Sánchez***
y Alejandro Corona Ambriz¶

Recibido: 28/08/2023. Aceptado: 17/01/2024. Publicado: 21/03/2024.

Resumen. La Sierra de Guadalupe es el último reducto forestal al norte de la Ciudad de México. Para restaurar su cubierta vegetal, o al menos manejarla, es necesario conocer su desarrollo. Es un sistema con unidad por donde transita la energía en formas diferentes según la vegetación, que es el resultado más evidente de condiciones litológicas, edafológicas, climáticas, geográficas e históricas con intervención humana de diferentes tipos.

Se describe el comportamiento de cubierta vegetal en la Sierra de Guadalupe en las últimas décadas a partir de la comparación del área y el perímetro de los mosaicos. También se aplicaron cuatro índices paisajísticos: un enfoque matriz-parche-corredor (Puyravaud, 2003), que expresa el cambio de la cobertura vegetal a partir de la ecuación del interés compuesto (Mikels, 2003), la detección de la fragmentación por la cercanía entre los centros de los mosaicos de cada tipo de vegetación; la relación de la disección de un paisaje, a partir de la similitud de los mosaicos, con círculos de la misma área (Bowen y Burgess, 1981), expresada por la posibilidad de que un organismo se encuentre a otro de su especie estando en sitios aleatorios del paisaje (Jaeger, 2000). Con el análisis de la matriz de transición de Markov se observa la sucesión ecológica de algunos mosaicos y también el cambio de uso de suelo forestal a urbano en la mayor parte de la Sierra. El índice de autocorrelación de Moran permite evaluar qué tan agrupados están los parches, o, dicho de otra manera, qué tan constante es el flujo de energía a través del paisaje.

Para determinar los mosaicos se compararon imágenes de 1994 y 2019 de la Sierra de Guadalupe, trazando a mano alzada el perímetro de cada mosaico. Se hicieron visitas de campo a la zona de estudio para relacionar la textura y posición de cada mosaico.

Se definió la Sierra de Guadalupe como un conjunto de microcuencas con una extensión de 16 813 ha. En 1994, estaban urbanizadas 8698 ha, para 2019 el concreto había cubierto 1741 ha más. Se han establecido 540 ha de bosque y plantaciones, además de las que 1670 ha que ya existían.

* Estudiante de la Maestría en Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, 56230, Estado de México, México. Roles de autoría: conceptualización, software, investigación, curaduría de datos, redacción – revisión y edición, visualización. ORCID: 0000-0003-3145-8092. Email: eredmendozaru@gmail.com
** Profesor investigador. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, 56230, Estado de México, México. Roles de autoría: metodología, análisis formal, redacción – revisión y edición, visualisación, supervisión. ORCID: 0000-0002-1407-8365. Email: dantearturo@yahoo.com. Autor de correspondencia.
*** Profesor investigador. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, 56230, Estado de México, México. Roles de autoría: validación, redacción – revisión y edición. ORCID: 0000-0002-6739-8573. Email: didorog@hotmail.com
¶ Profesor investigador. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, 56230, Estado de México, México. Roles de autoría: análisis formal, redacción – revisión y edición. ORCID: 0000-0003-0005-7480. Email: acoronaa@chapingo.mx

El bosque de encino se ha extendido por las cañadas sobre 74 ha. La comunidad vegetal más importante en cuanto a extensión hacia 1994 era el matorral xerófilo, cuando representaba 16.8% de la Sierra. En 2019, el matorral xerófilo con pastizal tenía una extensión de 12.7% del total. El encinar cerrado o abierto, ecosistema más conservado y de crecimiento maduro, cubría 334 ha en 1994 y para 2019 alcanzó 410 ha. En cuanto a las masas forestales artificiales, las plantaciones de eucalipto han sido las más extendidas, pues en 1994 representaban 3.7% y 5.2% en 2019.

El índice de Puyvaraud (2003) reveló un incremento de la masa forestal de 1.05% por año. Por supuesto, el dosel de la masa forestal no aumenta realmente a ese ritmo, más bien dichas masas se establecieron hasta que fueron visibles en imagen satelital como un dosel establecido. El índice de cohesión de Jaeger (2000) indica nula probabilidad (tanto en 1994 como en 2019) del encuentro de dos organismos de la misma especie hipotéticamente dispuestos al azar en el paisaje. El índice de disección (Bowen y Burgess, 1981) arroja un valor de 5.84% en 1994 y de 8.42% en 2019, lo que indica que el paisaje se ha vuelto más disperso en 3.42% con respecto a la similitud de un círculo de la misma área que todos los parches, es decir, se ha vuelto de un grano más fino.

La matriz de Márkov revela las transiciones más representativas (descartando las transiciones a urbanización). Los pastizales se volvieron matorral xerófilo; los matorrales se convirtieron en bosque heterogéneo y encinar; el matorral xerófilo en plantaciones de eucalipto, los matorrales y pastizales en masas de pirul, y los matorrales y pastizales en bosquetes artificiales de pino, casuarina y cedro blanco. Se encontró una correlación espacial de 0.5 para 1994 y de 0.06 para 2019.

En general, la cubierta vegetal se ha visto afectada casi en su totalidad por causas humanas, sea con impacto ambiental negativo, como la construcción de colonias, o impacto positivo, como las reforestaciones. Los índices paisajísticos indican que, salvo las plantaciones de eucalipto, la mayoría de las comunidades forestales se han vuelto mosaicos pequeños, dispersos, y con poca área núcleo, configurando un paisaje de grano fino; asimismo, la retracción de la frontera forestal ha promovido mayor fragmentación.

Palabras clave: fragmentación, índices paisajísticos, paisaje, restauración ecológica. trayectoria del paisaje.

Abstract. The Sierra de Guadalupe is the last forest redoubt north of Mexico City. In order to restore its vegetation cover, or at least manage it, it is necessary to understand its development. It is a system with unity through which energy transits in different forms depending on the vegetation, which is the most evident result of lithological, edaphological, climatic, geographical and historical conditions with different types of human intervention.

The behaviour of vegetation cover in the Sierra de Guadalupe in recent decades is described by comparing the area and perimeter of the mosaics. Four landscape indices were also applied: a matrix-patch-corridor approach (Puyravaud, 2003), which expresses the change in vegetation cover based on the equation of compound interest (Mikels, 2003), the detection of fragmentation by the proximity between the centres of the mosaics of each vegetation type; the relationship of the dissection of a landscape, based on the similarity of the mosaics, with circles of the same area (Bowen and Burgess, 1981), expressed by the possibility of an organism encountering another of its species at random sites in the landscape (Jaeger, 2000). The Markov transition matrix analysis shows the ecological succession of some mosaics and also the change from forest to urban land use in most of the Sierra. Moran's autocorrelation index allows us to assess how clustered the patches are, or, in other words, how constant the energy flow across the landscape is.

To determine the mosaics, 1994 and 2019 images of the Sierra de Guadalupe were compared and the perimeter of each mosaic was drawn freehand. Field visits were made to the study area to relate the texture and position of each mosaic.

The Sierra de Guadalupe was defined as a set of microwatersheds with an extension of 16 813 ha. In 1994, 8698 ha were urbanised, by 2019 concrete had covered a further 1741 ha. 540 ha of forest and plantations have been established, in addition to the 1670 ha that already existed. The oak forest has spread along the ravines over 74 ha. The most important plant community in terms of extent in 1994 was xerophytic scrub, when it represented 16.8% of the Sierra. In 2019, xerophytic scrub with grassland had an extension of 12.7% of the total. Closed or open oak woodland, the most conserved and mature growing ecosystem, covered 334 ha in 1994 and by 2019 it reached 410 ha. As for artificial forest stands, eucalyptus plantations have been the most widespread, accounting for 3.7% in 1994, but 5.2% in 2019.

The Puyvaraud index (2003) revealed an increase in forest mass of 1.05% per year. Of course, the forest stand canopy does not actually increase at that rate, rather forest stands became established until they were visible on satellite imagery as established canopy. Jaeger's (2000) cohesion index indicates zero probability (both in 1994 and 2019) of encountering two organisms of the same species hypothetically randomly arranged in the landscape. The dissection index (Bowen and Burgess, 1981) yields a value of 5.84% in 1994 and 8.42% in 2019, indicating that the landscape has become more sparse by 3.42% with respect to the similarity of a circle of the same area as all patches, i.e. it has become finer grained.

The Markov matrix reveals the most representative transitions (discarding transitions to urbanisation). Grasslands became xerophytic scrubland; scrubland became heterogeneous forest and oak woodland; xerophytic scrubland became eucalyptus plantations, scrubland and grassland became stands of pirul, and scrubland and grassland became artificial copses of pine, casuarina and white cedar. A correlation of 0.5 was found for 1994 and 0.06 for 2019.

In general, vegetation cover has been almost entirely affected by human causes, either with negative environmental impact, such as the construction of colonies, or positive impact, such as reforestations. Landscape indices indicate that, with the exception of eucalyptus plantations, most forest communities have become small, scattered mosaics

with little core area, forming a fine-grained landscape, and the retraction of the forest frontier has promoted further fragmentation.

Keywords: fragmentation, landscape indices, landscape, ecological restoration, landscape trajectory.

INTRODUCCIÓN

La Sierra de Guadalupe es el último reducto forestal al norte de la ciudad de México, enclavada en medio de una de las masas urbanas más grandes del mundo. En 1992, el gobierno del entonces Distrito Federal y del Estado de México gestionaron un préstamo con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en la Cumbre de la Tierra, celebrada en Rio de Janeiro (Villavicencio, 2007), que se aplicaron en el muro ecológico y reforestaciones. Este trabajo explica lo que sucedió con aquellos esfuerzos. Entender la trayectoria del paisaje es fundamental para lograr la restauración ecológica (Clewell y James, 2004). Este estudio presenta elementos para la planeación conceptual del manejo de los recursos naturales en la Sierra, concierne a las autoridades, así como para los grupos voluntarios que se esfuerzan en los trabajos para su restauración.

Conocer con exactitud la trayectoria histórica de un paisaje tan degradado como la Sierra de Guadalupe es una tarea compleja (De Torre y Magro, 2018) y solo posible en el intervalo entre la fotografía aérea más antigua y útil y la más reciente. Adoptar en conjunto, sociedad y Estado, un proyecto de restauración es la única manera de lograr un paisaje que preste los imprescindibles servicios ambientales que constituirán, en un futuro cercano, la resiliencia de la población urbana que vive en la Sierra de Guadalupe ante el calentamiento global. Debido a la crisis climática, la Sierra de Guadalupe se vuelve estratégica en cuanto a recursos fundamentales para la sociedad, como lo es el agua. Los pozos en la Ciudad de México abaten sus niveles precipitadamente. Para asegurar los servicios ambientales del futuro, hay que entender cómo evolucionó el paisaje.

A partir de entonces, el sistema lacustre de la Sierra de Guadalupe fue desapareciendo progresivamente, como dejan testimonio las pinturas de José María Velasco (1876-1890). La vegetación que se puede observar desde la colonia española hasta inicios de 1980 indica un claro aumento de la vegetación exótica, relegando a especies nativas, reminiscentes de lo que alguna vez debe haber sido bosque caducifolio tropical (Calderón de Rzedowski y Rzedowski, 2005). Las acciones de restauración sin continuación o coordinación ha resultado en un paisaje de grano fino y muy complejo. El objetivo del estudio es describir el desarrollo histórico de la cubierta vegetal en la Sierra de Guadalupe a partir de distintas expresiones matemáticas que miden indirectamente el flujo de la energía entre la matriz y los mosaicos de la Sierra (teoría de percolación), bajo un enfoque matriz-parche.

METODOLOGÍA

La Sierra de Guadalupe es el conjunto de 27 microcuencas exorreicas cuyas partes más bajas se encuentran entre la cota 2200 a 2375 msnm. Está compuesta por cincuenta elevaciones, siendo la de menor altitud el cerro Lomas de Cartagena, con 2340 msnm, y el más alto, el pico de los Tres Padres, que alcanza los 3000 msnm. El área de estudio tiene una extensión de 16 813 ha (Figura 1).

Se encuentra en el eje Neovolcánico transversal, al norte del valle del Anáhuac. La precipitación fue de 591 a 695 mm entre 1951 y 2010, con una temperatura media anual de 23.8 a 24.6° C (CONAGUA, 2010). Su fórmula climática es C(w0)(w) (Vela-Correa y Flores-Román, 2004). Es probable que en las zonas más altas de la Sierra de Guadalupe haya mayor precipitación, y menor temperatura.

Se emplearon imágenes del satélite Sentinel 2ª del 12 de febrero de 2021 (Sentinel 2ª, 2021), que durante la temporada de sequía no detectan del todo plantas anuales y matorrales caducifolios, pues para entonces ya han tirado sus hojas, mientras que los árboles perennes (coníferas, eucaliptos, casuarinas, encinos) conservan su verdor. Los encinares componen las masas forestales naturales de la Sierra de Guadalupe. Al generar el NDVI de estas imágenes, resultan reconocibles tales masas; con esta herramienta se trazaron los polígonos,

rectificando con las imágenes WordView 3 que Google Earth rescata de INEGI (2019), encerrando en un polígono las comunidades que más se parecen por composición y densidad (QGIS, 2023). En esta capa vectorial se incluyeron también pastizales y matorrales.

Los polígonos se ajustaron a las ortofotos de 1994 que ofrece INEGI (1994) y se extrajeron los que correspondían a masas forestales. De esta manera, se generó la base de datos necesaria para analizar la trayectoria de la cubierta vegetal, natural y artificial de la Sierra de Guadalupe. Comparando la extensión de los nuevos parches, se encontró la tasa de cambio para cada tipo de comunidad y la extensión promedio de dicho cambio. Se considera que un paisaje con parches pequeños y numerosos separados entre sí favorece la biodiversidad vegetal, pero no permiten el desarrollo de fauna que requiere grandes extensiones para desarrollarse (Myers, 2006). Además, un patrón de grano grueso es más conveniente para la Ciudad de México por los servicios ambientales que prestaría en términos de captación, filtración y retención de agua (Pretzsch *et al.*, 2008), cuya escasez causa problemas en las comunidades urbanas que rodean la Sierra de Guadalupe, entre otras.

Una vez identificadas todas las comunidades vegetales, es decir, los parches del paisaje, se discernieron las comunidades a someter al análisis de fragmentación. Se sumaron las áreas de cada categoría y en total para encontrar las diferencias al inicio y final del periodo de estudio. De la misma forma se encontró la extensión y perímetro promedio de cada una de las categorías de comunidades vegetales que se eligieron. Usando el área de estas categorías se estimó la distribución horizontal de las comunidades. En cuanto a la distribución vertical, fue necesario extraer los valores del modelo de elevación digital correspondiente (INEGI, 2022), a partir de la capa vectorial de los bosquetes, clasificándolos según su comunidad vegetal. Después se hizo la gráfica en R (R Core Team, 2020) para

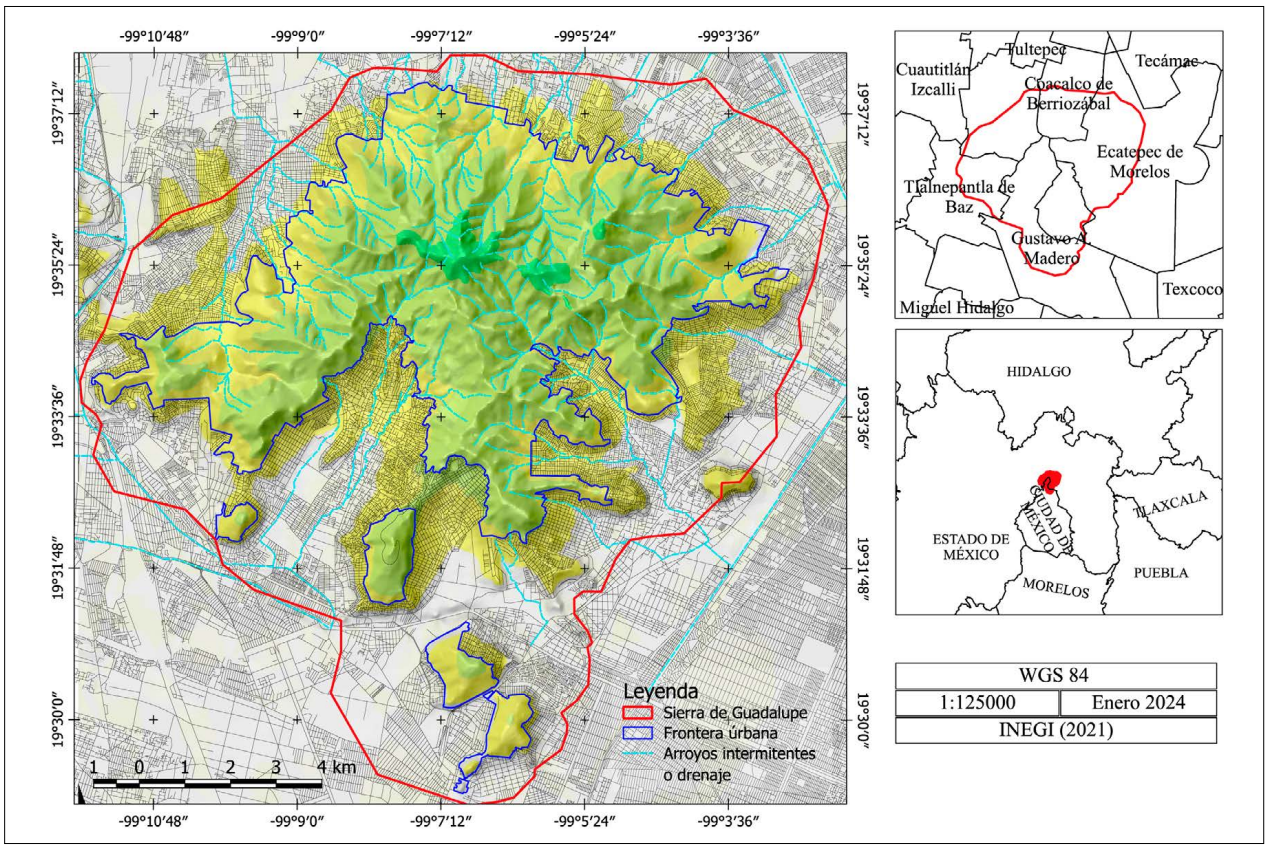


Figura 1. Ubicación de la Sierra de Guadalupe.

visualizar los intervalos. La escala manejada para la cartografía fue 1:125 000.

El presente estudio analiza la dinámica de la cubierta vegetal en el área de estudio, bajo el enfoque matriz-parche-corredor. Para ello, los índices que se usaron fueron: media de cambio anual, razón de cambio (Puyravaud, 2003), índice de fragmentación (Gurruxtaga, 2003), índice de disección (Bowen y Burgess, 1981), índice de cohesión (Jaeger, 2000), índice de autocorrelación (Zhu *et al.*, 2022), y matriz de transición de Markov (Ching *et al.*, 2013).

Para estimar la media del cambio en los mosaicos, se aplicó en la calculadora de campos (QGIS, 2023):

$$tc = \frac{A_2 - A_1}{t_2 - t_1}$$

Donde: A es el área del mosaico y t el año en que se presentó esa condición, el subíndice 2 indica una fecha más reciente y tc es la media de cambio anual en hectáreas. Razón de cambio de (Puyravaud, 2003):

$$r = \left(\frac{100}{t_2 - t_1}\right) ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$$

Esta representa la razón de interés compuesto (r) con el que han cambiado los mosaicos expresados en porcentaje por año.

El índice de fragmentación (Gurruxtaga, 2003) permitió comparar el paisaje a través del tiempo:

$$F = \frac{A_t}{(n)(Rc)}$$

A_t representa el área total del área de estudio, específicamente el área que correspondía a las zonas no urbanas de la Sierra de Guadalupe en 1994 y 2019, respectivamente. Donde n es el número de parches de cada comunidad, en algunas comunidades los parches en 1994 son igual a cero, para estos no aplica el índice de fragmentación en este periodo, tal es el caso de los cedros blancos y la casuarina. Rc es la dispersión de las manchas, expresada como:

$$Rc = 2dc\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)$$

La expresión dc es la distancia media desde dentro de un mosaico al centro del mosaico más cercano. λ es la densidad media de las manchas, igual al cociente del número de manchas entre la superficie total del área (ha) multiplicado por cien. Esta ecuación no considera el área de los parches, en su lugar utiliza la distancia entre ellos.

El índice de disección (Bowen y Burgess, 1981) relacionó el perímetro de cada parche (Pi) con el perímetro de un círculo cuya área es la misma del parche (Ai), según la siguiente igualdad, que se aplica para el conjunto de todos los mosaicos:

$$DIt = \frac{\sum Pi}{2\sqrt{\pi \sum Ai}}$$

Dicha igualdad fue ajustada a todo el paisaje en porcentaje, s es la superficie no urbana:

$$Dlt\% = (Dlt)\left(\frac{100}{\sqrt{s}}\right)$$

El índice de Cohesión (Jaeger, 2000), es la probabilidad de que dos organismos de la misma especie se encuentren en el sitio de investigación:

$$C = \sum \left(\frac{Ai}{At}\right)^2$$

Donde C es el índice de cohesión, Ai es el área de un parche cuando i tiene rango de uno al número total de parches en todas las categorías y At es área total del paisaje (depende del año).

Este índice aplica a todo el paisaje. Para acercarse aún más a la descripción de la trayectoria de las comunidades vegetales en la Sierra de Guadalupe se empleó el concepto de autocorrelación espacial, que nos permite cuantificar la agrupación de los datos. El estadístico que se usó para este propósito fue el índice de Moran (Zhu *et al.*, 2022):

$$I = \left(\frac{n}{\sum_i \sum_j w_{ij}}\right)\left(\frac{\sum_i \sum_j w_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})}\right)$$

Donde w_{ij} es la matriz de distancias de cada uno de los pixeles, lo que determina si son vecinos o no, x es la observación, i y j corresponde a dos diferentes pixeles, de tal manera que w_{ij} es una matriz cuadrada donde se encuentra la distancia entre cada una de las parejas de pixeles resultantes de la imagen rasterizada del paisaje (anteriormente producida) a una resolución de 100 m por lado de pixel (dando como resultado una matriz cuadrada de más de cuatro millones de elementos), x es el uso de suelo establecido con anterioridad (por ejemplo, para el bosque de encino tiene la categoría 4).

El software R (R Core Team, 2020) cuenta con una librería capaz de calcular el índice de Moran, solo es necesario administrar una matriz con las coordenadas (dos vectores) y la categoría de uso de suelo a la que corresponde el pixel (o la mayoría del pixel). Todas las ecuaciones anteriores permiten estimar cuantitativamente el éxito de los trabajos de restauración.

También se obtuvo la matriz de transición de Markov, que permite entender la sucesión ecológica y transición que se ha presentado en la Sierra de Guadalupe, así como los efectos antropogénicos sobre el paisaje. Dicha matriz determina la probabilidad de que una categoría se transforme en otra (Ching *et al.*, 2013). Se rasterizaron (resolución 5 m por pixel) los archivos vectoriales de uso de suelo de 1994 y 2019, estimando la proporción en la que un uso de suelo cedió su territorio a otro, esto se llama matriz de transición En general, la matriz de transición da cuenta de las sucesiones ecológicas más comunes en la Sierra de Guadalupe, o bien, los cambios antropogénicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hacia 1994 gran parte de la cuenca, la que corresponde a la parte baja y más llana, había sido lotificada y habitada, es muy evidente que la densidad de ese tejido urbano dejaba descubierto el suelo desnudo o residuos de vegetación, que en conjunto representaban un atenuante ambiental en lo que respecta a la recarga hídrica, amortiguamiento de altas temperaturas, calidad del aire, entre otros. En 1994 se estableció el muro ecológico solo del lado correspondiente al otrora Distrito Federal (hoy Ciudad de México), que ha servido para detener parcialmente el avance urbano.

En cuanto a la matriz de la cubierta vegetal, los matorrales han aumentado en densidad, ocupan ahora grandes extensiones dentro de la Sierra de Guadalupe, que pueden considerarse conservadas o recuperadas, han superado los disturbios de las últimas décadas, o bien estos no han pasado por ellas, y por lo tanto prestan más servicios ambientales que aquellos matorrales que se han fragmentado para dar paso a los pastizales, o comparados con los pastizales que no cambiaron su condición. En la Tabla 1 se muestra el porcentaje de uso de suelo correspondiente a cada categoría

El área total del conjunto de microcuencas es de 16 813 ha, por lo tanto, la extensión sin urbanizar es cercana a 8698 ha en la actualidad y fue de 6945 ha en 1994, es decir, que el concreto cubrió 1741 ha más. Es muy importante no perder de vista que dicho fenómeno es una de las razones por la que varios índices paisajísticos indican una tendencia de mayor fragmentación en la actualidad. Los pastizales y matorrales fueron ocupados principalmente por nuevas colonias, mientras que otros pastizales han desarrollado matorrales en manchones o en todo lo que antes era pastizal. Este efecto se puede observar claramente en las escorrentías, donde han promovido matorrales, nopaleras y árboles aislados, y de igual forma, con los matorrales que, en algunos casos, han cedido pequeñas áreas. En la actualidad, se han perdido cerca de 706 ha de matorral y pastizal. Es posible distinguir numerosos nopales entre muchos matorrales, son nopales silvestres envejecidos de los que es muy difícil descifrar la edad, pero es presumible que ya existían en 1994.

La matriz del paisaje de la Sierra de Guadalupe está compuesta por pastizales, matorrales abiertos y cerrados, y en toda ella se encuentran árboles aislados, principalmente de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill, *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh), pirul (*Schinus molle* L.), pero también otras especies como encinos (principalmente *Quercus rugosa* Neé, pero hay varias de este género), o copales (*Bursera cunneata* Schltdl, *Bursera fagaroides* Kunth), entre otras. Hacia 2019 la matriz ocupaba un total de

Tabla 1. Distribución de los usos del suelo y vegetación en la Sierra de Guadalupe.

Uso del suelo y vegetación	1994 (%)	2019 (%)	Δ (%)
1. Tejido urbano continuo	51.73	58.39	6.66
2. Agricultura	3.57	1.19	-2.38
3. Matorral xerófilo	14.55	8.97	-5.58
4. Pastizal	10.08	5.91	-4.17
5. Matorral xerófilo/pastizal	5.75	11.30	5.55
6. Tejido urbano discontinuo	4.16	1.01	-3.15
7. Artefacto	0.24	0.19	-0.05
8. Bosque heterogéneo	0.92	1.33	0.42
9. Bosque heterogéneo abierto con sotobosque de matorral xerófilo	0.64	0.74	0.10
10. Bosque heterogéneo abierto en pastizal	0.28	0.33	0.05
11. Bosque de encino cerrado	1.83	1.96	0.14
12. Bosque de encino abierto con sotobosque de matorral xerófilo-pastizal	0.11	0.45	0.33
13. Plantación cerrada de eucalipto	3.65	5.06	1.41
14. Plantación abierta de eucalipto con sotobosque de matorral xerófilo	0.84	1.10	0.26
15. Plantación abierta de eucalipto con sotobosque de matorral xerófilo-pastizal	0.38	0.55	0.18
16. Bosque natural/ plantación de pirul	0.03	0.41	0.38
17. Bosque natural/ plantación de pirul abierto con sotobosque de matorral xerófilo	0.50	0.79	0.30
18. Bosque natural/ plantación de pirul con sotobosque de matorral xerófilo-pastizal	0.76	0.27	-0.50
19. Plantación de pino	0.005	0.04	0.03
20. Plantación de casuarina		0.01	0.01
21. Plantación de cedro blanco		0.11	0.11
Total		16 813 ha	

Nota: artefacto se refiere a construcciones, minas y basureros.

4400 ha (26% para todas las microcuencas y 63% para el paisaje no urbanizado) y en 1994 fueron 5100 ha (30% para todas las microcuencas y la misma proporción para el paisaje no urbanizado).

En general, el bosque heterogéneo, compuesto principalmente por eucaliptos y pirules, aunque puede contener cualquier otra especie (desde cazahuates *Ipomea murucoides* Roem. et Schult, hasta zapotes blancos *Casimiroa edulis* Llave y Lex*)* se mantuvo constante, porque las zonas que sucedieron hacia las colonias se establecieron sobre los terrenos agrícolas, de pastizal y matorral afectando apenas algunas hectáreas de bosque heterogéneo. En la Sierra de Guadalupe se pueden encontrar árboles de todos los tipos, como araucarias, ceibas (que son sagradas para una religión importante en la Sierra de Guadalupe, denominándolas Palo mayombe), ahuehuetes, aguacates, y muchas más cuya razón de existir es la voluntad de los vecinos, para eso la categoría "bosque heterogéneo", compuesto principalmente de pirul y eucalipto. Sin embargo, aunque existen grandes extensiones de la Sierra donde no se encuentra un solo árbol, la mayor parte de ella sostiene árboles aislados de eucalipto, pirul,

y en menor frecuencia copales, pinos y cazahuates, entre muchos otros.

El encinar representa la comunidad más conservada de la Sierra de Guadalupe y ocupa una extensión importante en la parte más alta, después del cerro del Chiquihuite. Seguramente para 1994 ya existían brinzales de encino en las cañadas, favorecidos por su humedad, pero no se pueden apreciar en las ortofotos de esa época, en un fenómeno parecido al del desarrollo de matorrales. Hacia 2019, ya se observan corredores de encino correspondientes a las cañadas, entre encinar cerrado y encinar abierto, aumentando 78 ha la cubierta con este tipo de bosque.

Las plantaciones de eucalipto son la comunidad (artificial) más importante de la Sierra de Guadalupe si se habla de extensión en cobertura forestal; 27 años antes ya existían 818 ha con plantaciones de eucalipto en diferentes densidades, hoy son cerca de 1128 ha. El pirul se ha establecido por su propia cuenta y también a partir de reforestación; el cambio de uso de suelo indica un aumento en la densidad de las masas abiertas que se observan en 1994 y la aparición de individuos que constituyen masas abiertas donde antes existían matorrales. En las fotos aéreas de 27 años atrás, tan solo se encuentra un bosquete de pino, en el cerro Zacatenco, ahora las masas de pino alcanzan 5.95 ha, además se han establecido nuevas plantaciones de casuarina (2.1 ha) y cedro blanco (14.4 ha). La Figura 2 muestra la comparación de los mosaicos de 1994 y 2019. La ciudad se constituyó en las zonas bajas de las microcuencas, desde la altitud de 2226 hasta 2610 msnm en la actualidad, y para 1994 era desde los 2226 hasta los 2605 msnm. El avance se detuvo en las zonas con más pendiente. La colonia vista hermosa es la que alcanza mayor altitud en la Sierra de Guadalupe.

En la Tabla 2 se observa que la mitad de la cobertura forestal de bosque heterogéneo ocupaba una gran franja de los 2331 a los 2618 msnm, pero se encontraba dispersa hasta los 2800 msnm y desde los 2605 msnm; para 2019, más del 25% del bosque heterogéneo había desaparecido en las altitudes menores a 2423 msnm, casi cien metros más que en 1994, cedidos a nuevas viviendas. Otra diferencia es que las masas abiertas del bosque heterogéneo en 1994 se agrupaban en altitudes de 2331 a 2618 msnm, tanto con sotobosque de matorral xerófilo como masas sin sotobosque (con pastizal), conjuntando 50% de superficie en esas altitudes. En 2019 las plantaciones de eucalipto con sotobosque de matorral ocuparon posiciones más altas en comparación a las plantaciones con pastizal (Tabla 2 y Figura 3).

En la Tabla 2 se lee la altitud de la mitad de los pixeles cubiertos por cada comunidad vegetal. Se puede observar que el cambio en el bosque de encino cerrado es apenas perceptible, en tanto que el bosque de encino abierto se ha extendido por las cañadas. La mitad de las plantaciones de eucalipto cerrado se encontraron muy extendidos en 1994 mientras que en 2019 las reforestaciones posteriores a 1994 las concentraron en una franja más pequeña y baja (2403-2512 msnm).

En la plantación de eucalipto abierto (con matorral xerófilo y pastizal) se observa apenas una pequeña diferencia en la altitud entre 2019 y 1994. La Figura 3 muestra la distribución de las altitudes, donde se observa la totalidad de los datos (no solo los centrales).

Por su parte, las masas de pirul comparten un nicho altitudinal muy parecido a las de eucalipto. Igual que en esas masas forestales, las masas abiertas comparten altitudes ya sea con matorral xerófilo o con pastizal. Por lo demás, las plantaciones de pino, casuarina y cedro blanco se desarrollaron y fueron visibles en las imágenes después de 1994, principalmente pino y cedro blanco ocupan las mismas altitudes que aquellas de otras especies introducidas, eucalipto y pirul. Las masas artificiales de casuarina apenas ocupan dos manchones significativos, aunque se presentan pequeños grupos a lo largo de toda la Sierra, lo mismo sucede con las plantaciones de pino y cedro blanco, que tienen individuos aislados en toda el área de estudio. En la zona, y en general en los bosques de la Ciudad de México, el pastizal limita la regeneración, supervivencia de plantaciones y crecimiento de pinos debido a la competencia que representa (Sierra Pineda *et al.*, 1991).

Tal como se observa en la Figura 3, la cobertura forestal de todas las clases se encuentra en todas las altitudes de la Sierra (salvo los encinares) de una

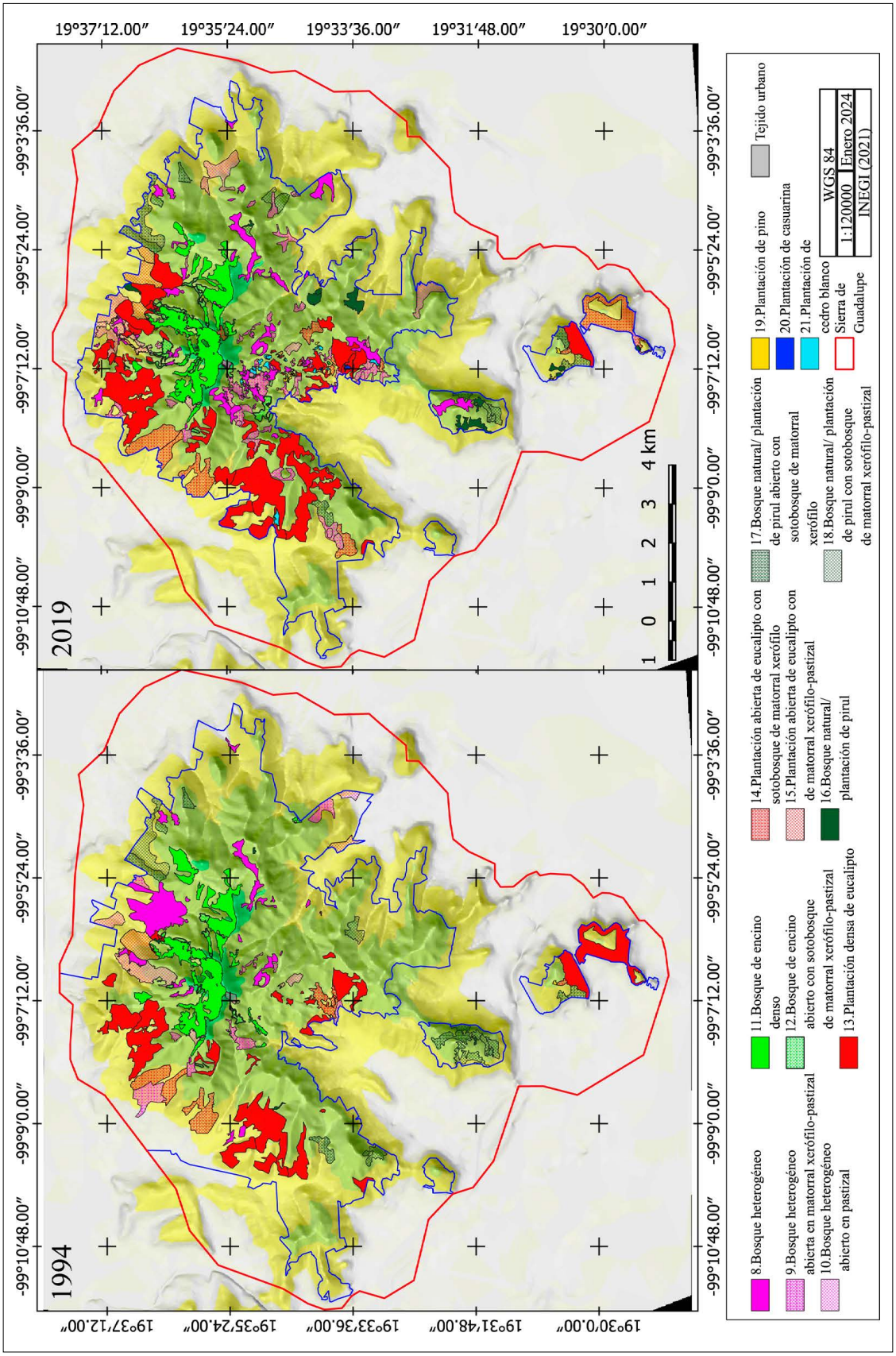


Figura 2. Comparación de los mosaicos del paisaje de la Sierra de Guadalupe, en 1994 y 2019.

Tabla 2. Intervalo de distribución altitudinal de los mosaicos.

Clase dominante	Densidad/Sotobosque	1994 (msnm)		2019 (msnm)	
Bosque heterogéneo	8. Cerrado	2389	2606	2468	2677
	9. Abierto con sotobosque de matorral xerófilo	2331	2561	2480	2614
	10. Abierto en pastizal	2344	2618	2423	2532
Bosque de encino	11. Cerrado	2624	2805	2617	2802
	12. Abierto con sotobosque de matorral xerófilo-pastizal	2562	2631	2528	2630
Plantación de eucalipto	13. Cerrado	2467	2635	2403	2512
	14. Abierto con sotobosque de matorral xerófilo	2364	2428	2372	2394
	15. Abierto con sotobosque de matorral xerófilo-pastizal	2396	2466	2371	2433
Bosque natural/ plantación de pirul	16. Cerrado	2456	2643	2395	2539
	17. Abierto con sotobosque de matorral xerófilo	2369	2518	2370	2477
	18. Abierto con sotobosque de matorral xerófilo-pastizal	2384	2499	2480	2561
Plantación de pino	19. Cerrado	2473	2483	2350	2533
Plantación de casuarina	20. Cerrado			2459	2462
Plantación de cedro blanco	21. Cerrado			2459	2680

manera casi aleatoria, como después se comprobará. Las especies nativas no son raras en la Sierra de Guadalupe, pero se encuentran dispersas en masas forestales con especies exóticas. Solamente el bosque de encino compone una masa forestal con especies nativas, tiene una superficie de 404 ha, y las especies exóticas componen una superficie de 1805 ha. En suma, la Sierra de Guadalupe es un paisaje altamente complejo dominado principalmente por masas artificiales de especies introducidas.

Un sistema tan complejo como la Sierra de Guadalupe tiene distintas dimensiones que pueden medirse, muchas perspectivas que pueden analizarse. Destacan dos hechos fundamentales de los párrafos anteriores: la superficie arbolada ha aumentado en más de 540 ha, principalmente a partir de especies introducidas, y la superficie urbana de la Sierra de Guadalupe devoró más de 1000 ha del paisaje. En la Tabla 3 se muestran las áreas de cada categoría por año, el número de parches (n), el cambio entre estos, la tasa de cambio, entendiendo que las masas forestales que no se observan para 1994 ya existían como brinzales o monte bravo (la mayoría son masas coetáneas), por lo que la tasa de cambio pierde un poco de sentido, pero no pierde su valor como indicador o meta. Algo similar sucede con la razón de crecimiento r de toda la extensión de las masas coetáneas; pues estas ya existían en 1994, pero no se veían.

En otras masas, como el bosque/plantación de pirul, bosque heterogéneo o algunos encinares (mismos que son incoetáneos), la razón de crecimiento r sí tiene aplicación. Sin embargo, en la zona de estudio el crecimiento regular que pueda tener cualquier masa en su cobertura se ve afectado por disturbios (alteraciones antropogénicas). Todas las categorías se

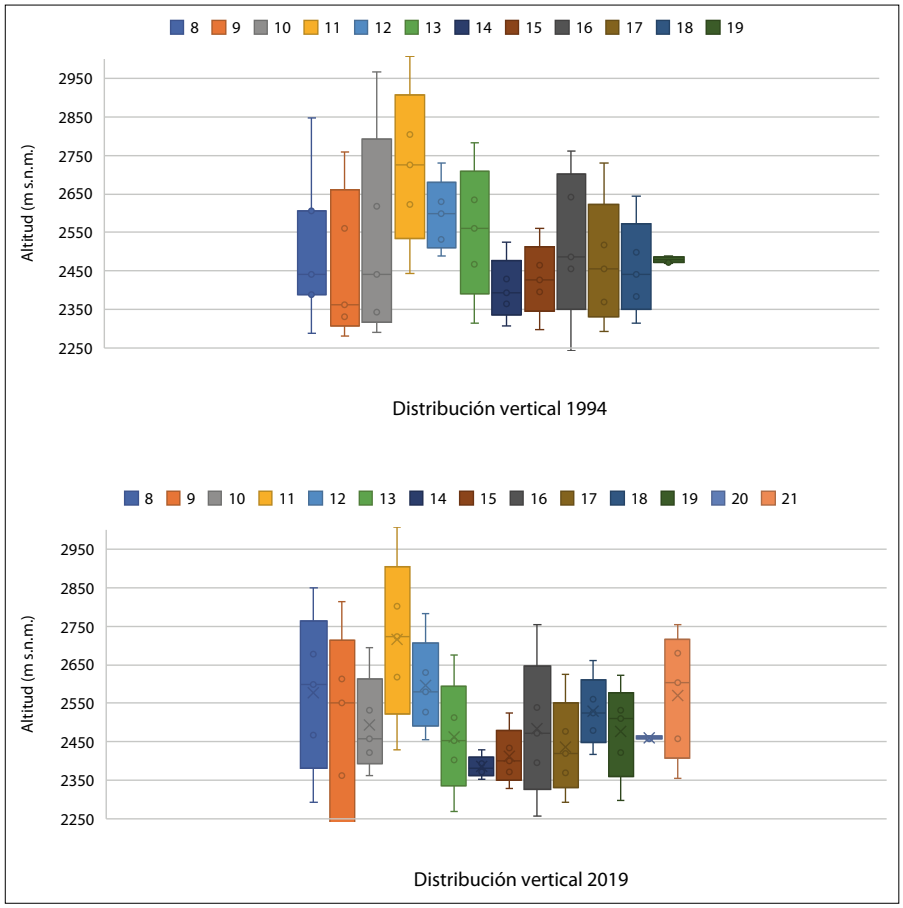


Figura 3. Distribución vertical del uso de suelo en la Sierra de Guadalupe. Nota: los números de la comunidad vegetal son los mismos que se señalan en la Tabla 1.

Tabla 3. Área, número de parches, tasa y razón de cambio.

		1994		2019					
		Área		Área		Diferencia Tc			
Dominante	Densidad/Sotobosque	(ha)	Parches	(ha)	Parches	(ha)	(Parches)	(ha año^{-1})	r (%)
Bosque heterogéneo	Cerrado	153.91	23	223.95	52	70.04	29	2.80	1.56
	Abierto con matorral xerófilo	106.89	12	123.87	38	16.99	26	0.68	0.61
	Abierto con pastizal	47.66	5	63.18	10	15.52	5	0.62	1.17
Bosque de encino	Cerrado	306.86	14	329.65	14	22.80	0	0.91	0.30
	Abierto con matorral xerófilo-pastizal	18.93	9	70.73	20	51.80	11	2.07	5.49
Plantación de eucalipto	Cerrado	613.82	25	851.07	56	237.25	31	9.49	1.36
	Abierto con matorral xerófilo	140.65	7	184.16	12	43.51	5	1.74	1.12
	Abierto con matorral xerófilo-pastizal	63.72	4	93.18	4	29.46	0	1.18	1.58

Tabla 3. Continuación.

		1994		2019					
		Área		Área		Diferencia Tc			
Dominante	Densidad/Sotobosque	(ha)	Parches	(ha)	Parches	(ha)	(Parches)	(ha año^{-1})	r (%)
Bosque natural/ plantación de pirul	Cerrado	4.62	6	68.36	17	63.74	11	2.55	11.23
	Abierto con matorral xerófilo	83.45	9	133.65	12	50.19	3	2.01	1.96
	Abierto con matorral xerófilo-pastizal	128.55	8	44.86	7	-83.70	-1	-3.35	-4.39
Plantación de pino	Cerrado	0.82	1	6.41	15	5.59	14	0.22	8.58
Plantación de casuarina	Cerrado			2.13	2	2.13	2	0.09	
Plantación de cedro blanco	Cerrado			18.24	14	18.24	14	0.73	
	Total	1669.87	123	2213.43	273	543.56	150	21.74	2.55

Nota: Tc corresponde al cambio por año y r razón de cambio (Puyravaud, 2003).

mantuvieron o aumentaron el número de parches salvo el bosque/plantación de pirul abierto con pastizal, no así para el área, pues en varias categorías esta se redujo. Es muy importante anotar que la tasa de cambio más alta es la de las plantaciones de eucalipto, lo cual da una idea del esfuerzo de reforestación que se ejecutó hace décadas. En cuanto a r, un gran desarrollo en el bosque/plantación de pirul cerrado corresponde a masas forestales de pirul abiertas que aumentaron en densidad, lo cual posiblemente se dio sin intervención humana.

Le sigue el bosque de encino abierto, mismo que ha tenido una razón de cambio tan alta por extenderse sobre las cañadas. Se observa el impacto en el bosque de heterogéneo y también la consolidación o desaparición del bosque/plantación de pirul abierto. Salvo esos datos la razón de cambio (Puyravaud, 2003) ronda entre 1.1% y 1.9%. La Tabla 4 presenta el cambio en la forma de los mosaicos (área y perímetro).

Como se observa, el área de los parches en general se ha reducido, esto se debe a que se han establecido numerosos y pequeños manchones forestales. Hay que destacar que tanto las plantaciones de eucalipto, como el bosque de encino, siempre han sido las categorías cuyos mosaicos

Tabla 4. Área, número de parches, tasa y razón de cambio.

		1994		2019		Diferencia	
Clase dominante	Densidad/Sotobosque	Área (ha)	Perímetro (km)	Área (ha)	Perímetro (km)	Área (ha)	Perímetro (km)
Bosque heterogéneo	Cerrado	6.69	1.7	4.31	1.3	-2.38	-0.5
	Abierto con matorral	8.91	1.6	3.26	1.1	-5.65	-0.5
	Abierto con pastizal	9.53	1.8	6.32	1.8	-3.21	0.0

Tabla 4. Continuación.

		1994		2019		Diferencia	
Clase dominante	Densidad/Sotobosque	Área (ha)	Perímetro (km)	Área (ha)	Perímetro (km)	Área (ha)	Perímetro (km)
Encino	Cerrado	21.92	4.0	23.55	4.7	1.63	0.7
	Abierto con matorral-pastizal	2.10	0.9	3.54	1.3	1.43	0.4
Eucalipto	Cerrado	24.55	3.0	15.20	2.1	-9.36	-1.0
	Abierto con matorral	20.09	2.7	15.35	1.9	-4.75	-0.7
	Abierto con matorral-pastizal	15.93	1.8	23.29	2.9	7.37	1.1
Pirul	Cerrado	0.77	0.5	4.02	1.1	3.25	0.6
	Abierto con matorral	9.27	1.7	11.14	1.9	1.86	0.2
	Abierto con matorral-pastizal	16.07	2.6	6.41	1.3	-9.66	-1.2
Pino	Cerrado	0.82	0.4	0.43	0.3	-0.39	-0.1
Casuarina	Cerrado			1.06	0.6	1.06	0.6
Cedro blanco	Cerrado			1.30	0.7	1.30	0.7
	Promedio	11.39	1.89	9.73	1.80	-1.65	-0.09

son más grandes. En general, el perímetro de los mosaicos varía entre uno y tres kilómetros, y ha aumentado apenas unos cientos de metros en las últimas décadas. En cuanto al índice de fragmentación (Gurruxtaga, 2003), Tabla 5, no considera el área de los parches, es un índice que relaciona la distancia entre los parches de una categoría con la extensión del área de estudio, en este caso, la superficie no urbanizada de la cuenca.

El índice de fragmentación (F) es grande cuando se trata de poca fragmentación y pequeño cuando se habla de mayor fragmentación. Reuniendo todos los mosaicos y aplicando este índice, la distancia entre manchones disminuye y, por lo tanto, la fragmentación. Lo más válido es entender el índice por categoría.

En las últimas dos columnas de la Tabla 5, se observa el índice de disección (Bowen y Burgess,

Tabla 5. Índice de fragmentación (Gurruxtaga, 2003) y de disección (Bowen y Burgess, 1981).

		Índice de fragmentación		Índice de disección	
Clase dominante	Densidad/Sotobosque	1994	2019	1994	2019
Bosque heterogéneo	Cerrado	4.28	0.52	13.22	14.78
	Abierto con matorral	2.06	1.2	11.34	12.68
	Abierto con pastizal	11.2	6.4	6.76	7.56
Encino	Cerrado	9.19	6.89	10.91	12.2
	Abierto con matorral-pastizal	12.83	4.16	9	10.06
Eucalipto	Cerrado	1.17	0.37	12.03	13.45
	Abierto con matorral	10.74	4.46	5.18	5.79
	Abierto con matorral-pastizal	35.51	90.71	3.64	4.07

Tabla 5. Continuación.

		Índice de fragmentación		Índice de disección	
Clase dominante	Densidad/Sotobosque	1994	2019	1994	2019
Pirul	Cerrado	9.79	4.35	6.71	7.51
	Abierto con matorral	10.83	5.66	5.83	6.52
	Abierto con matorral-pastizal	16.14	16.55	4.19	4.68
Pino	Cerrado		16.03	6.04	6.76
Casuarina	Cerrado		272.93		2.94
Cedro blanco	Cerrado		7.05		7.3
		11.25	31.24	7.9	8.31

1981), que compara el perímetro del parche con el perímetro de un círculo con la misma área, pues el circulo es la figura geométrica que alberga la mayor área núcleo. Las categorías que se acercan al 100% son las más disectadas. Cabe destacar que el eucalipto aumentó su complejidad junto con el pirul abierto con matorral en un porcentaje muy somero. La Tabla 6 es el concentrado de tablas anteriores, incluye el índice de cohesión (Jaeger, 2000).

En la Tabla 5 casi todas las categorías exhiben mayor fragmentación en la actualidad que hacia 1994. Esto se debe a dos factores: el avance de la mancha urbana y el aumento de polígonos (fragmentación y reforestación). En un paisaje donde existen varios parches dispersos, el flujo de energía se verá modificado entre los mosaicos (Wu, 2009), independientemente del área de estos (Gurruxtaga, 2003). Es muy importante acompañar este índice con información de cambio de uso de suelo, porque es contraintuitivo que un paisaje más reforestado esté más fragmentado. La bondad de las ecuaciones consiste en que pueden detectar la fragmentación del paisaje entendiéndolo como un concepto dentro de la percolación, ofreciendo un panorama claro sobre los disturbios del paisaje (Farina, 2006), como son los incendios forestales.

Tabla 6. Cambios totales de la masa forestal de la Sierra de Guadalupe.

	1994	2019	Diferencia
Área total bosquetes (ha)	1669.87	2213.43	543.56
Área total zona forestal (ha)	8686	6945	-1741.00
F	0.19	0.04	-0.15
C	0.01	0.01	
Dit%	20.18	31.03	
Incremento medio			22.65
r			0.0117

Nota: F es el índice de fragmentación (Gurruxtaga, 2003), C es el índice de cohesión (Jaeger, 2000). Dit% el índice de disección (Bowen y Burgess, 1981) y r la tasa de crecimiento (Puyravaud, 2003).

Las políticas estatales de reforestación establecieron extensas masas de eucalipto, mientras que los esfuerzos posteriores, incluyendo los de la sociedad civil, han establecido pequeñas masas forestales. Conforme al índice de fragmentación (Gurruxtaga, 2003), se detecta que las pequeñas reforestaciones han promovido la fragmentación en la Sierra de Guadalupe, aunque esto no implica necesariamente que sea perjudicial para el paisaje, pero es necesario tenerlo en cuenta para el manejo de sus recursos naturales. Sería mejor ir estableciendo reforestaciones sucesivas de forma aledaña para ir aumentando la superficie que esta única masa artificial va cubriendo.

El índice C es la probabilidad de encuentro de dos organismos posicionados aleatoriamente en el paisaje. Tal como se observa, la probabilidad es nula, tanto para 1994 como actualmente.

También se observa el promedio del índice de cohesión (Dit%) con la ligera variación de la que se habló en el párrafo anterior. Ahora, con celdas del paisaje más pequeñas aún, la matriz de transición de Markov se muestra en la Tabla 7. Destacan las siguientes transiciones, algunas relacionadas con sucesiones ecológicas y otras con influencia antropogénica. La probabilidad de transición en la Tabla 7 se refiere a la superficie.

Tejido urbano discontinuo a tejido urbano continuo. El tejido urbano continuo se consolidó completamente sobre el tejido urbano discontinuo de 1994. Esta transición tuvo lugar, en su mayoría, en el norte de la Sierra de Guadalupe, donde existieron grandes extensiones de agricultura y tejido discontinuo, ahí no se levantó muro ecológico

Pastizal a matorral. La matriz del paisaje que está compuesta por matorral y matorral con pastizal, se mantienen sin cambios en más de la mitad de las ocasiones, mientras que el pastizal sucedió a matorral con pastizal en 46%.

Matorral a bosque heterogéneo. El bosque heterogéneo cerrado se estableció en un 30% sobre matorrales, el bosque heterogéneo abierto con sotobosque de matorral lo hizo en un 59%. El 36% de bosque heterogéneo abierto en pastizal se estableció sobre matorral-pastizal.

Masas de encino. El encinar denso no presentó cambios significativos. En cuanto al encinar abierto con matorral-pastizal, se desarrolló casi por partes iguales en pastizales y matorrales debido a las acciones de restauración y a que los encinos han aprovechado las cañadas, dada la mayor humedad con la que cuentan ahí. Un 12% del nuevo encinar abierto con sotobosque de matorral-pastizal se estableció en el bosque heterogéneo abierto. El bosque heterogéneo puede proporcionar las condiciones suficientes para suceder al encinar.

Matorral a plantación de eucalipto. La plantación de eucalipto fue desarrollada como una masa abierta o cerrada, sobre los páramos que eran matorral, pastizal o matorral-pastizal.

Bosque/plantación de pirul. Un 60% de las masas cerradas de pirul eran masas abiertas con matorral-pastizal. Un tercio de las masas abiertas de pirul con matorral xerófilo proviene de masas abiertas de pirul con pastizal. Más de la mitad de la extensión de las masas abiertas de pirul, con matorral xerófilo-pastizal en el sotobosque se establecieron donde antes había matorral xerófilo, o matorral xerófilo-pastizal

Plantaciones de pino, casuarina y cedro blanco. Las tres categorías, en 1994, eran en su mayor parte, agricultura o matorral.

En cuanto a la correlación, se dividió el paisaje forestal de la Sierra en celdas, en 1994 fue de 0.057 y para 2019 de 0.074, esto indica una dispersión aleatoria, es decir, el flujo de energía será más interrumpido que en un paisaje de patrón grueso, pero menos que en un paisaje cuyo índice sea negativo.

La conversión de pastizal a bosque natural o por regeneración de plantaciones no siempre se puede llevar a cabo de forma natural. Ello obedece a que el pastizal limita la regeneración, supervivencia de plantaciones y crecimiento de la regeneración debido a la fuerte competencia por agua y nutrimentos y por luz que representan los zacates (Sierra-Pineda *et al*., 1991).

Durante el desarrollo del estudio se apreciaron 464 polígonos afectados por incendios forestales en el periodo 2013 a 2021, la gran mayoría de los cuales no resultaron deforestados. Esto se debió principalmente a factores naturales, aunque también a los esfuerzos de reforestación. Todas las comunidades vegetales naturales de la Sierra de Guadalupe y la mayoría de las especies utilizadas en su reforestación son tolerantes o resistentes al fuego, aún en condiciones de alta cantidad de combustible (Rodríguez-Trejo, 2014).

Los pastizales, en general, son magníficos rebrotadores posfuego (Rzedowski, 2006; Paysen *et al*., 2000), y las especies de matorrales xerófilos sin dominancia de cactáceas (salvo diversas especies de *Opuntia*), también rebrotan bien después del paso del fuego (Paysen *et al*., 2000; Rodríguez-Trejo *et al*., 2019), lo mismo que los bosques de *Quercus rugosa* y las masas de *Schinus molle* (Paysen *et al*., 2000; Rodríguez-Trejo, 2014). Las especies de *Pinus* presentan diversas adaptaciones al fuego, como corteza gruesa, capacidad de rebrotación post fuego y regeneración en áreas incendiadas, entre otras (Rodríguez-Trejo, 2014; Scott *et al*., 2014). *Eucalyptus camaldulensis*, la especie plantada en Sierra de Guadalupe tiene lignotubérculo, un

Tabla 7. Matriz de transición de Markov

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Tejido urbano continuo	1		0.20	0.04	0.10	0.06	0.49		0.01	0.03	0.02			0.01		0.01			0.01			
Agricultura	2		0.64	0.14	0.07	0.02		0.11	0.01					0.01								
Matorral	3		0.01	0.71	0.15	0.01			0.01	0.01		0.01		0.06	0.01				0.01			
Pastizal	4		0.01	0.03	0.90	0.02	0.01		0.01					0.02								
Matorral/ pastizal	5		0.06	0.46	0.16	0.29			0.01			0.01										
Tejido urbano discontinuo	6		0.01	0.13	0.05	0.18	0.62															
Artefacto	7		0.43	0.00		0.02		0.54							0.01							
Bosque heterogéneo	8		0.05	0.30	0.10	0.10	0.04		0.28	0.09		0.01		0.03								
Bosque heterogéneo abierto con sotobosque de matorral	9		0.03	0.59	0.01	0.12				0.23							0.01					
Bosque heterogéneo abierto en pastizal	10		0.00	0.06	0.08	0.36			0.07	0.11	0.30	0.01										
Encinar	11		0.02	0.06	0.05	0.02			0.03			0.83										
Encinar abierto con sotobosque de matorral-pastizal	12		0.02	0.24	0.26	0.07			0.12			0.01	0.25		0.01	0.02						
Plantación de eucalipto	13		0.02	0.12	0.05	0.18			0.01					0.55	0.02	0.04						
Plantación de eucalipto abierto con sotobosque de matorral	14		0.12	0.12	0.12				0.01						0.63							

Tabla 7. Continuación.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Plantación de eucalipto abierto con sotobosque de matorral-pastizal	15		0.48		0.35										0.16						
Bosque/ plantación de pirul	16	0.02	0.19	0.01	0.13								0.02			0.04		0.60			
Bosque/ plantación de pirul abierto con sotobosque de matorral	17	0.01	0.04		0.00												0.64	0.31			
Bosque/ plantación de pirul abierto con sotobosque de matorral-pastizal	18		0.52	0.01	0.10													0.37			
Plantación de pino	19	0.34	0.37		0.14			0.01					0.01						0.14		
Plantación de casuarina	20	0.96	0.03											0.02							
Plantación de cedro blanco	21	0.41	0.48										0.12								

órgano subterráneo con reservas y yemas, que junto con sus yemas epicórmicas le permite rebrotar muy bien después de incendios forestales, y posterior a estos hechos también puede mostrar una buena regeneración (Whelan, 1997). Sin duda, todos estos mecanismos, principalmente la rebrotación, han permitido la permanencia de la cubierta vegetal en presencia de fuego. En cambio, *Casuarina equisetifolia L., Callitropsis lusitanica (Mill.) D.P.Little* y los pinos piñoneros tienen cortezas delgadas y menor capacidad de rebrotación posfuego, por lo que son sensibles a este factor y muestran elevada mortalidad después de incendios (Whelan, 1997; Rodríguez-Trejo *et al.*, 2014; Hernández-Rosas *et al.*, 2023).

Por ello es importante que, como parte del manejo forestal, se realice el manejo de fuego y no solo su prevención y combate (que siempre serán relevantes). La política de exclusión de fuego que se sigue en la Sierra de Guadalupe, así como la no intervención a las masas forestales sobredensas, entre otros, generan condiciones que pueden contribuir a la pérdida de bosques naturales y artificiales. Es importante que se incluyan las categorías de manejo forestal, de recursos naturales y restauración ecológica en los próximos programas de manejo. Entender la restauración ecológica en los marcos de la ecología del paisaje es necesariamente buscar colaboración entre los gobiernos del Estado de México y de la Ciudad de México. Estudios como el presente sirven como apoyo al manejo de ecosistemas pues proveen información sobre su composición, estructura y procesos. Por esta razón, en la Sierra de Guadalupe primero se debe realizar un amplio estudio de los recursos naturales y luego una planeación conceptual, tal como lo marca la Sociedad Ecológica de Restauración (Clewell *et al.*, 2005).

CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra la trayectoria de la cubierta vegetal de la Sierra de Guadalupe, entendida como la ruta de desarrollo de un ecosistema a través del tiempo (Clewell y James, 2004). Por lo general, la restauración ecológica tiene por objetivo alcanzar un estado anterior no alterado, para esto es fundamental entender la trayectoria del paisaje (Clewell *et al.*, 2005). En el caso de la Sierra de Guadalupe, los bosques primarios se aprovecharon casi en su totalidad hacia finales de 1910, para ese entonces también se habían drenado los grandes lagos de la Ciudad de México (Contreras Servín, 2015). El clima era distinto en ese entonces (Jáuregui Ostos, 2000) y probablemente también el suelo. Las condiciones actuales permiten que especies originales sigan desarrollándose en masas aisladas menores a cientos de metros cuadrados en algunos casos. En esta situación están especies como el copal, el cazahuate y el chapulixtle, entre otras.

El escenario de restauración de la Sierra de Guadalupe concuerda con un paisaje degradado que puede volver a su forma primaria (Clewell *et al.*, 2005), cuya reminiscencia se encuentra en los encinares y matorrales xerófilos viejos. Describir la trayectoria del paisaje como aquí se vuelve necesario para determinar qué comunidades vegetales se pueden incluir sobre qué otras y cómo se han desarrollado las que ahora existen, así como los efectos que han tenido las estrategias anteriores, y delinear así hacia dónde se deben dirigir los esfuerzos. El concepto de qué especies introducidas son inaceptables en áreas naturales protegidas se vuelve un tanto frágil para las coníferas en la Sierra, pues existen especies introducidas que han demostrado buena aclimatación.

Por otra parte, existen especies que son ajenas al paisaje, como el eucalipto y el pirul, especies exótica y naturalizada, respectivamente, que han demostrado frugalidad en los matorrales y pastizales, y que componen gran parte de las masas forestales de la Sierra. Por supuesto, estas no deben de plantarse más, pero sí deben reconocerse los servicios ambientales que brindan. Esas plantaciones resultan tener menor índice de disección respecto al encinar, o el bosque heterogéneo (con especies nativas), cuentan con áreas núcleo más grandes y mayor probabilidad de albergar especies en su interior (Bowen y Burgess, 1981).

Aunque la creencia general es que la "naturaleza" se ha deteriorado en la Sierra de Guadalupe, está demostrado que, al menos las comunidades forestales, han aumentado en 540 ha. De estas últimas, 461 ha son de plantaciones de eucalipto y plantaciones/bosque de pirul. En 1994 ya existían 1344 ha con

estas dos últimas clases. Casi toda la extensión de la Sierra de Guadalupe está configurada como un paisaje de grano fino según los anteriores índices, es probable que las especies que requieran de grandes extensiones forestales no se puedan desarrollar (Myers, 2006). La configuración del paisaje es el resultado tanto de la vegetación natural, como de su alteración por el hombre (disturbios), los intentos de este por revegetar y las perturbaciones naturales.

Las tendencias detectadas permiten afirmar que el bosque heterogéneo, el de encino y las plantaciones de pino, eucalipto y, pirul son estables. Se pone de relieve la necesidad de realizar su manejo forestal, por ejemplo, la aplicación de aclareos y repoblaciones bien fundamentadas, sin lo cual se facilita el fin de estas masas: la exclusión de fuego promueve la acumulación de combustibles forestales. En la zona de estudio, el pastizal limita la regeneración natural y artificial de árboles.

Todas las comunidades vegetales de la Sierra de Guadalupe, así como la mayoría de las especies utilizadas en la reforestación, son tolerantes o resistentes al fuego, lo que ha contribuido a su permanencia. Las excepciones son el cedro blanco y la casuarina, que no están adaptados a dicho factor.

Casi todas las categorías de vegetación tienen actualmente mayor fragmentación que en 1994, lo cual obedece al avance de la mancha urbana y al aumento de polígonos, este último a su vez a causa de la fragmentación y de la reforestación.

Las políticas estatales de reforestación establecieron extensas masas de eucaliptos, mientras que los esfuerzos de la sociedad civil han establecido pequeñas reforestaciones, lo cual no es negativo, pero ha contribuido a la fragmentación.

Son los bosques de encino y las plantaciones de eucalipto las masas forestales menos fragmentadas. Su área núcleo se ha reducido aun cuando el área de estas ha aumentado. Tal incremento de fragmentación es consecuencia del aumento de mosaicos dispersos y retracción de la frontera urbana.

REFERENCIAS

Bowen, G. W., y Burgess, R. L. (1981). *A Quantitative Analysis of Forest Island Pattern in Selected Ohio Landscapes*. Oak Ridge National Laboratory.

Calderón de Rzedowski, G., y Rzedowski, J. (2005). *Flora fanerogámica del Valle de México* (2ª ed.). Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Ching, W., Huang, X., K. Ng, M., y Siu, T.-K. (2013). Markov Chains (2a ed.). Springer. http://www.springer.com/series/6161

Clewell, A., y James, A. (2004). *Principios de SER International sobre la Restauración Ecológica*. www.ser.org

Clewell, A., Rieger, J., y Munro, J. (2005). *Guidelines for Developing and Managing Ecological Restoration Projects*. www.ser.org

CONAGUA. (2010). Gran Canal 15040. https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s

Contreras Servín, C. (2015). *La transformación del paisaje en el Distrito Federal. Del crecimiento urbano a la primera crisis ambiental en México*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

De Torre, R., y Magro, S. (2018). *Guía Práctica de Restauración Ecológica*. https://www.researchgate.net/publication/329059824

Farina, A. (2006). *Principles and Methods in Landscape Ecology Towards a Science of Landscape*. Landscape Series Landscape Series. Springer.

Gurruxtaga, M. (2003). Índices de fragmentación y conectividad para el indicador de biodiversidad y paisaje de la CAPV. https://www.researchgate.net/publication/302265358

Hernández-Rosas, M. M., Hernández-Leyva, A. L. y Rodríguez-Trejo, D. A. (2023). Probability of mortality in casuarina two years after the fire at the piedmont of the Tlaloc volcano, State of Mexico, 2017. *Agrociencia,* 57(1), 102-116. https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i1.2814

INEGI. (1994). Cuautitlán y Ciudad de México (E14A29). https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes/

INEGI. (2019). Cuautitlán/Gustavo A. Madero. Google Earth.

INEGI. (2022). Continuo de Elevaciones Mexicano. https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/

Jaeger, J. A. G. (2000). Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, *15*, 115-130.

Jáuregui Ostos, E. (2000). *El clima de la Ciudad de México*. Plaza y Valdés.

Myers, R. L. (2006). Convivir con el fuego-Manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el Manejo Integral del Fuego. http://tncfuego.org

Paysen, T. E., Ansley, R. J., Brown, J. K., Gottfried, G. J., Haase, S. M., Harrington, M. G., Narog, M. G., Sackett, S. S., y Wilson, R. C. (2000). Fire in Western Shrubland, Woodland, and Grassland Ecosystems. En

J. K. Brown y J. Kapler Smith (Eds.), *Wildland Fire in Ecosystems. Effects of Fire on Flora* (pp.121-159). USDA Forest Service.

Pretzsch, H., Grote, R., Reineking, B., Rötzer, T., y Seifert, S. (2008). Models for forest ecosystem management: A European perspective. *Annals of Botany, 101*(8), 1065–1087. https://doi.org/10.1093/aob/mcm246

Puyravaud, J. P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management, 177*(1–3), 593–596. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00335-3

QGIS, D. T. (2023). QGIS (3.30.3). Open Geospatian Fundation. https://qgis.org/es/site/.

R Core Team. (2020). R: A lenguaje and enviroment for statical computing. R foundation for Statical Computing. https://www.R-project.org/.

Rodríguez-Trejo, D. A. (2014). *Incendios de vegetación. Su ecología, manejo e historia* (vol. 2). Colegio de Postgraduados.

Rodríguez-Trejo, D. A., Pausas, J. G., y Miranda-Moreno, A. G. (2019). Plant responses to fire in a Mexican arid shrubland. *Fire Ecology, 15*(11), 1-9. https://doi.org/10.1186/s42408-019-0029-9

Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. Conabio. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf

Scott, A. C., Bowman, D. M. J. S., Bond, W. D., Pyne, S. J., y Alexander, M. E. (2014). *Fire on Earth: An Introduction*. Wiley Blackwell.

Sentinel 2A. (2021). S2A_MSIL1C_20170417T170311_N0204_R069_T14QMG_20170417T171425. https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/homeHighlight

Sierra Pineda, A., Vázquez Soto, J., y Rodríguez Trejo, D. A. (1991). La autoecología del *Pinus radiat*a en la Cuenca de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 16*(69), 107-123.

Vela-Correa, G., y Flores-Román, D. (2004). Morfogénesis de suelo con capas endurecidas de la Sierra de Guadalupe, México. *Terra Latinoamericana, 22*(3), 255-265.

Villavicencio, A. (2007). *Evaluación de funciones y servicios ambientales Parque Estatal Sierra de Guadalupe-Proyecto de conservación ecológica de la zona metropolitana del Valle de México*. Editorial de la Universidad de Granada.

Whelan, R. J. (1997). *The Ecology of Fire*. Cambridge University Press.

Wu, J. (2009). Ecological Dynamics in Fragmented Landscapes. En S. Levin (Ed.), *Princeton Guide to Ecology* (pp. 438–444). Princeton.

Zhu, Z., Mei, Z., Xu, X., Feng, Y., y Ren, G. (2022). Landscape Ecological Risk Assessment Based on Land Use Change in the Yellow River Basin of Shaanxi, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(15) (15), 6-9.. https://doi.org/10.3390/ijerph19159547

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60790 • ARTÍCULOS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60790
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Importancia de las estimaciones por muestreo probabilístico para analizar dinámicas forestales regionales: una evaluación de los datos de Global Forest Change en el este de México

Importance of probability sampling estimates for analyzing regional forest dynamics: an evaluation of Global Forest Change data in eastern Mexico

Carlos Alberto López Arcadia* y Martha Bonilla Moheno**

Recibido: 6/09/2023. Aceptado: 21/11/2023. Publicado: 21/03/2024

Resumen. La base de datos de Global Forest Change (GFC) ha facilitado el acceso al análisis y monitoreo de dinámicas del suelo a distintas escalas. Sin embargo, estos datos pueden presentar imprecisiones espacio-temporales ocasionadas por las características del paisaje, las prácticas de manejo agrícola y la escala espacial de la evaluación. Para reducir dichas inexactitud es recomendable realizar evaluaciones para cada caso de estudio utilizando estimaciones por muestreo probabilístico. En México ha habido un incremento en estudios con la base de datos de GFC para calcular la pérdida de cobertura forestal; sin embargo, pocos lo han hecho usando estimaciones por muestreo. En este estudio realizamos una evaluación utilizando estimaciones por muestreo probabilístico en cuatro regiones cafetaleras del este de México con características climáticas y topográficas complejas y una alta presencia de minifundistas. Utilizamos el GFC para llevar a cabo el muestreo probabilístico, agrupando los pixeles de pérdida de cobertura anual en tres categorías: *No Pérdida* (*NP*), *Posible Pérdida* (*PP*) y *Pérdida* (*P*). Para cada región, generamos aleatoriamente 200 puntos de muestreo para *P* y 100 para *PP* y *NP*. Con la ayuda de series de tiempo de los valores máximos y mínimos de NDVI y EVI e imágenes de alta resolución de Google Earth, llevamos a cabo una verificación visual para identificar el año en el que hubo una pérdida de cobertura forestal en cada punto de muestreo. Posteriormente, utilizamos tres procedimientos para calcular la pérdida: una estimación basada en el mapa de GFC; una estimación por muestreo utilizando las categorías *P*+*PP*, y una estimación por muestreo utilizando las tres categorías (*P*+*PP*+*NP*). Adicionalmente verificamos la precisión temporal de la base de datos GFC, comparado el año en que se reportó la pérdida con el año en que se observó la pérdida en la evaluación. Encontramos que la pérdida de cobertura forestal fue detectada correctamente por la base de datos más del 90% de las veces en todas las regiones. Sin embargo, la pérdida observada en las categorías *PP* y *NP* no detectada por la base de datos fue alta (53-65% y 23-26%, respectivamente). Asimismo, encontramos que la pérdida calculada en las estimaciones por muestreo fue desde cuatro (*P*+*PP*) hasta 70 (*P*+*PP*+*NP*) veces mayor que la estimación basada en el mapa. Además, encontramos que la precisión temporal fue relativamente baja (59.5-77.5%), con una tendencia a reportar la pérdida de cobertura forestal uno o más años después de haber tenido lugar. Esto indica que, al realizar evaluaciones regionales en paisajes heterogéneos manejados por pequeños propietarios, la base de datos de GFC puede subestimar considerablemente la pérdida de cobertura forestal. Resaltamos la importancia de realizar evaluaciones por muestreo probabilístico para reducir imprecisiones espaciotemporales que podrían llevar a inferencias erróneas sobre los patrones de pérdida de cobertura forestal.

* Red Ambiente y Sustentabilidad, Instituto de Ecología, A.C. Carretera antigua a Coatepec 351, col. El Haya, 91073, Xalapa, Veracruz, México. ORCID: 0000-0001-9516-4347. Email: arcadiopteris@tutanota.com. Autor de correspondencia.
** Red Ambiente y Sustentabilidad, Instituto de Ecología, A.C. Carretera antigua a Coatepec 351, col. El Haya, 91073, Xalapa, Veracruz, México. ORCID: 0000-0002-2403-2002. Email: martha.bonilla@inecol.mx

Palabras clave: deforestación, estimación por muestreo, paisajes complejos, degradación forestal, evaluación regional

Abstract. The Global Forest Change (GFC) database has facilitated access to soil dynamics analysis and monitoring at different scales. However, these data may contain spatial-temporal inaccuracies caused by landscape characteristics, agricultural management practices, and the spatial scale of the assessment. To reduce these inaccuracies, it is recommended to evaluate each case study using probabilistic sampling estimates. The number of studies that calculate forest cover loss in Mexico using the GFC database has increased; however, few studies have used sampling estimates for this purpose. This study assessed probabilistic sampling estimates in four coffee regions of eastern Mexico with complex climatic and topographic characteristics and numerous smallholders. We used the GFC to carry out probabilistic sampling, grouping the annual coverage loss pixels into three categories: No Loss (NP), Possible Loss (PP), and Loss (P). For each region, we randomly generated 200 sampling points for P and 100 for PP and NP. Using time series of maximum and minimum NDVI and EVI values and high-resolution images from Google Earth, we carried out a visual verification to identify the year with a loss of forest cover at each sampling point. We then used three procedures to calculate the loss: an estimate based on the GFC map, a sampling estimate using the P+PP categories, and a sampling estimate using the three categories (P+PP+NP). Additionally, we validated the temporal accuracy of the GFC database by comparing the year in which the loss was reported with the year in which the loss was observed in the assessment. We found that forest cover loss was correctly detected by the database more than 90 % of the time in all regions. However, the loss observed in PP and NP and not detected by the database was high (53–65 % and 23–26 %, respectively). We also found that the loss calculated in the sampling estimates was four (P+PP) to 70 (P+PP+NP) times greater than map-based estimates. Furthermore, we found a relatively low temporal accuracy (59.5–77.5 %), showing a tendency to report the loss of forest cover one or more years after it occurred. This indicates that the GFC database can significantly underestimate the loss of forest cover by conducting regional assessments on heterogeneous landscapes managed by smallholders. This study highlights the importance of conducting probabilistic sampling assessments to reduce spatio-temporal inaccuracies that could lead to erroneous inferences about patterns of forest cover loss.

Keyword: deforestation; sample estimation; complex landscapes; forest degradation; regional assessment.

INTRODUCCIÓN

La expansión de la frontera agrícola es uno de los mayores impulsores de degradación, fragmentación y deforestación de los bosques tropicales (Foley *et al.*, 2011; Armenteras *et al.*, 2017; Ceddia, 2019). Para desarrollar planes de manejo del suelo y políticas que aborden estos procesos es necesario monitorear sus dinámicas espaciotemporales (Chowdhury, 2006; Pettorelli *et al.*, 2014; Seymour y Harris, 2019). La disponibilidad actual de instrumentos globales que producen datos espaciales, tales como MODIS Land Cover (Friedl *et al.*, 2002), GlobeLand30 (Jun *et al.*, 2014), o Global Forest Change (Hansen *et al.*, 2013), ha hecho que el análisis espacial y temporal de las dinámicas y procesos del suelo resulte ampliamente accesible. Particularmente, la base de datos de Global Forest Change (GFC) ha jugado un papel clave en la evaluación de tendencias de cobertura forestal, ya que puede ser usado para estimar la deforestación a escala de bioma (*Hansen et al.*, 2013), nacional (Sannier *et al.*, 2016; Cunningham *et al.*, 2019; Galiatsatos *et al.*, 2020) y subnacional (McRoberts *et al.*, 2016; Linke *et al.*, 2017; Milodowski *et al.*, 2017).

La base de datos de GFC contiene varias capas con una resolución espacial de 30 metros: la cobertura del dosel para el año 2000, un agregado de recuperación forestal para el periodo 2000-2012, y la pérdida anual de cobertura forestal. Estas características, junto con su alcance global y la actualización anual, han proporcionado a investigadores y tomadores de decisiones una herramienta confiable para monitorear las tendencias de cobertura forestal, especialmente en sitios donde las bases de datos regionales no existen o son insuficientes (Sannier *et al.*, 2016). Sin embargo, debido al algoritmo usado para producir la base de datos, en algunos casos hay diferencias locales en la estimación de áreas de pérdida o recuperación forestal, las cuales pueden llevar a una sub o sobrestimación del cambio forestal, así como a imprecisiones temporales en el año asignado a la pérdida forestal (Hansen *et al.*, 2013; Galiatsatos *et al.*, 2020). Esta sobre/subestimación ha sido atribuida a características orográficas y climáticas del paisaje (Cunningham *et al.*, 2019); la presencia de cultivos arbóreos, y los clareos a pequeña escala, usualmente asociados a la agricultura minifundista (Tropek *et al.*, 2014; Turubanova *et al.*, 2018;

Cunningham *et al.*, 2019). Las imprecisiones temporales han sido atribuidas principalmente a la presencia continua de nubes en los trópicos y a perturbaciones de pequeña escala (Milodowski *et al.*, 2017; Turubanova *et al.*, 2018). Además, la definición de bosque y pérdida forestal usada en la base de datos de GFC no considera procesos de degradación forestal, los cuales frecuentemente superan a la deforestación en paisajes tropicales (Ellis *et al.*, 2020; Matricardi *et al.*, 2020; Qin *et al.*, 2021). Para reducir estas imprecisiones y evitar hacer inferencias incorrectas del área de cambio forestal a partir de estimaciones basadas en mapas, las bases de datos deben de ser validadas para cada caso particular utilizando estimaciones por muestreo (Hansen *et al.*, 2014; Olofsson *et al.*, 2014; Tropek *et al.*, 2014; Sandker *et al.*, 2021).

Recientemente, ha habido un aumento en los estudios que usan la base de datos de GFC para evaluar la pérdida de cobertura forestal en México. Este ha sido usado para calcular la pérdida de hábitat y su efecto en la distribución de mamíferos (Klass *et al.*, 2020); para evaluar la deforestación asociada con la expansión agrícola y la extracción de madera (Blackman y Villalobos, 2021; Cho *et al.*, 2021); para evaluar la influencia de la tenencia de la tierra y el manejo del suelo sobre la extensión de cobertura forestal (Ellis *et al.*, 2017; Lawrence *et al.*, 2019; Haines, 2021); y para evaluar la eficacia de distintas estrategias (por ejemplo, pago por servicios ambientales y áreas protegidas) en la conservación de la cobertura forestal (Sims y Alix-Garcia, 2017; Ramirez-Reyes *et al.*, 2018; Izquierdo-Tort *et al.*, 2019; Ellis, Sierra-Huelsz, *et al.*, 2020; Powlen *et al.*, 2021; González-Fernández *et al.*, 2022). Asimismo, la base de datos de GFC ha sido usada para evaluar tendencias e impulsores de deforestación a escalas nacionales (Portillo-Quintero y Smith, 2018; Figueroa *et al.*, 2021) y subnacionales (Krylov *et al.*, 2018). Sin embargo, de los estudios citados, solo tres utilizaron estimaciones por muestreo para calcular el área de pérdida forestal (Krylov *et al.*, 2018; Ramirez-Reyes *et al.*, 2018; González-Fernández *et al.*, 2022), mientras que en una hicieron una validación visual usando SIG (Portillo-Quintero y Smith, 2018) y en otra llevaron a cabo una validación en campo (Izquierdo-Tort *et al.*, 2019). A pesar de que las estimaciones reportadas en la mayoría de estos estudios son confiables, la incertidumbre asociada con el uso de estimaciones basadas en mapas sin la validación a escala local podría dar resultados erróneos sobre la magnitud y tendencia del cambio forestal (Galiatsatos *et al.*, 2020).

En este estudio resaltamos la importancia de llevar a cabo estimaciones por muestreo a partir de la base de datos de GFC para reducir la incidencia de sub/sobreestimaciones del área de pérdida forestal y las imprecisiones temporales de cambio forestal. Realizamos la evaluación en cuatro regiones cafetaleras del este de México (Figura 1) donde el café es cultivado por minifundisttas bajo el dosel de agrobosques (~1 ha) en paisajes montañosos complejos (López-Arcadia, 2022). Dadas las características orográficas y climáticas de la región, así como las prácticas de manejo de los cafeticultores, es muy probable que, en este paisaje, la precisión de la base de datos de GFC se vea comprometida (Milodowski *et al.*, 2017; Turubanova *et al.*, 2018; Cunningham *et al.*, 2019). Además, en 2013, la región fue afectada por la epidemia de la roya, lo que desencadenó un proceso de degradación y pérdida forestal ocasionada por la reducción de árboles de sombra en las parcelas de café (López-Arcadia, 2022). Ya que esta epidemia coincide con el cambio en satélites usados para actualizar la base de datos de GFC (de Landsat 7 a Landsat 8), la evaluación de los datos puede también ayudar a separar los efectos de la epidemia de los ocasionados por la mayor sensibilidad del nuevo satélite.

METODOLOGÍA

Siguiendo las recomendaciones de buenas prácticas para estimar áreas usando mapas (Olofsson *et al.*, 2014; Tyukavina *et al.*, 2015), llevamos a cabo un muestreo probabilístico estratificado utilizando la versión 1.8 de la base de datos de GFC (Figura 2), la cual integra los datos originales con datos actualizados que abarcan desde el año 2000 hasta el 2020 (Hansen *et al.*, 2013). Para establecer el área inicial de cobertura forestal, consideramos como bosque aquellos pixeles que en el año 2000 tuvieron

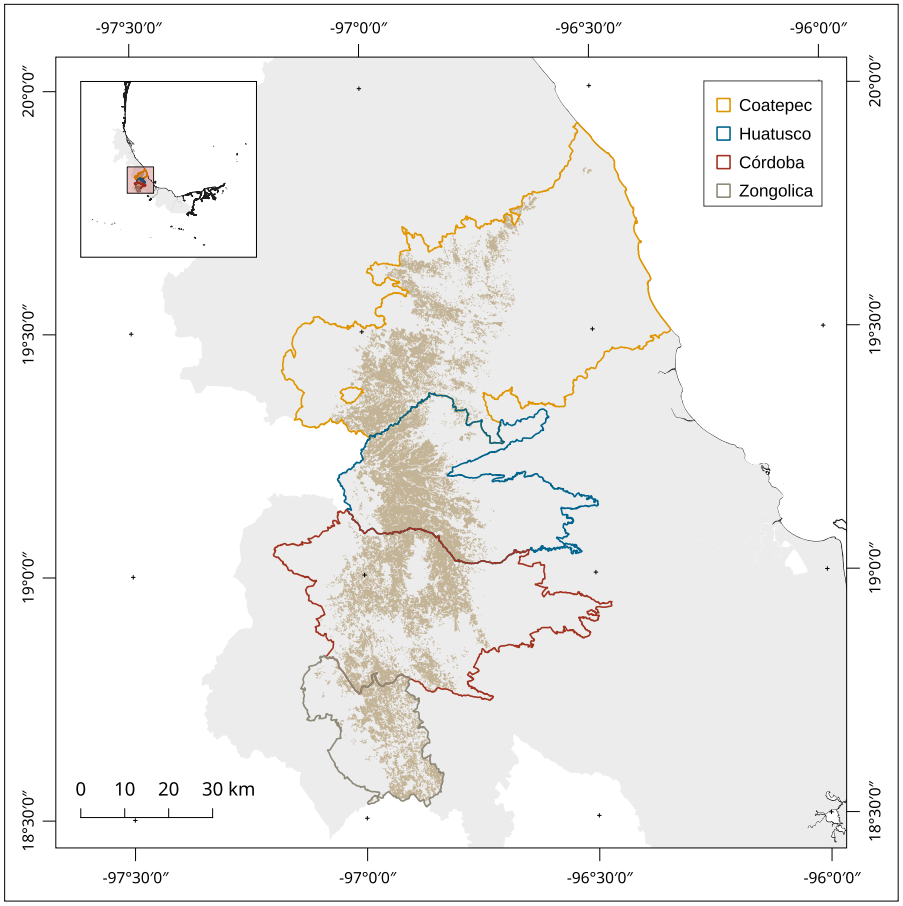


Figura 1. Área de estudio. Las líneas continuas de color representan los límites administrativos de las regiones cafetaleras estudiadas, localizadas en el estado de Veracruz, México. El área sombreada es el área cafetalera de cada región donde la evaluación fue realizada. Fuente: elaboración propia usando el censo cafetalero de SAGARPA para el año 2000.

una cobertura del dosel mayor a 50% (Sannier *et al.*, 2016). Posteriormente, usando la capa *lossyear*, agrupamos los pixeles en tres categorías de acuerdo al cambio reportado en la cobertura forestal de 2001 a 2020: 1) *No pérdida* – pixeles donde no se detectó pérdida de cobertura forestal; 2) *Posible pérdida* – pixeles que no mostraron pérdida, pero son adyacentes a un pixel donde se detectó pérdida, y 3) *Pérdida* – pixeles donde se detectó pérdida de cobertura forestal. Posteriormente, generamos puntos de muestreo aleatorios para cada categoría usando la función 'sampleRandom' del paquete *raster* en R (Hijmans y van Etten, 2012). Ya que nuestro mayor interés fue identificar áreas donde hubiera pérdida de bosque, para cada una de las cuatro regiones generamos 200 puntos para *Pérdida*, 100 puntos para *Posible pérdida*, y 100 puntos para *No pérdida*. Para verificar la pérdida de cobertura forestal, generamos mosaicos anuales (2001-2010) de los valores mínimos y máximos del índice de diferencia normalizada (NDVI) y los valores mínimos y máximos del índice de vegetación mejorada (EVI) para cada región utilizando imágenes Landsat 7 para el periodo 2001-2012 y Landsat 8 para el periodo 2013-2020. Todas las imágenes fueron generadas en la plataforma Google Earth Engine (Gorelick *et al.*, 2017). A partir de las imágenes resultantes, extrajimos el valor de cada punto de muestreo y elaboramos series de tiempo para ayudar en la verificación de la pérdida de cobertura forestal. Siguiendo a Turubanova *et al.* (2018), hicimos una verificación visual con imágenes de alta resolución de Google Earth para identificar el periodo en el que ocurrió la pérdida (Figura 3A). Después, usando las series de tiempo generadas para EVI y NDVI (Figura 3B), verificamos el año en el que ambos índices disminuyeron dentro del periodo identificado previamente y lo designamos como el año de pérdida observada. Consideramos la pérdida de cobertura forestal como la reducción de

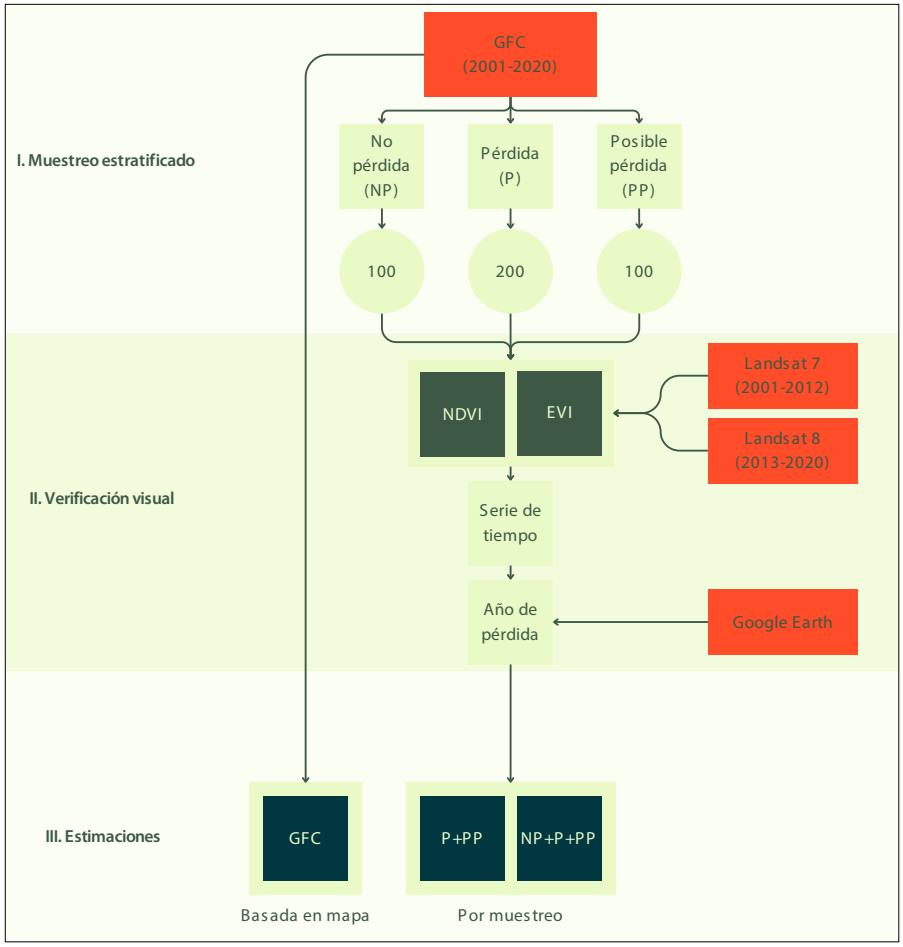


Figura 2. Metodología seguida para llevar a cabo las estimaciones de pérdida de cobertura forestal. En rojo se señalan las imágenes utilizadas y en azul las estimaciones calculadas.

la cobertura del dosel de los agroecosistemas de café (por ejemplo, degradación), así como la remoción total de la cobertura forestal (i.e. deforestación), la cual fue usualmente remplazada por cultivos comerciales y pastizales. La verificación visual fue llevada a cabo por el primer autor dos veces para asegurar la precisión de la interpretación.

Para calcular el área inicial de cobertura forestal para el año 2000 y el área de pérdida anual para el periodo 2001-2020 en cada región evaluada usamos la siguiente ecuación (Stehman, 2013; Turubanova *et al.*, 2018).

$$\hat{A} = A_{tot} * \sum_{h=1}^{H} \frac{N_h}{N} \bar{y}_h$$

donde:

$\hat{A}$ – Área estimada de pérdida de cobertura forestal

A_{tot} – Área total de bosque dentro del área de estudio

$\bar{y}_h = \frac{\sum y_u}{n_h}$ – media de los valores y_u en la categoría h

y_u – 1 si el pixel u es interpretado como 'pérdida de cobertura forestal en el año 20xx', y 0 si no

H – Número de categorías muestreadas

n_h – Tamaño de muestra (número de pixeles muestreados) en la categoría h

N_h – Número total de pixeles en la categoría h

N – Número total de pixeles de bosque en el área de estudio

El error estándar fue estimado usando la siguiente ecuación:

$$SE(\hat{A}) = A_{tot} * \sqrt{\sum_{h=1}^{H} \left(\frac{N_h}{N}\right)^2 \frac{\bar{y}_h(1-\bar{y}_h)}{n_h - 1}}$$

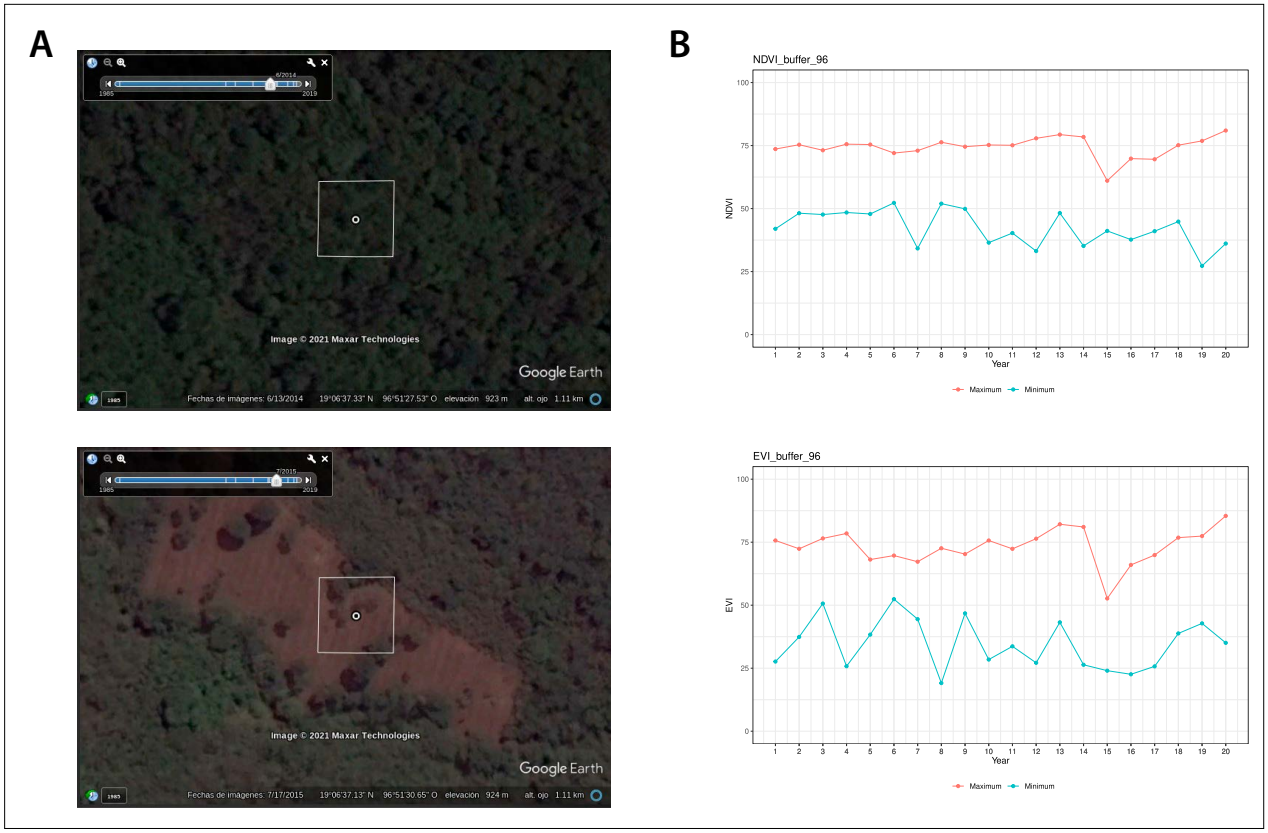


Figura 3. Ejemplo de imágenes usadas para verificar la pérdida de cobertura forestal. A. Establecimos visualmente el periodo en el cuál la pérdida de cobertura ocurrió (junio de 2014-julio de 2015 en este ejemplo). B. Usamos la serie de tiempo para verificar el año en el cual ambos índices disminuyeron dentro del rango de tiempo establecido en A (2015 en este ejemplo).

Para evaluar si las estimaciones por muestreo de pérdida de cobertura forestal difirieron de las estimaciones basadas en el mapa, calculamos y comparamos el área de pérdida de cobertura forestal para el periodo 2001-2020 usando: 1) una estimación basada en el mapa a partir de los datos de GFC; 2) una estimación por muestreo utilizando solo las categorías de *Pérdida* y *Posible pérdida*; y 3) una estimación por muestreo considerando todas las categorías. Realizamos dos estimaciones por muestreo distintas para probar si la inclusión de la pérdida observada en las categorías de *Pérdida posible* y *No pérdida* tuvo un efecto en las estimaciones. Para comparar entre estimaciones, calculamos el cambio relativo del área estimada por los procedimientos por muestreo en relación con las estimaciones basadas en mapas. Para comparar los patrones temporales de pérdida, generamos series de tiempo de la pérdida anual de cobertura forestal para cada estimación. Para las estimaciones basadas en muestreo, calculamos una media móvil de tres años para suavizar las fluctuaciones anuales de pérdida de cobertura forestal y ayudar a identificar las tendencias de cambio (Linke *et al.*, 2017). Para los años 2001 y 2020, la media móvil fue calculada usando solo el año posterior y el año anterior, respectivamente.

Dado que los datos usados fueron generados usando satélites con distintas sensibilidades para detectar cambios en la cobertura forestal (Landsat 7 de 2001 a 2012 y Landsat 8 de 2013 en adelante), verificamos: 1) si el año asignado a los pixeles marcados como *Pérdida* coincidieron con el año observado al realizar el muestreo; 2) si coincidieron dentro de ±1 año, o 3) si ocurrieron dos o más años antes o después de lo reportado. Con esta información evaluamos la precisión temporal de los datos de GFC para detectar la pérdida de cobertura forestal en el área de estudio.

RESULTADOS

El porcentaje de puntos correctamente asignado como *P*érdida fue mayor del 90% para todas las regiones, con un valor mínimo de 92% (Zongolica) y un máximo de 98% (Huatusco). El porcentaje de puntos en la categoría de *Posible pérdida* (pixeles reportados como bosques adyacentes a pixeles de *Pérdida*) donde detectamos una pérdida de cobertura fue alto, entre 53% (Zongolica) y 65% (Córdoba). En cuanto a la categoría de *No pérdida*, el porcentaje de puntos donde observamos disminución fue considerable, con valores entre 23% y 26% (Huatusco y Coatepec, respectivamente; Cuadro 1).

El área de pérdida de cobertura forestal calculada a partir de la estimación basada en el mapa fue de 1433 ha (Coatepec), 699 ha (Córdoba), 1214 ha (Huatusco), y 388 ha (Zongolica). Al realizar las estimaciones por muestreo considerando solo la pérdida observada en las categorías de Pérdida y Pérdida posible, el área estimada se incrementó entre 348% y 396%. Al incluir la pérdida estimada en la categoría de *No pérdida*, la estimación de área de pérdida de cobertura forestal incrementó drásticamente, con valores que oscilaron entre 3057% y 7150% (Cuadro 2).

Al hacer la evaluación de las series de tiempo de pérdida de cobertura forestal, la estimación basada en el mapa mostró patrones similares para todas las regiones, con un periodo de pérdida relativamente estable de 2001 a 2012 y un incremento alto después de 2013 (Figura 4A). La estimación por muestreo usando las categorías de Pérdida y Pérdida posible (Figura 4B) muestra un patrón similar al de la estimación basada en el mapa, con un leve incremento principalmente entre 2001 y 2012. Al incluir la categoría de *No pérdida*, la estimación por muestreo mostró un incremento en la pérdida de cobertura forestal en el periodo de 2001-2012 (Figura 4C; Apéndice 1).

El año de pérdida observada en el muestreo coincidió entre 49% y 64.5% con el año asignado en los datos del GFC (Cuadro 3). El porcentaje de coincidencias se incrementó entre 59.5% y 77.5% al considerar los años inmediatamente antes y después del año asignado en los datos originales. Hubo una cantidad considerable de puntos de muestreo (entre 15% y 28%) en los que la pérdida fue detectada dos o más años después de que ocurrió. Por otro lado, en una pequeña cantidad de puntos de muestreo, la pérdida fue detectada más de dos años antes de que tuviera lugar (de 1% a 5.5%).

Cuadro 1. Porcentaje de puntos de muestreo observados como pérdida en la cobertura forestal en la estimación por muestreo. Los valores corresponden a cada categoría evaluada: P = Pérdida (pixeles donde la pérdida de cobertura forestal fue originalmente reportada); PP = *Posible pérdida* (pixeles adyacentes a pixeles de Pérdida); NP = *No pérdida* (pixeles donde no se reportó pérdida en la cobertura forestal).

Región	P	PP	NP
Coatepec	95%	57%	26%
Córdoba	94.5%	65%	25%
Huatusco	98%	55%	23%
Zongolica	92%	53%	24%

Cuadro 2. Estimaciones de área de pérdida de cobertura forestal (hectáreas) para el periodo 2001-2020 calculadas con tres distintos procedimientos. El porcentaje en paréntesis indica el incremento en pérdida de cobertura forestal relativa a la estimación basada en el mapa. P = *Pérdida*; PP = *Posible pérdida*; NP = *No pérdida*.

Región	Basado en mapa	Por muestreo (P + PP)	Por muestreo (NP + PP + P)
Coatepec	1433	5102 (356%)	45 808 (3196%)
Córdoba	699	2624 (375%)	49 982 (7150%)
Huatusco	1214	4226 (348%)	37 116 (3057%)
Zongolica	388	1538 (396%)	24 090 (6208%)

DISCUSIÓN

La disponibilidad de datos espacialmente explícitos para el monitoreo de las dinámicas de cobertura del suelo ha permitido a los investigadores, profesionales y tomadores de decisiones a evaluar las tendencias locales, regionales y nacionales de

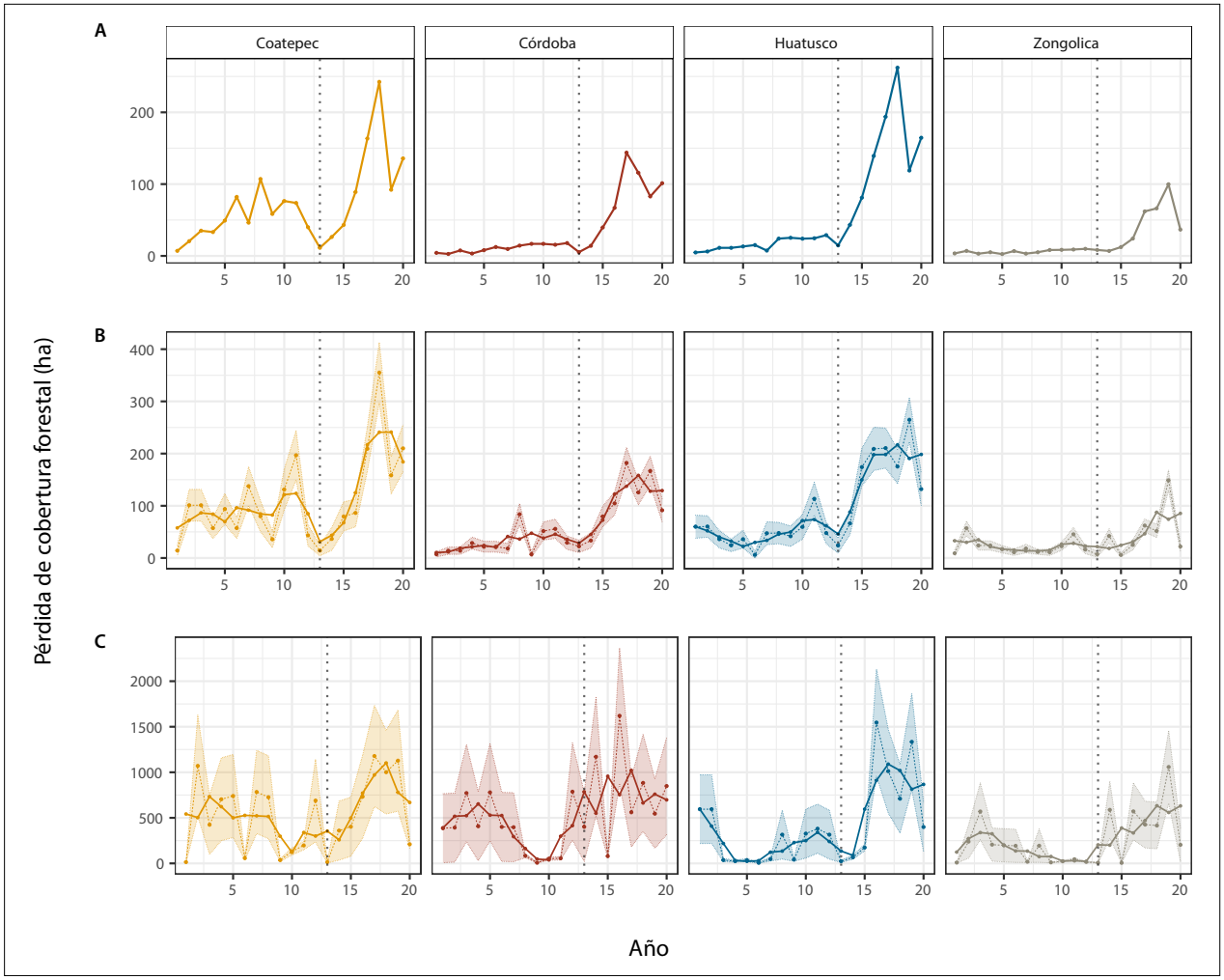


Figura 4. Estimaciones de área de pérdida de cobertura forestal (ha) para cada año para el periodo 2001-2020. A. Estimación basada en el mapa. B. Estimación por muestreo usando las categorías Pérdida y Posible Pérdida. C. Estimación por muestreo usando No pérdida, Pérdida y Posible Pérdida. La línea punteada vertical indica el año 2013, cuando hubo un cambio en el satélite usado para generar los datos de GFC. Para B y C, los puntos representan los valores estimados para cada año, la región sombreada el error estándar y la línea continua la media móvil calculada usando una ventana temporal de tres años. Nótese la diferencia en escalas para las tres estimaciones.

Cuadro 3. Porcentaje de puntos donde el año reportado en los datos de GFC coincidieron con el año observado en el muestreo o presentaron una diferencia temporal.

Región	Coincidencia	Coincidencia ±1 año	Detectado dos o más años después	Detectado dos o más años antes
Coatepec	57.5%	74.5%	15%	5.5%
Córdoba	63%	75.5%	16%	3%
Huatusco	64.5%	77.5%	19.5%	1%
Zongolica	49%	59.5%	28%	4.5%

cambio del suelo. Sin embargo, a causa de las metodologías usadas en la elaboración de estos datos (por ejemplo, la escala global oculta la heterogeneidad regional, las limitaciones de los datos de entrenamiento y el algoritmo utilizado), las estimaciones basadas en mapas pueden reportar tendencias de cambio imprecisas al ser usadas en paisajes tropicales complejos, donde el minifundismo es común. Al ser usadas en estos contextos, encontramos que las estimaciones basadas en mapas usando los datos de GFC pueden subestimar ampliamente el área de pérdida de cobertura forestal y los patrones temporales inferidos pueden estar sesgados.

La base de datos de GFC define la cobertura forestal como cualquier pixel con vegetación mayor a 5 m de altura, y la pérdida de bosque como la remoción de todos los árboles dentro de un pixel (Hansen *et al.*, 2013). Dada la importancia socioambiental de los agroecosistemas de café de sombra en nuestra área de estudio, consideramos como deforestación a la transición de agrobosque de café de sombra a otros cultivos (como en el caso de las plantaciones de plátano, cítricos, caña) y a la degradación forestal (por ejemplo, agroecosistemas de café degradados). Reconocemos que el incremento drástico en la pérdida de cobertura forestal que detectamos después de realizar las estimaciones por muestreo podría deberse a nuestra definición de deforestación. La definición, operacionalización y detección de la degradación forestal a través de técnicas de percepción remota representa un tema que ha sido pasado por alto en bases de datos globales, incluyendo el usado en nuestra evaluación (Hansen *et al.*, 2014; Tropek *et al.*, 2014; Ghazoul *et al.*, 2015; Gao *et al.*, 2020). Sin embargo, dado el predominio de este proceso en los paisajes tropicales (Ellis *et al.*, 2020; Matricardi *et al.*, 2020; Qin *et al.*, 2021), su omisión podría llevar a conclusiones erróneas con respecto a las dinámicas de cambio en la cobertura forestal.

La escala subnacional de nuestra evaluación podría explicar las grandes diferencias entre las estimaciones basadas en el mapa y las estimaciones por muestreo. La base de datos fue elaborada con una perspectiva global, y hay evidencia de que se desempeña mejor a escalas supranacionales o nacionales (Hansen *et al.*, 2013; Tyukavina *et al.*, 2015; Turubanova *et al.*, 2018). Sin embargo, su implementación a escalas locales-regionales representa un reto importante (McRoberts *et al.*, 2016; Milodowski *et al.*, 2017; Galiatsatos *et al.*, 2020; Kinnebrew *et al.*, 2022). Por consiguiente, el uso de estimaciones por muestreo puede ayudar a superar esta problemática, especialmente en áreas donde es escasa la disponibilidad de mapas locales de cobertura del suelo o están desactualizados (McRoberts *et al.*, 2016).

El porcentaje de falsos positivos (puntos de muestreo que indicaron deforestación en lugares donde no ocurrió) fue similar (2% a 8%) a lo reportado para Latinoamérica (alrededor del 4%; Tyukavina *et al.*, 2015), Brasil (7.14%) e Indonesia (4.29%; Turubanova *et al.*, 2018), pero menor a lo informado para el bioma tropical (13%; Hansen *et al.*, 2013). Sin embargo, el número de puntos donde observamos pérdida en la categoría de Pérdida posible (pixeles adyacentes a aquellos reportados como Pérdida), fue mucho mayor que en otros estudios, con valores que oscilaron de 53% a 65%, en comparación con 25% a 39.9% en otros estudios (Turubanova *et al.*, 2018). Esto fue similar para el número de falsos negativos (puntos de muestreo que no reportaron pérdida forestal en lugares donde sí ocurrió) y, de hecho, fue mayor que lo observado en otros estudios: 23% a 26%, más alto que lo reportado en el bioma tropical (16.9%, de acuerdo con Hansen *et al.*, 2013) y en Latinoamérica (17%; Tyukavina *et al.*, 2015). Además, estos valores son drásticamente mayores que los reportados para Brasil (0.44%), la República Democrática del Congo (0.4%) e Indonesia (0.36%; Turubanova *et al.*, 2018). La gran proporción de falsos negativos encontrados en este estudio es probablemente el resultado de las características del paisaje. La complejidad topográfica y la presencia continua de nubes en el área de estudio, características típicas de muchos paisajes montañosos en México y Centroamérica (Karmalkar *et al.*, 2011; Cunningham *et al.*, 2019), podrían disminuir la capacidad de la base de datos de detectar la pérdida de cobertura forestal. Adicionalmente, el paisaje está compuesto de un mosaico de distintas coberturas creadas por

pequeñas unidades de producción cuyos cambios producen perturbaciones muy pequeñas para ser detectadas con precisión (Milodowski *et al.*, 2017; Turubanova *et al.*, 2018; Cunningham *et al.*, 2019).

La congruencia de la escala temporal (años) de pérdida de cobertura forestal predicha y observada fue de 49%-64.5% para coincidencias exactas y aumentó a 59.5%-77.5% para coincidencias dentro ±1 año. Estos valores son notoriamente más bajos que lo reportado por Hansen *et al.* (2013), quien encontró que el 75.2% de los puntos de muestreo fue asignado correctamente, y el 96.7% conferido dentro de ±1 de la pérdida observada. Asimismo, Linke *et al.* (2017) encontraron que en un bosque templado, 84.6% puntos fueron atribuidos correctamente para el año en que ocurrió la pérdida de cobertura, mientras que 92.1% fueron correctamente asignados dentro del rango de un año. Sin embargo, Milodowski *et al.* (2017) encontraron que los datos no lograron detectar perturbaciones pequeñas (<2 hectáreas), reportándolas como pérdida solo cuando las perturbaciones se habían expandido en años posteriores, sesgando por lo tanto la detección de pérdida de cobertura forestal a años posteriores. La mayoría de las imprecisiones temporales encontradas en nuestro estudio consistieron en la detección de pérdida más de dos años después de la pérdida observada. Por consiguiente, es posible que la presencia de pequeñas perturbaciones en la región, así como el uso de distintos satélites en los últimos años del periodo estudiado hayan inclinado los patrones temporales de pérdida forestal hacia años más recientes. Esto es visible en las series de tiempo, donde hay un cambio notable en el patrón de pérdida anual en el periodo 2001-2012, antes del cambio de satélites.

El muestreo probabilístico usado en este estudio permite reportar tendencias de pérdida de cobertura forestal más precisas; sin embargo, dicha metodología presenta algunos retos relacionados con el diseño muestral y la información espacial (Stehman y Foody, 2019). Si bien es recomendable calcular el tamaño muestral por medio de fórmulas pertinentes, en la práctica, el tamaño muestral está influido por elecciones subjetivas relacionadas con los objetivos buscados y las capacidades técnicas y económicas del equipo de trabajo (Olofsson *et al.*, 2014; Boschetti *et al.*, 2016; Stehman y Foody, 2019). Por otra parte, la asignación de los puntos de muestreo a las distintas categorías de suelo presentes en el mapa depende de un compromiso entre los distintos objetivos buscados (Stehman, 2012; Wagner y Stehman, 2015; Stehman y Foody, 2019). Así, el uso del muestreo probabilístico estratificado será más apropiado cuando el objetivo principal del trabajo sea el cálculo de estimaciones no sesgadas de cambio de uso del suelo, pero menos apropiado para calcular la precisión general del mapa de referencia (Stehman y Foody, 2019). Por último, los análisis basados en muestreos probabilísticos implican la pérdida de la información espacial contenida en el mapa de referencia, lo que impide generar análisis espaciales a partir de las estimaciones calculadas (Turubanova *et al.*, 2018). Recomendamos tener en cuenta lo anterior al usar muestreos probabilísticos para el análisis de dinámicas de cobertura del suelo.

RECOMENDACIONES

La base de datos de GFC brinda información sumamente valiosa y oportuna para el monitoreo de cambio de uso de suelo a grandes escalas. Sin embargo, para tendencias locales ponemos énfasis en la importancia de llevar a cabo estimaciones por muestreo de la pérdida de cobertura forestal utilizando la estratificación propuesta para la estimación apropiada de áreas. A pesar de que usamos dos distintas estimaciones por muestreo, recomendamos hacer uso exclusivamente de aquella que incluye todas las categorías, ya que la exclusión de la categoría de *No Pérdida* podría llevar a estimaciones sesgadas. Asimismo, en escalas subnacionales, es necesario considerar la posible incidencia de falsos negativos, particularmente en paisajes heterogéneos con una presencia dominante de minifundistas, como es el caso del presente estudio. Por otra parte, recomendamos realizar este tipo de estimación cuando se usen los datos integrados (v1.2 y posterior) para análisis temporales, pues una buena proporción de la pérdida de cobertura forestal ocurrió antes del año reportado. Estas es-

timaciones pueden servir para prevenir inferencias erróneas relacionadas con los patrones temporales de pérdida de cobertura forestal.

REFERENCIAS

Armenteras, D., Espelta, J. M., Rodríguez, N., y Retana, J. (2017). Deforestation dynamics and drivers in different forest types in Latin America: Three decades of studies (1980–2010). *Global Environmental Change*, *46*, 139–147. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.09.002

Blackman, A., y Villalobos, L. (2021). Use Forests or Lose Them? Regulated Timber Extraction and Tree Cover Loss in Mexico. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, *8*(1), 125–163. https://doi.org/10.1086/710837

Boschetti, L., Stehman, S. V. y Roy, D. (2016). A stratified random sampling design in space and time for regional to global scale burned area product validation. *Remote Sensing of Environment 186,* 465-478. https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.09.016

Ceddia, M. G. (2019). The impact of income, land, and wealth inequality on agricultural expansion in Latin America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *116*(7), 2527–2532. https://doi.org/10.1073/pnas.1814894116

Cho, K., Goldstein, B., Gounaridis, D., y Newell, J. P. (2021). Where does your guacamole come from? Detecting deforestation associated with the export of avocados from Mexico to the United States. *Journal of Environmental Management*, *278*, 111482. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111482

Chowdhury, R. R. (2006). Driving forces of tropical deforestation: The role of remote sensing and spatial models. *Singapore Journal of Tropical Geography*, *27*(1), 82–101. https://doi.org/10.1111/j.1467-9493.2006.00241.x

Cunningham, D., Cunningham, P., y Fagan, M. E. (2019). Identifying Biases in Global Tree Cover Products: A Case Study in Costa Rica. *Forests*, *10*(10), 10. https://doi.org/10.3390/f10100853

Ellis, E. A., Romero Montero, J. A., y Hernández Gómez, I. U. (2017). Deforestation Processes in the State of Quintana Roo, Mexico: The Role of Land Use and Community Forestry. *Tropical Conservation Science*, *10*, 1940082917697259. https://doi.org/10.1177/1940082917697259

Ellis, E., Martinez, A., Ortega, M., Gomez, I., y Castillo, D. (2020). Forest cover dynamics in the Selva Maya of Central and Southern Quintana Roo, Mexico: Deforestation or degradation? *Journal of Land Use Science*, *15*(1), 25–51. https://doi.org/10.1080/1747423X.2020.1732489

Ellis, E., Sierra-Huelsz, J., Ceballos, G., Binnquist, C., y Cerdan, C. (2020). Mixed Effectiveness of REDD plus Subnational Initiatives after 10 Years of Interventions on the Yucatan Peninsula, Mexico. *FORESTS*, *11*(9). https://doi.org/10.3390/f11091005

Figueroa, D., Galeana-Pizana, J., Nunez, J., Gomez, C., Hernandez-Castro, J., Sanchez-Ramirez, M., y Garduno, A. (2021). Assessing drivers and deterrents of deforestation in Mexico through a public policy tool. The adequacy of the index of economic pressure for deforestation. *Forest Policy and Economics*, *133*. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102608

Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., … Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, *478*(7369), 7369. https://doi.org/10.1038/nature10452

Friedl, M. A., McIver, D. K., Hodges, J. C. F., Zhang, X. Y., Muchoney, D., Strahler, A. H., Woodcock, C. E., Gopal, S., Schneider, A., Cooper, A., Baccini, A., Gao, F., y Schaaf, C. (2002). Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, *83*(1), 287–302. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00078-0

Galiatsatos, N., Donoghue, D. N. M., Watt, P., Bholanath, P., Pickering, J., Hansen, M. C., y Mahmood, A. R. J. (2020). An Assessment of Global Forest Change Datasets for National Forest Monitoring and Reporting. *Remote Sensing*, *12*(11), 11. https://doi.org/10.3390/rs12111790

Gao, Y., Skutsch, M., Paneque-Gálvez, J., y Ghilardi, A. (2020). Remote sensing of forest degradation: A review. *Environmental Research Letters*, *15*(10), 103001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abaad7

Ghazoul, J., Burivalova, Z., Garcia-Ulloa, J., y King, L. A. (2015). Conceptualizing Forest Degradation. *Trends in Ecology y Evolution*, *30*(10), 622–632. https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.08.001

González-Fernández, A., Segarra, J., Sunny, A., y Couturier, S. (2022). Forest cover loss in the Nevado de Toluca volcano protected area (Mexico) after the change to a less restrictive category in 2013. *Biodiversity and Conservation*, *31*(3), 871–894. https://doi.org/10.1007/s10531-022-02368-y

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., y Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone.

Remote Sensing of Environment, *202*, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Haines, K. (2021). Oaxaca and global forest governance: Indigenous autonomy, local institutions, and forest outcomes in Southern Mexico. *Journal of Political Ecology*, *28*, 25–46.

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., y Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, *342*(6160), 850–853. https://doi.org/10.1126/science.1244693

Hansen, M., Potapov, P., Margono, B., Stehman, S., Turubanova, S., y Tyukavina, A. (2014). Response to Comment on "High-resolution global maps of 21st-century forest cover change". *Science*, *344*(6187), 981–981. https://doi.org/10.1126/science.1248817

Hijmans, R.J. y van Etten, J. (2012). raster: Geographic analysis and modeling wit raster data. R package version 2.0-12. https://CRAN.R-project.org/package=raster

Izquierdo-Tort, S., Ortiz-Rosas, F., y Vázquez-Cisneros, P. A. (2019). 'Partial' participation in Payments for Environmental Services (PES): Land enrolment and forest loss in the Mexican Lacandona Rainforest. *Land Use Policy*, *87*, 103950. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.04.011

Jun, C., Ban, Y., y Li, S. (2014). Open access to Earth land-cover map. *Nature*, *514*(7523), 7523. https://doi.org/10.1038/514434c

Karmalkar, A. V., Bradley, R. S., y Diaz, H. F. (2011). Climate change in Central America and Mexico: Regional climate model validation and climate change projections. *Climate Dynamics*, *37*(3), 605. https://doi.org/10.1007/s00382-011-1099-9

Kinnebrew, E., Ochoa-Brito, J. I., French, M., Mills-Novoa, M., Shoffner, E., y Siegel, K. (2022). Biases and limitations of Global Forest Change and author-generated land cover maps in detecting deforestation in the Amazon. *PLOS ONE*, *17*(7), e0268970. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268970

Klass, K., Belle, S. V., Campos-Villanueva, A., Malabet, F. M., y Estrada, A. (2020). Effects of variation in forest fragment habitat on black howler monkey demography in the unprotected landscape around Palenque National Park, Mexico. *PeerJ*, *8*, e9694. https://doi.org/10.7717/peerj.9694

Krylov, A., Steininger, M. K., Hansen, M. C., Potapov, P. V., Stehman, S. V., Gost, A., Noel, J., Talero Ramirez, Y., Tyukavina, A., Di Bella, C. M., Ellis, E. A., y Ellis, P. (2018). Contrasting tree-cover loss and subsequent land cover in two neotropical forest regions: Sample-based assessment of the Mexican Yucatán and Argentine Chaco. *Journal of Land Use Science*, *13*(6), 549–564. https://doi.org/10.1080/1747423X.2019.1569169

Lawrence, T. J., Stedman, R. C., Morreale, S. J., y Taylor, S. R. (2019). Rethinking Landscape Conservation: Linking Globalized Agriculture to Changes to Indigenous Community-Managed Landscapes. *Tropical Conservation Science*, *12*, 1940082919889503. https://doi.org/10.1177/1940082919889503

Linke, J., Fortin, M.-J., Courtenay, S., y Cormier, R. (2017). High-resolution global maps of 21st-century annual forest loss: Independent accuracy assessment and application in a temperate forest region of Atlantic Canada. *Remote Sensing of Environment*, *188*, 164–176. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.040

López-Arcadia, C.A. (2022). Después de la roya: red de cafeticultura y cambios en la cobertura forestal del paisaje cafetalero del centro de Veracruz. [Tesis de Maestría]. Instituto de Ecología, A.C.

Matricardi, E. A. T., Skole, D. L., Costa, O. B., Pedlowski, M. A., Samek, J. H., y Miguel, E. P. (2020). Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. *Science*, *369*(6509), 1378–1382. https://doi.org/10.1126/science.abb3021

McRoberts, R. E., Vibrans, A. C., Sannier, C., Næsset, E., Hansen, M. C., Walters, B. F., y Lingner, D. V. (2016). Methods for evaluating the utilities of local and global maps for increasing the precision of estimates of subtropical forest area. *Canadian Journal of Forest Research*, *46*(7), 924–932. https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0064

Milodowski, D. T., Mitchard, E. T. A., y Williams, M. (2017). Forest loss maps from regional satellite monitoring systematically underestimate deforestation in two rapidly changing parts of the Amazon. *Environmental Research Letters*, *12*(9), 094003. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7e1e

Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., y Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, *148*, 42–57. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015

Pettorelli, N., Laurance, W. F., O'Brien, T. G., Wegmann, M., Nagendra, H., y Turner, W. (2014). Satellite remote sensing for applied ecologists: Opportunities and challenges. *Journal of Applied Ecology*, *51*(4), 839–848. https://doi.org/10.1111/1365-2664.12261

Portillo-Quintero, C., y Smith, V. (2018). Emerging trends of tropical dry forests loss in North y Central America during 2001–2013: The role of contextual and underlying drivers. *Applied Geography*, *94*, 58–70. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.03.011

Powlen, K. A., Gavin, M. C., y Jones, K. W. (2021). Management effectiveness positively influences forest conservation outcomes in protected areas. *Biological Conservation*, *260*, 109192. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109192

Qin, Y., Xiao, X., Wigneron, J.-P., Ciais, P., Brandt, M., Fan, L., Li, X., Crowell, S., Wu, X., Doughty, R., Zhang, Y., Liu, F., Sitch, S., y Moore, B. (2021). Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Climate Change*, *11*(5), 5. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01026-5

Ramirez-Reyes, C., Sims, K. R. E., Potapov, P., y Radeloff, V. C. (2018). Payments for ecosystem services in Mexico reduce forest fragmentation. *Ecological Applications*, *28*(8), 1982–1997. https://doi.org/10.1002/eap.1753

Sandker, M., Carrillo, O., Leng, C., Lee, D., d'Annunzio, R., y Fox, J. (2021). The Importance of High–Quality Data for REDD+ Monitoring and Reporting. *Forests*, *12*(1), 1. https://doi.org/10.3390/f12010099

Sannier, C., McRoberts, R. E., y Fichet, L.-V. (2016). Suitability of Global Forest Change data to report forest cover estimates at national level in Gabon. *Remote Sensing of Environment*, *173*, 326–338. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.032

Seymour, F., y Harris, N. L. (2019). Reducing tropical deforestation. *Science*, *365*(6455), 756–757. https://doi.org/10.1126/science.aax8546

Sims, K. R. E., y Alix-Garcia, J. M. (2017). Parks versus PES: Evaluating direct and incentive-based land conservation in Mexico. *Journal of Environmental Economics and Management*, *86*, 8-28. https://doi.org/10.1016/j.jeem.2016.11.010

Stehman, S. V. (2013). Estimating area from an accuracy assessment error matrix. *Remote Sensing of Environment*, *132*, 202-211. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.016

Stehman, S.V. (2014). Impact of sample size allocation when using stratified random sampling to estimate accuracy and area of land-cover change. *Remote Sensing Letters 3*(2), 111-120. https://dx.doi.org/10.1080/01431161.2010.541950

Stehman, S.V. y Foody, G.M. (2019). Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products. *Remote Sensing of Environment, 231,* 111199. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.018

Tropek, R., Sedláček, O., Beck, J., Keil, P., Musilová, Z., Šímová, I., y Storch, D. (2014). Comment on "High-resolution global maps of 21st-century forest cover change". *Science*. https://doi.org/10.1126/science.1248753

Turubanova, S., Potapov, P. V., Tyukavina, A., y Hansen, M. C. (2018). Ongoing primary forest loss in Brazil, Democratic Republic of the Congo, and Indonesia. *Environmental Research Letters*, *13*(7), 074028. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacd1c

Tyukavina, A., Baccini, A., Hansen, M. C., Potapov, P. V., Stehman, S. V., Houghton, R. A., Krylov, A. M., Turubanova, S., y Goetz, S. J. (2015). Aboveground carbon loss in natural and managed tropical forests from 2000 to 2012. *Environmental Research Letters*, *10*(7), 074002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/7/074002

Wagner, J.E. y Stehman, S.V. (2015). Optimizing sample size allocation to strata for estimating area and map accuracy. *Remote Sensing of Environment, 168,* 126-133. https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.06.027

Apéndice 1. Área de pérdida forestal (en hectáreas) para la estimación basada en mapa, la estimación por muestreo incluyendo las categorías Pérdida y Pérdida Posible, y la estimación incluyendo todas las categorías. P: Pérdida; PP: Posible Pérdida; NP: No Pérdida; EE: Error estándar.

Región	Año	Estimación basada en mapa	Estimación P+PP ± EE	Media móvil P+PP	Estimación P+PP+NP ± EE	Media móvil P+PP+NP
Coatepec	2001	7.0	14.3±10.1	57.7	14.3±10.1	542.3
	2002	20.5	101.1±30.3	72.2	1070.2±554.7	502.9
	2003	35.1	101.1±30.3	86.5	424.1±324.5	732.6
	2004	33.2	57.3±19.9	84.4	703.4±455.0	622.5
	2005	49.2	93.9±29.5	69.5	740±455.5	500.3
	2006	82.2	57.3±19.9	96.3	57.3±19.9	527
	2007	46.3	137.6±37.1	91.6	783.7±456.1	522.4
	2008	107.1	79.9±29.8	84.5	726±455.5	515.2
	2009	58.5	35.8±15.9	82.3	35.8±15.9	297.7
	2010	76.4	131.2±39.1	121.3	131.2±39.1	121.3
	2011	73.7	196.8±47.2	123.8	196.8±47.2	339.2
	2012	40.0	43.4±20.5	84.8	689.5±455.0	300.2
	2013	11.3	14.3±10.1	31.4	14.3±10.1	354.5
	2014	26.4	36.6±21.9	43.5	359.6±323.8	258.9
	2015	43.1	79.6±27.9	67.5	402.6±324.3	498.2
	2016	89.0	86.4±26.6	125.1	732.5±455.3	771.2
	2017	163.6	209.3±42.5	216.9	1178.4±555.5	970.7
	2018	242.4	355.2±57.8	240.9	1001.3±458.2	1102.4
	2019	92.2	158.4±35.7	241.2	1127.5±555.0	779.6
	2020	135.8	210±45.1	184.2	210.0±45.1	668.8
Córdoba	2001	4.3	7.0±4.9	10.5	358.9±378.9	389.3
	2002	2.7	14.0±6.9	11.6	392.8±378.9	516.8
	2003	7.6	14.0±6.9	18.9	771.7±533.1	524.0
	2004	3.3	28.6±11.4	21.4	407.5±379.0	652.9
	2005	8.0	21.6±10.3	24.0	779.4±533.2	529.1
	2006	12.4	21.6±10.3	20.5	400.5±379.0	525.6
	2007	9.6	18.1±9.7	41.2	397.0±379.0	293.8
	2008	14.3	83.7±20.8	36.3	83.7±20.8	162.6
	2009	16.8	7.0±4.9	47.5	7.0±4.9	47.5
	2010	16.8	51.6±17.3	38.1	51.6±17.3	38.1
	2011	15.6	55.8±18.5	45.6	55.8±18.5	298.1
	2012	17.9	29.3±12.8	35.8	787±533.2	414.7
	2013	5.3	22.3±11.9	28.4	401.2±379.0	786.1
	2014	14.1	33.5±14.5	45.1	1170.1±649.7	550.3

Región	Año	Estimación basada en mapa	Estimación P+PP ± EE	Media móvil P+PP	Estimación P+PP+NP ± EE	Media móvil P+PP+NP
Córdoba	2015	39.7	79.6±19.7	72.6	79.6±19.7	956.6
	2016	67.0	104.7±22.2	122.1	1620.2±746.5	753.6
	2017	143.8	182.1±29.6	137.5	561.0±380.0	1021.5
	2018	115.7	125.7±23.5	158.2	883.4±533.6	663.4
	2019	82.9	166.8±28.0	128.0	545.7±379.9	759.4
	2020	101.2	91.4±22.0	129.1	849.1±533.5	697.4
Huatusco	2001	4.8	59.9±22.1	60.1	594.7±376.9	594.9
	2002	6.2	60.3±20.6	52.1	595.1±376.8	408.6
	2003	11.2	36.0±16.8	40.2	36.0±16.8	218.5
	2004	11.2	24.3±12.0	32.1	24.3±12.0	32.1
	2005	13.2	36.0±16.8	22.1	36.0±16.8	22.1
	2006	15.1	6.1±6.1	6.1	6.1±29.8	29.8
	2007	7.4	47.4±21.9	33.8	47.4±21.9	122.9
	2008	24.1	47.8±20.5	45.6	315.2±268.2	134.8
	2009	25.2	41.7±19.6	49.7	41.7±19.6	228.0
	2010	24.0	59.6±23.5	71.6	327.0±268.4	249.8
	2011	24.6	113.4±31.3	73.6	380.8±269.2	341.0
	2012	28.9	47.8±20.5	61.7	315.2±268.2	240.0
	2013	14.7	23.9±14.5	46.0	23.9±14.5	135.2
	2014	43.3	66.4±21.4	88.1	66.4±21.4	88.1
	2015	81.1	174.1±36.1	149.8	174.1±36.1	595.5
	2016	139.3	209.0±41.5	191.9	1546.0±587.2	910.9
	2017	193.9	210.5±38.4	198.3	1012.7±460.0	1089.6
	2018	262.2	175.3±32.9	216.8	710.0±377.7	1019.0
	2019	119.0	264.8±42.2	190.7	1334.4±528.3	814.6
	2020	164.6	132.0±31.9	198.4	399.4±269.3	866.9
Zongolica	2001	3.5	9.1±5.9	33.0	9.1±5.9	123.9
	2002	7.0	57.0±13.6	30.0	238.8±182.4	272.5
	2003	3.1	23.9±8.9	34.9	569.6±311.9	338.1
	2004	5.1	23.9±8.9	21.6	205.8±182.1	324.7
	2005	2.6	16.8±7.0	17.3	198.7±182.0	199.1
	2006	6.7	11.0±6.2	15.3	192.9±182.0	136.6
	2007	3.2	18.1±8.2	13.6	18.1±8.2	134.8
	2008	5.1	11.6±4.7	13.6	193.5±181.9	74.2
	2009	8.2	11.0±6.2	15.1	11.0±6.2	75.7
	2010	8.4	22.6±7.7	26.3	22.6±7.7	26.3
	2011	8.9	45.3±12.8	28.0	45.3±12.8	28.0

Región	Año	Estimación basada en mapa	Estimación P+PP ± EE	Media móvil P+PP	Estimación P+PP+NP ± EE	Media móvil P+PP+NP
Zongolica	2012	9.8	16.2±8.0	22.9	16.2±8.0	22.9
	2013	8.3	7.1±5.5	21.8	7.1±5.5	203.7
	2014	6.9	42.1±13.7	18.4	587.7±312.1	200.2
	2015	12.3	5.8±3.3	24.4	5.8±3.3	388.1
	2016	24.2	25.3±9.9	31.1	570.9±312.0	334.2
	2017	62.0	62.1±12.6	46.4	425.8±256.2	470.7
	2018	66.2	51.8±12.6	87.6	415.5±256.2	633.2
	2019	99.8	148.8±19.7	74.2	1058.2±398.9	559.2
	2020	36.6	22.0±8.7	85.4	203.9±182.1	631.0

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60804 • ARTÍCULOS
Núm. 113 • Abril • 2023 • e60804
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Ingenieros geógrafos en la vida política y académica del México decimonónico. La primera generación

Engineering geographers in the political and academic life of nineteenth-century Mexico. The first generation

José Omar Moncada Maya*

Recibido: 29/09/2023. Aceptado: 9/11/2023. Publicado: 23/11/2023.

Resumen. El siglo XIX en México es significativo pues se da la institucionalización académica y profesional de la geografía. A partir de 1834 con el establecimiento de los estudios de agrimensor-geógrafo, pero sobre todo con la instauración de la ingeniería geográfica en 1843 en el Colegio de Minería de la ciudad de México, un pequeño grupo de apenas de 18 individuos concluye sus estudios y logra un importante reconocimiento académico, social y político que le permitió desarrollar una brillante actividad docente en instituciones como el propio Colegio de Minería y el Colegio Militar, así como en otras instituciones de educación superior; a ellos se debe sumar a un único ingeniero geógrafo que desarrolla sus estudios en el estado de Jalisco. En la década de 1850, apenas tres individuos obtienen su título de ingeniero geógrafo: José Salazar Ilarregui, Francisco Díaz Covarrubias y Francisco Jiménez, quienes tal vez sean los más reconocidos en los textos de historia de la ciencia mexicana del siglo XIX. En este artículo se muestra cómo, además de la docencia, desarrollaron una activa participación en reconocimientos territoriales y expediciones científicas apoyadas por el gobierno mexicano. Las experiencias adquiridas les permitió, posteriormente, ocupar diversos cargos públicos, con gobiernos de diferentes tendencias políticas. Pero destacará, sobre todo, el vínculo que establecerá la comunidad geográfica con la Secretaría de Fomento a todo lo largo de la segunda mitad de siglo, a grado tal que algunos de ellos ocuparán el cargo de secretario de esta, o subsecretarios u oficial mayor. Un último aspecto que se desea destacar es el también destacado rol que desempeñan en las principales asociaciones científicas del México decimonónico, desempeñando los principales cargos en varias de ellas. Sin embargo, para la historia oficial sus contribuciones a la ciencia o a la cultura pasan a un segundo término, y es su posición política la que ha determinado el reconocimiento que se les da actualmente. Así, Salazar y Jiménez, pese a su importante desempeño como hombres de ciencia y como funcionarios, por su colaboración con el imperio de Maximiliano de Habsburgo siguen desempeñando un papel secundario para la ciencia mexicana.

Palabras clave: Colegio de Minería, institucionalización profesional, Secretaría de Fomento, sociedades científicas.

Abstract. The 19th century in Mexico is significant for the academic and professional institutionalization of geography. Starting in 1834 with the establishment of the surveyor-geographer studies, but especially with the establishment of geographic engineering in 1843 at the Colegio de Minería in Mexico City, a small group of only 18 individuals completed their studies and achieved an important academic, social and political recognition that allowed them to develop a brilliant teaching activity in institutions such as the Colegio de Minería and the Colegio Militar, as well as in other institutions of higher education; to them must be added a single geographic engineer who developed his studies in the state of Jalisco. In the 1850s, only three individuals obtained their degrees as geographic engineers: José Salazar Ilarregui, Francisco Díaz Covarrubias and Francisco

*Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, 04510, alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7278-6407. Email: acad@geografia.unam.mx

Jiménez, who are perhaps the most recognized in the texts on the history of Mexican science in the 19th century. This article shows how, in addition to teaching, they developed an active participation in territorial surveys and scientific expeditions supported by the Mexican government. The experiences acquired allowed them, later on, to occupy various public positions, with governments of different political tendencies. But the link that the geographic community will establish with the Ministry of Development throughout the second half of the century will stand out above all, to such an extent that some of them will occupy the position of secretary of the Ministry, or undersecretaries or senior officials. A final aspect to be emphasized is the outstanding role they also played in the main scientific associations of nineteenth-century Mexico, holding the main positions in several of them. However, for official history, their contributions to science or culture are secondary, and it is their political position that has determined the recognition they are given today. Thus, Salazar and Jiménez, despite their important performance as men of science and as civil servants, for their collaboration with the empire of Maximilian of Habsburg continue to play a secondary role for Mexican science.

Keywords: Colegio de Minería, professional institutionalization, Secretaría de Fomento, scientific societies.

El 7 de octubre de 1843 se publicó en el *Diario del Gobierno de la República Mexicana* el Reglamento de estudios del Colegio de Minería (*Diario del Gobierno de la República Mexicana*, 1743). En él se contemplaron cambios importantes en su estructura y programas respecto a su etapa previa, pues además de las tradicionales carreras de ensayador, apartador de oro y plata y beneficiador de metales, que se establecieron originalmente en el Real Seminario de Minería, aparecen tres nuevas profesiones: ingeniero en minas, ingeniero geógrafo y naturalista.

Ello lo hemos considerado el inicio de la institucionalización de la enseñanza de la geografía en México, toda vez que se establecen tres años de estudios "especiales", específicos de la profesión, más dos años de práctica con los "ingenieros geógrafos del gobierno, en clase de agregados a las comisiones que desempeñan dichos oficiales". Se crean nuevas cátedras, entre ellas la de geografía –que impartiría Blas Balcárcel–, y se establece que el jurado para el examen final de la nueva profesión debería estar integrado por los catedráticos de geografía, geodesia, física y los dos de matemáticas (Moncada, 2003).

No era la primera vez que se establecían estudios donde la geografía estaba presente, Héctor Mendoza señala diversos proyectos que se promovieron en los primeros años del México Independiente, donde destaca el "Proyecto de Reglamento General de Instrucción Pública", de diciembre de 1823, que consideraba la creación de escuelas politécnicas donde se impartirían conocimientos "comunes y preliminares para las Escuelas de aplicación de Artillería; ingenieros; Minas; Caminos, puentes y canales; ingenieros geógrafos, y construcción naval" (Mendoza, 1993). Por supuesto que en las condiciones sociales, económicas y políticas en que se encontraba el país, la fundación de esas Escuelas de Aplicación no pasaba de ser un buen deseo, y en ello coincidieron figuras de la talla de Lucas Alamán y José María Luis Mora. Nuevos proyectos educativos se dieron en 1826, 1830 y 1832, y en todos se consideró a la ingeniería geográfica, pero ninguno pasó más allá del papel (Mendoza, 1993). Pero resulta chocante que no se diera reconocimiento alguno al Colegio de Minería –con la Independencia ya había abandonado su original nombre de Real Seminario de Minería– y en más de una ocasión se promovió su desaparición, sin duda por ese espíritu antiespañol imperante en algunos grupos sociales, sin considerar que ya eran mexicanos los que tenían el control de este, y que a partir de 1827 reinició sus actividades con regular éxito.

Sin duda, el proyecto más firme se dio en 1833, año en que el vicepresidente Valentín Gómez Farías promovió drásticas reformas educativas, desapareciendo la Universidad y creando nuevos centros de instrucción superior. Uno de ellos, el Tercer establecimiento de Ciencias Físicas y Matemáticas, fue la continuación del Colegio de Minería, bajo la dirección del ingeniero Ignacio Mora y Villamil, y en donde se crea la profesión de agrimensor-geógrafo, con una perspectiva totalmente cartográfica. Sin embargo, al año siguiente retoma el poder el presidente Antonio López de Santa Anna, y uno de sus primeros actos es suspender los establecimientos creados por Gómez Farías, restableciendo el Colegio de Minería a su estado anterior, incluyendo cursos y profesorado (Ramírez, 1982).

Así pues, todo quedó en intentos fallidos. Pero el hecho mismo de crear estudios en geografía no

necesariamente daría lugar a una demanda por parte del estudiantado. La gran mayoría eligió los estudios de ingeniero de minas –y posteriormente otras opciones de ingeniería–, que les abría las puertas para trabajar en alguno de los muchos fundos mineros. En contraste, de acuerdo con el número de ingenieros geógrafos titulados, solo un puñado de estudiantes eligió estos estudios.

A pesar de ello, se reconocen al menos seis programas de estudio para la preparación de los interesados en la geografía. El primero de ellos, de 1834, dirigido a la formación del geógrafo agrimensor; en 1843, como se detalla más adelante, se establece la formación del ingeniero geógrafo. Habrá varias reformas durante la segunda mitad del siglo, no siempre positivas, como fue el caso de 1859, bajo el gobierno de Miguel Miramón, donde de las 14 asignaturas que se cursaban, apenas seis respondían al estudio de las ciencias, y el resto eran cursos de dibujo, idiomas y religión. En cambio, las reformas de final del siglo lograron que se diera una identificación de la geografía con la astronomía, logrando los ingenieros geógrafos un gran reconocimiento social y académico.

LOS INGENIEROS GEÓGRAFOS

Con la reforma al plan de estudios de 1843 se establece la profesión de ingeniero geógrafo. De acuerdo con nuestros datos, apenas 18 personas obtienen dicho título en el Colegio de Minería

Cuadro 1. Planes de estudio de la profesión de ingeniero geógrafo.

1834	1843	1859	1869	1883	1897
1er. curso de Matemáticas puras	Elementos de mecánica racional	1er. curso de Matemáticas	Matemáticas superiores	Algebra superior	Matemáticas superiores
2º. curso de Matemáticas puras	Teoría del calórico, de la electricidad y del magnetismo	2º. curso de Matemáticas	Geometría descriptiva	Geometría analítica y Cálculo infinitesimal	Geometría descriptiva
Física	Elementos de óptica, acústica y meteorología	Mecánica racional e industrial	Mecánica analítica	Topografía e hidromensura y prácticas	Topografía y Legislación de tierras y aguas
Cosmografía y geografía	Cosmografía	Topografía y geodesia	Geodesia	Mecánica analítica	Hidrografía y meteorología
Dibujo	Geodesia	Física	Astronomía teórico-práctica	Geodesia	Mecánica analítica
Lavado de planos	Uranografía	Astronomía	Hidrografía	Astronomía práctica	Geodesia
Latinidad (2 cursos)	Geografía	Dibujo natural	Matemática del globo	Física-matemática	Astronomía práctica
Francés	Delineación	Dibujo de paisaje	Física	Cálculo de probabilidades y Teoría de los errores	Física-matemática
Prácticas	Inglés	Dibujo lineal	Dibujo topográfico	Hidrografía y meteorología	Cálculo de probabilidades y Teoría de los errores
	Prácticas	Francés	Dibujo topográfico y geográfico	Geología	Astronomía general y física
		Inglés (3 años)	Dibujo Geográfico	Dibujo geográfico	Mecánica celeste

Cuadro 1. Continuación.

1834	1843	1859	1869	1883	1897
		Religión		Dibujo topográfico	Hidráulica
				Prácticas	Geología
					Economía política
					Dibujo geográfico
					Dibujo topográfico
					Prácticas

–después Escuela Nacional de Ingenieros (ENI)–, y se desarrollan profesionalmente en diferentes ámbitos, principalmente en la educación y en el servicio público.

A estos 18 individuos debemos añadir al ingeniero Carlos F. de Landero, quien en 1887 obtiene el título de ingeniero geógrafo en la Escuela de Ingenieros del Estado de Jalisco (De la Torre, 2000). Única persona que obtiene dicho título en una institución educativa del interior del país.[1]

De acuerdo con los datos del Cuadro 2, en el desarrollo de la geografía del siglo XIX se pueden reconocer tres claros periodos. El primero, a partir del establecimiento de los estudios de la ingeniería geográfica en 1843, que permitió que tres alumnos obtuvieran su título en la década siguiente, y a quienes reconocemos como "la primera generación"; un segundo periodo, que inicia después de la restauración de la República, 1867, y que los planes de estudio de 1869 y 1883 permiten que once estudiantes obtengan el título profesional de ingeniero geógrafo entre 1883 y 1893, y que constituyen "la segunda generación". Vale la pena recordar aquí que con las reformas de 1883 y 1897 se empieza a identificar a la geografía y a la astronomía como una sola profesión, y tal vez ello contribuyó al incremento en el número de alumnos. Finalmente, cuatro

Cuadro 2. Ingenieros geógrafos egresados del Colegio de Minería y de la Escuela Nacional de Ingenieros (1856-1917).

Nombre	Año de titulación
1. SALAZAR ILARREGUI, José	1856
2. JIMÉNEZ, Francisco	1856
3. DÍAZ COVARRUBIAS, Francisco	1858
4. MENDIZÁBAL Y TAMBORREL, Joaquín	1883
5. FERNÁNDEZ, Leandro	1884
6. DÍAZ LOMBARDO, Isidro	1885
7. TAMBORREL, José	1887
8. DÍAZ RUGAMA, Adolfo	1887
9. VALLE, Felipe	1890
10. PÉREZ, Ezequiel	1890
11. GAMA, Valentín	1891
12. MATEOS, Juan	1891
13. BELTRÁN Y PUGA, Guillermo	1891
14. ARAGÓN, Agustín	1893
15. ALEMÁN ROMO, Silverio	1906
16. GALLO MONTERRUBIO, Joaquín	1909
17. DÍAZ RIVERO, Francisco	1917
18. SÁNCHEZ, Pedro C.	s.f.

Fuente: elaboración propia a partir de: *Noticias de las personas aprobadas en la Escuela Nacional de Ingenieros para ejercer alguna de las profesiones establecidos en ella. Comprende desde el 8 de febrero de 1859 al 30 de septiembre de 1894*. México, Secretaría de Fomento, 1894; "Lista nominal de los señores Ingenieros titulados en la Escuela Imperial de Minas con expresión de las fechas de sus exámenes o títulos", en *Memoria presentada a S. M. el Emperador por el Ministro de Fomento Luis Robles Pezuela… el año de 1865*. México, Secretaría de Fomento, 1866, pp. 359-365.

[1] Moncada (2003, p. 70) señala que en 1861 se estableció la ingeniería geográfica en el Liceo de Varones del Estado de Jalisco (después Escuela de Ingenieros); en 1870 en el Instituto Científico y Literario del Estado de México, en el Colegio del Estado de Guanajuato y en el Instituto Científico de San Luis Potosí.

alumnos obtendrán el título ya iniciado el siglo XX, "la tercera generación", y aunque en los planes de estudio de la Escuela Nacional de Ingenieros siguió la enseñanza de la ingeniería geográfica, la demanda fue casi nula, lo que llevó a su desaparición.

La institucionalización profesional de la disciplina facultó que este pequeño grupo de profesionales desempeñara muy diversas actividades que les permitió el reconocimiento social. Por supuesto que no podemos generalizar, toda vez que estamos tratando de individuos, con raíces familiares y relaciones sociales muy diferentes, pero si podemos afirmar que casi todos ellos desarrollaron una actividad académica que les permitió vincularse a alguna de las instituciones educativas más importantes de la ciudad capital. Porque también debemos destacar que, en su gran mayoría, desarrollaron dichas actividades profesionales en la ciudad de México. Vinculado a sus actividades académicas como docentes, se encuentra su participación en diversas sociedades científicas, donde llegaron a ocupar puestos de dirección.

Igualmente podemos destacar que un gran número de ellos ocuparon puestos notables de responsabilidad pública. Y ello es uno de los aspectos que se desea resaltar en este artículo, pues llegaron a ocupar los cargos de secretarios de Estado y de oficiales mayores o subsecretarios; otros más ocuparon cargos diversos que daremos a conocer al referirnos a ellos.

Será inevitable alguna repetición de información, toda vez que existió una estrecha relación entre esta pequeña comunidad. Los primeros en obtener el título fueron profesores de la segunda generación en la Escuela Nacional de Ingenieros o en el Colegio Militar. Igualmente compartieron actividades en la Secretaría de Fomento, así como en comisiones científicas. Por último, se dará la información sobre los ingenieros geógrafos, en orden cronológico a la obtención del título.

LA PRIMERA GENERACIÓN

Como se señaló líneas arriba, para la primera generación de ingenieros geógrafos se reconoce a José Salazar Ilarregui, Francisco Jiménez y Francisco Díaz Covarrubias que, si bien obtuvieron el título con apenas una diferencia de dos años entre los dos primeros y el tercero, si había una diferencia de edad, pues Salazar fue un año mayor que Jiménez y diez años mayor que Díaz Covarrubias. Y ello es significativo, ya que Salazar fue profesor de los dos restantes, y Jiménez, aunque es coetáneo del primero, estudio originalmente en el Colegio Militar y posteriormente en Minería.

Se reitera que se hará énfasis en la actividad pública de los ingenieros geógrafos, toda vez que, en otro momento, se pudo reunir gran parte de la producción científica de ellos; por lo que solo cuando sea necesario se mencionarán algunos de sus textos (véase Moncada *et al.*, 1999).

José Salazar Ilarregui.[2] En el anecdotario histórico de la profesión encontramos que el 18 de marzo de 1856, "… la Junta Facultativa del Colegio [de Minería] expide el primer título de Ingeniero Geógrafo, distinguiendo con él al Sr. José Salazar Ilarregui, 'para darle un testimonio honroso del alto concepto que merece por su carrera científica y sus servicios'" (Ramírez, 1982). Salazar Ilarregui nació en la ciudad de México en septiembre de 1823, fue estudiante en el Colegio de Minería entre 1841 y 1845 y, al año siguiente, se incorporó como profesor –sustituto de cátedras– impartiendo la asignatura de Cosmografía, geodesia y uranografía, en sustitución de Tomas Ramón del Moral. Ese mismo año de 1846 sustentó los exámenes para obtener los títulos de agrimensor e hidromensor y ensayador-apartador de metales (S. R., 1892).[3] De forma inmediata se incorporó como docente de la misma institución.

En 1849, una vez firmado el tratado de paz con los Estados Unidos, se le nombró geómetra

[2] En el caso de José Salazar Ilarregui, como con otros ingenieros, se cuenta con esbozos biográficos que son la base sobre la cual se escribieron algunas de las semblanzas de este artículo. Se señalan al inicio para evitar reiteraciones en las citas; en este caso son: S. R. (1892) y Tamayo y Moncada (2004). Obviamente se complementan con otras referencias que se señalan a lo largo del texto.

[3] Es casi seguro que el autor del texto sea el ingeniero Santiago Ramírez, con quien Salazar llevó una muy buena amistad.

de la Comisión Mexicana de Límites, que trazó la frontera entre México y los Estados Unidos (Tamayo, 2001; Tamayo y Moncada, 2000).[4] A la muerte del general Pedro García Conde, en 1851, sería nombrado comisario hasta el fin de los trabajos de la Comisión, en 1857. Producto de la primera etapa de su trabajo fue la obra *Datos de los trabajos astronómicos y topográficos, dispuestos en forma de Diario* (Salazar, 1850), que narra los trabajos para establecer la frontera entre la Alta y la Baja California.

A su regreso a la ciudad capital se reintegró a sus clases en el Colegio de Minería, y en 1859 inició sus actividades en el sector público. El primer cargo que ocupó fue el de regidor del Ayuntamiento de la ciudad de México e inspector de obras públicas (febrero de 1859), y cuatro meses después se le nombró interventor de la Casa de Moneda (S. R., 1892).

Siendo ya un científico reconocido, el Poder Ejecutivo de la Regencia del Imperio, establecido durante la intervención francesa, lo nombró, el 27 de junio de 1863, subsecretario de Estado y del despacho de Fomento, cargo que ocupará durante 14 meses. En este cargo expidió diversos decretos para organizar los tribunales de comercio de las ciudades de Puebla, Orizaba y Veracruz; organizó y asignó importantes apoyos económicos a diversas instituciones de educación, como fue el caso de la Escuela Especial de Comercio de la ciudad de México, la Escuela de Agricultura, la Academia de Bellas Artes de San Carlos y el Colegio de Minería, así como para la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística. Concedió importantes recursos para obras públicas de beneficio común, como el desagüe de Huehuetoca, la reposición de caminos y puentes y, mediante un concurso, designó a la compañía de Juan Poots para establecer el alumbrado con gas en la ciudad de México. Igualmente se ocupó, a petición del emperador Maximiliano, de la construcción del monumento a la Independencia Nacional, y encargó a Manuel Orozco y Berra la elaboración de una división territorial del Imperio Mexicano.

De forma casi simultánea se le nombra director interino del Colegio de Minería, cargo desde el que impulsa el establecimiento de un observatorio astronómico. En 1864, ya con Maximiliano como emperador, se le designa Comisario imperial de la península de Yucatán y se le otorga la Cruz de Gran Oficial de la Orden de Guadalupe. Entre las actividades más notables que emprendió se cuentan: el establecimiento del telégrafo entre Mérida y el puerto de Sisal, la apertura de pozos artesianos para abastecer de agua a la ciudad de Mérida, el establecimiento de una comisión científica que levantó el mapa de la ciudad de Mérida y la creación de un observatorio meteorológico y astronómico en el antiguo Colegio de San Pedro (Sánchez Novelo, 1983).

Un tema de gran importancia era que los sitios arqueológicos de la península no se consideraban parte del patrimonio nacional; por ello, el ingeniero Salazar expide un decreto para lograr su conservación, con lo cual se dio el primer paso para resguardar los restos de la cultura maya, así como crear el Museo Arqueológico. El 5 de septiembre de 1865 expidió la Ley de Colonización y su respectivo reglamento, con ella se pretendía recibir colonos de cualquier parte del mundo; estableció el Banco de Avío de la Península de Yucatán; reestableció el cargo de abogado defensor de los indios y promovió la apertura de 55 escuelas elementales (S. R. 1892; *Yucatán en el tiempo*).

En 1866 regresa a la capital del país, ocupando en distintos momentos las carteras del ministerio de Gobernación, interino de Estado y de Fomento; el 13 de septiembre se le nombra consejero de Estado. Todos estos cargos los desempeña en una situación de crisis del gobierno, pues el "Imperio" se encontraba en franco retroceso. En octubre se le envía de nueva cuenta a Mérida, con el nombramiento de Gobernador civil y militar de la Península de Yucatán y, con esa función le corresponderá capitular la plaza ante el ejército republicano.

Salazar fue apresado y a punto de ser ejecutado, el pueblo de la ciudad de Mérida, a quien tanto había beneficiado, intercedió por él y le fue perdonada la vida por el general republicano Manuel Cepeda Peraza, aunque se le condenó al exilio. Obtuvo un pasaporte para salir al extranjero, primero a Cuba

[4] Además de García Conde y Salazar Ilarregui, a la comisión se integraron Francisco Jiménez, Juan B. Espejo, Agustín y Luis Díaz, Agustín García Conde, Manuel Alemán y el Dr. Ramírez como naturalista.

y de ahí a Nueva York. En Estados Unidos permaneció tres años; a su regresó a México se encontró en una situación muy crítica ya que se le había tachado de traidor a la patria y se le expulsó de las sociedades científicas que antes lo habían alabado (Sánchez Novelo, 1983). Para sobrevivir establece un colegio particular –la Escuela Científica de la Trinidad–, además de realizar algunas actividades para empresas mineras.

En 1878, por recomendación de su antiguo discípulo, Manuel Fernández Leal, subsecretario de Fomento, el presidente Porfirio Díaz lo nombra jefe y primer astrónomo de la Comisión mexicana de reconocimiento de la frontera entre México y Guatemala, marchando hacia esos territorios en el mes de octubre (S. R., 1892; Caballero, 2010).

El hecho de haber trabajado en las dos fronteras de nuestro país, y haber conocido gran parte de territorio, le permitió expresar lo siguiente en 1879, en un comunicado al ministro de Relaciones Exteriores:

> Crea U. C. ministro que cuando se ha visto y observado mucho del país, como yo, siente uno que en general los gobiernos generales, se ocupen casi exclusivamente del centro y olviden y aun ignoren las necesidades de sus fronteras, en donde hay a quienes tener a raya, porque aunque nos separen siglos del feudalismo, es sólo que ya no se llama así, pero que es peor, será por la civilización (citado en Caballero, 2010).

Una grave enfermedad lo obliga a renunciar en 1885, regresando a la ciudad. El resultado final del trabajo es el *Atlas de la Comisión Mexicana de Limites*, en dos tomos, fechado en 1899, y que también incluye trabajos de la Comisión de Límites que desarrolló actividades entre 1883 y 1899. En esta nueva comisión, Salazar tuvo igualmente el cargo de jefe entre noviembre de 1883 y julio de 1884, lo sustituyó en ingeniero Manuel E. Pastrana (Caballero, 2010).

Todavía tuvo fuerzas para impartir clases en el Colegio Militar y en la Escuela de Agricultura, así como desempeñar algunas actividades en la secretaría de Fomento. Falleció en la ciudad de México el 9 de mayo de 1892.

Se integró a diversas sociedades científicas: en 1846 se le admitió como socio propietario de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, Fue socio fundador de la Sociedad Humboldt (1861), y posteriormente su presidente (Vigil, 2008). Igualmente fue Presidente Honorario de la Comisión Científica, Literaria y Artística de México, responsable de la sección de Astronomía Física del Globo, Geografía, Hidrología y Meteorología; miembro de la Academia Imperial de Ciencias y Literatura.

A su regreso del exilio, tanto la Sociedad Mexicana de Historia Natural como la Sociedad Minera de México lo incorporan como socio honorario (1870).

Francisco Jiménez.[5] Nació en la ciudad de México en mayo de 1824. A los dieciséis años ingresó al Colegio Militar con la intención de seguir la carrera de ingeniero militar. En 1847 participó en la lucha contra el invasor estadounidense; con el grado de capitán fue de los oficiales que participaron en la batalla del Castillo de Chapultepec, apresado junto con los demás defensores del Colegio Militar. Posteriormente ingresó a la Escuela Nacional de Ingenieros, donde siguió los estudios de ingeniero geógrafo.

El 2 de noviembre de 1848 el presidente José Joaquín de Herrera ordenó la formación de la comisión que habría de marcar los nuevos límites entre nuestro país y los Estados Unidos. Como ya se mencionó, al frente de la Comisión Mexicana de Límites quedó el general Pedro García Conde y el jefe de los trabajos científicos y geómetra de esta fue el ingeniero José Salazar Ilarregui. Por su experiencia en las observaciones astronómicas, Francisco Jiménez fue nombrado agrimensor de esa comisión, quedando encargado de coordinar los trabajos para la determinación de las posiciones geográficas de los puntos más notables a lo largo de nuestra nueva frontera con los Estados Unidos.

Los trabajos de la Comisión de Límites iniciaron en octubre de 1849, y continuaron a lo largo de seis años. En enero de 1856 se terminó el trazo definitivo de la línea fronteriza, por lo que

[5] La mayor parte de la información sobre el ingeniero Jiménez se obtuvo de Moreno Corral (1986).

Francisco Jiménez y demás comisionados pudieron finalmente regresar a la ciudad de México. En ese mismo año Jiménez recibió el título de ingeniero geógrafo, y se reincorporó a sus labores docentes en el Colegio Militar, donde fue catedrático de geodesia y astronomía.

En 1861 el ministro de Fomento lo nombró, junto con el Ing. Antonio García Cubas, para coordinar los trabajos tendientes a elaborar la carta geográfica de la República; sin embargo, las circunstancias políticas de aquellos momentos obligaron a suspender ese proyecto.

En 1864, cuando era inspector de caminos, Francisco Jiménez fue comisionado para que, en compañía del ingeniero Miguel Iglesias, realizara un estudio técnico del viejo problema del desagüe de la capital y del Valle de México. En noviembre de 1865 fue nombrado subsecretario interino del Ministerio de Fomento, y más adelante, junto con Ángel Anguiano, fue promotor del establecimiento del Observatorio Astronómico Central –localizado en la azotea del Palacio Nacional–; se le designó primer director, cargo que desempeñó hasta su muerte en 1881 (Luna 2019). Le sucedió en el cargo el también ingeniero geógrafo Leandro Fernández. Es interesante destacar que en ese observatorio hicieron sus prácticas, cuando eran estudiantes, Isidro Díaz Lombardo, del Colegio Militar, y Felipe Valle de Ingenieros (Zueck, 2014). De hecho, a este último, Jiménez lo recomendó para ingresar al Observatorio Astronómico Nacional, cuando todavía se encontraba en Chapultepec.

Continuando con sus estudios geográficos, Jiménez fue el primero en determinar las longitudes en nuestro país utilizando señales telegráficas. En 1866 llevó a cabo la determinación de la latitud de Cuernavaca, empleando por primera vez el telégrafo electromagnético, mediante el que se transmitieron señales entre esa ciudad y la capital.

En marzo de 1872 la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, de la que era miembro, le encargó que escribiera un artículo sobre los pasos de Venus y de Mercurio frente al disco solar. El trabajo fue publicado en el *Boletín* de esa sociedad durante el mismo año. En él, además de proporcionar la información relevante de esos fenómenos astronómicos, hacía notar la importancia del trabajo desarrollado en 1769 por los criollos mexicanos Joaquín Velázquez de León y Antonio Alzate, quienes con las observaciones que hicieron del tránsito venusino de ese año, contribuyeron a fijar el mejor valor de la paralaje solar logrado durante el siglo XVIII. Ese estudio contribuyó a despertar el interés de algunos intelectuales de nuestro país, para que se enviara una comisión de mexicanos a observar el tránsito de 1874, de la que él fue parte importante en las observaciones.

A principios de 1873 apareció publicado, en ese mismo *Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística*, un "Dictamen de la Comisión Astronómica relativo a la publicación de un nuevo calendario que esté en armonía con los fenómenos celestes actuales", artículo en el que Jiménez y Francisco Díaz Covarrubias analizaron desde el punto de vista astronómico una propuesta que se había hecho en el seno de esa sociedad para cambiar el calendario civil que se utilizaba en nuestro país. La conclusión dada por los astrónomos demuestra ampliamente su sentido práctico, ya que, aunque reconocen las inconsistencias astronómicas del "actual calendario civil", proponen se siga usando pues se ha convertido en costumbre internacional, y cambiarlo podría ocasionar una marginación de nuestro país.

Entre los cargos públicos que desempeñó, se encuentran el ser inspector general de caminos y jefe de la Sección científica del ministerio de Fomento. El ingeniero Jiménez fue miembro de varias sociedades científicas, destacando que en 1874 se le designa para presidir la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística y socio honorario de la Sociedad Humboldt. Durante el imperio de Maximiliano se le nombró Caballero de la Orden Imperial de Guadalupe, y miembro de la Academia Imperial de Ciencias y Literatura.

Falleció el 5 de noviembre de 1881, a la edad de 57 años.

Francisco Díaz Covarrubias[6] nació en Jalapa, Veracruz, en 1833; ingresó al Colegio de Minería,

[6] Los textos que sustentan los datos del Ing. Díaz Covarrubias son, sobre todo, de Moreno Corral (1986) y Mendoza (2000).

cuando contaba con 16 años, y destacó como un estudiante brillante. En 1851 fue alumno actuante de la segunda clase de matemáticas y en la de principios de astronomía y geografía en los exámenes anuales; en 1852 de las clases de física, alemán, topografía y geodesia y en 1853 de las clases de química, y de topografía, geodesia y cosmografía; y para 1854 ya figuró como profesor interino de la clase de topografía, geodesia y cosmografía. Meses después fue nombrado secretario de la junta facultativa del Colegio de Minería. Finalmente, obtuvo el título de ingeniero geógrafo en 1858.

Para 1856 su prestigio como especialista en el ramo de la geodesia era bien conocido, por lo que Manuel Siliceo, ministro de Fomento, le solicitó que realizara las observaciones astronómicas para determinar de la manera más precisa posible la posición geográfica de la ciudad de México.

Debido al interés que el gobierno de la República tenía por conocer y cuantificar los recursos naturales del país, en ese mismo año de 1856 organizó la Dirección general para la formación del mapa geográfico del Valle de México, encargada de realizar todos los estudios necesarios para tener el conocimiento sobre la ciudad de México y sus alrededores. Ese organismo dividió el trabajo en varias secciones, poniendo al frente de cada una de ellas a connotados especialistas. De la sección de astronomía y geodesia se nombró director al ingeniero José Salazar Ilarregui y primer ingeniero a Francisco Díaz Covarrubias. cuando este contaba con veinticuatro años y todavía no se había titulado de ingeniero.

Los acontecimientos políticos ocurridos por esos años dificultaron y finalmente impidieron que la comisión encargada del estudio del Valle de México pudiera terminar sus trabajos. Sin embargo, algunos de ellos fueron publicados, entre otros, la *Determinación de la posición geográfica de México,* aparecido en 1859, que actualizaba el estudio realizado pocos años antes. Para ese momento Francisco Díaz Covarrubias ya había recibido título de ingeniero geógrafo, tras haber sustentado su examen el 24 de agosto de 1858.

En abril de 1861 comenzó un viaje hacia los Estados Unidos con la idea de visitar algunos observatorios astronómicos de ese país, así como comprar instrumentos que requería la Dirección de caminos, dependencia que había sido puesta bajo su cargo, sin abandonar en el Colegio de Minería. A fines de ese año, el ministro de Fomento celebró un contrato con Díaz Covarrubias, para concluir el trabajo que había dejado inconcluso la Dirección general para la formación del mapa geográfico del Valle de México, toda vez que contaba con el antecedente de haber dirigido la realización de la Carta hidrográfica del Valle de México, publicada en el *Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística*.

Su interés por la astronomía lo llevó a proponer la creación de un observatorio astronómico, ubicado en el castillo de Chapultepec. En septiembre de 1862 fue nombrado director del futuro Observatorio Astronómico Nacional, encargándosele que instalara en Chapultepec algunos de los mejores instrumentos astronómicos que por ese entonces había en la ciudad de México. Sin embargo, debido a la intervención francesa, ese observatorio tuvo una vida realmente corta, pues en mayo de 1863 se vieron obligados a suspender los trabajos.

El gobierno de Maximiliano trató varias veces de contratar los servicios de Díaz Covarrubias, pero este siempre se negó, prefiriendo vivir en San Luis Potosí y después en Tamaulipas, haciendo levantamientos geodésicos y topográficos. Durante esos años escribió su *Tratado de topografía, geodesia y astronomía,* publicado en 1870, que habría de servir como libro de texto en esas materias por el resto del siglo XIX.

A poco de haberse restablecido el gobierno legal, Juárez lo nombró oficial mayor del ministerio de Fomento. Asimismo, con la Ley Orgánica de Instrucción Pública en el Distrito Federal, del 2 de diciembre de 1867, se contempló la creación de la Escuela Nacional Preparatoria. Díaz Covarrubias participó desde el inicio del proceso de creación del nuevo plantel, siendo miembro de la comisión que delineó el plan de estudios original. Iniciadas las labores docentes, fue profesor fundador del segundo curso de matemáticas (geometría y trigonometría) y en febrero de 1869 fue nombrado subdirector de ese plantel educativo.

En 1874, científicos de todo el mundo se interesaron en observar el tránsito de Venus por el disco

del Sol. En México, Díaz Covarrubias buscó y logró el apoyo el presidente Sebastián Lerdo de Tejada para establecer una comisión científica y viajar a Japón a observar dicho fenómeno astronómico. Pese a las muchas dificultades que enfrentaron, logró establecer, junto con sus colegas Francisco Jiménez, Manuel Fernández Leal, Agustín Barroso y Francisco Bulnes, una base en la ciudad de Yokohama y realizar las observaciones, que dio a conocer en el Segundo congreso internacional de ciencias geográficas, celebrado en París en 1875.

A su regreso a la ciudad de México, se reintegró como profesor de la escuela de ingenieros y a su labor en la secretaría de Fomento. El 7 de diciembre de 1877, en la presidencia del general Porfirio Díaz, Ignacio L. Vallarta le nombró Ministro plenipotenciario en Guatemala (Caballero, 2010), con el objetivo principal de alcanzar un acuerdo para fijar la frontera internacional entre ambos países. Asuntos ajenos a su labor le obligan a regresar a México en 1880, pero el presidente Manuel González le envía a Europa, donde radicará cuatro años, lo que le permite participar en diversos congresos científicos. En 1884 regresa a México, y es comisionado para la compra de instrumentos científicos en los Estados Unidos.

En 1885 se le nombra cónsul general de México en París, donde desarrollará, a decir de Mendoza (2000), una doble labor, diplomática y científica, pues asistirá a diversos congresos en Europa, aumentando su reconocimiento en la academia. Muere en París, el 19 de mayo de 1889.

Francisco Díaz Covarrubias fue promotor de la fundación de la Sociedad Humboldt (1861), junto con Manuel Fernández Leal, José Salazar Ilarregui, Manuel Orozco y Berra, entre otros; posteriormente, fue designado su presidente en 1872 (Vigil, 2008).

Después de estos tres ingenieros geógrafos, tendrían que pasar 30 años para que otra persona recibiera el título de ingeniero geógrafo.

A MANERA DE CONCLUSIÓN

La comunidad de ingenieros geógrafos mexicanos fue reducida, aunque, visto lo anterior, se puede concluir que desempeñó un brillante papel en la sociedad y en la educación. Y me refiero a ellos como comunidad, porque a lo largo del texto queda implícita la red de relaciones que formaron entre ellos. Queda claro que varios de ellos compartieron aulas en el Colegio de Minería y, posteriormente, en la Escuela Nacional de Ingenieros; que varios de ellos fueron profesores de algunos otros centros de educación superior y que, profesionalmente desempeñaron actividades al servicio del Estado en un mismo periodo de tiempo.

Otro aspecto por destacar es que pese a las diferencias ideológicas que llegaron a tener, y que pudieron influir en sus actividades profesionales, compartieron intereses en las sociedades científicas más importantes del país –llegando a ocupar cargos directivos– y ahí, pareciera que esas diferencias pasaban a segundo término.

Cierto es que, durante la segunda mitad del siglo XIX, los ingenieros, en general, tuvieron un gran reconocimiento social y académico. Fueron, sin duda, los científicos por excelencia. Toda vez que practicaron las ciencias aplicadas y teóricas. La física, las matemáticas, la astronomía y las ciencias de la tierra fueron su campo de trabajo, y los geógrafos las practicaron con gran éxito. Ahí quedan como ejemplo los numerosos artículos y libros que publicaron (véase Moncada *et al.*, 1999). Y con este texto, demostramos que también tuvieron un amplio reconocimiento social al formar parte de esa élite académica y política del México decimonónico.

REFERENCIAS

Caballero Trejo, N. F. (2010). *La Comisión Mexicana de límites México, Guatemala, 1878-1899.* [Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM].

Diario del Gobierno de la República Mexicana. (1743, 7 de octubre). Núm. 3028, t. XXVII.

Luna Hernández, A. (2019). *Instrumentos y prácticas astronómicas en México: El proceso de transformación de Ingenieros Geógrafos en Astrónomos, 1856-1899.* [Tesis de Maestría en Filosofía de la Ciencia, Posgrado en Filosofía de la Ciencia, UNAM].

Mendoza Vargas, H. (1993), *Los Ingenieros Geógrafos de México, 1823-1915.* [Tesis de Maestro en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM].

Mendoza Vargas, H. (2000a). Francisco Díaz Covarrubias. 1833-1889, *Geographers. Biobliblioraphical Studies, 19*, 16-26.

Moncada Maya, J. O. (2003). *El nacimiento de una disciplina: La Geografía en México (siglos XVI a XIX)*. Instituto de Geografía, UNAM.

Moncada Maya, J. O., Escamilla Herrera, I., Cisneros Guerrero, G. y Meza Cisneros, M. (1999). *Bibliografía geográfica mexicana del siglo XIX. La obra escrita de los ingenieros geógrafos.* Instituto de Geografía, UNAM.

Moreno Corral, M. A. (1986), *Odisea 1874 o el Primer viaje internacional de científicos mexicanos.* CONACYT.

Ramírez, S. (1982). *Datos para la Historia del Colegio de Minería.* Edición facsimilar de 1890. Sociedad de Exalumnos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

S. R. (1892, 11 de mayo). Sensible defunción [de José Salazar Ilarregui]. *El Tiempo*, *Diario católico*.

Salazar Ilarregui, J. (1850). *Datos de los trabajos astronómicos y topográficos, dispuestos en forma de Diario. Practicados durante el año de 1849 y principios de 1850 por la Comisión de Límites mexicana en la línea que divide a esta República de la de Estados Unidos, por el Geómetra de dicha Comisión José Salazar Ilarregui,* Imprenta de Juan R. Navarro.

Sánchez Novelo, F. (1983). *Yucatán durante la intervención francesa (1863-1867).* Maldonado Editores.

Tamayo Pérez, L. M. (2001). *La geografía, arma científica para la defensa del territorio.* Instituto de Geografía, UNAM, Plaza y Valdés.

Tamayo Pérez, L. M., y Moncada Maya, J. O. (2000). La Comisión de Límites de México y el Levantamiento de la Línea Divisoria entre México y Estados Unidos 1849-1857. *Investigaciones Geográficas, 44*, 85-102.

Tamayo Pérez, L. M., y Moncada Maya, J. O. (2004). José Salazar Ilarregui. 1823-1892. *Geographers. Biobliblioraphical Studies, 23*, 116-125.

Vigil Batista, A. A. (2008). Anales de la Sociedad Humboldt. *Boletín Mexicano de Historia y Filosofía de la Medicina*, *11*(2), 54-58.

Yucatán en el tiempo. Enciclopedia alfabética. https://enciclopediayet.com/salazar-ilarregui-jose/

Zueck González, S. L. (2014). *Circulación del conocimiento científico en México: El Anuario del Observatorio Astronómico Nacional de Chapultepec (primera época).* [Tesis de Doctorado en Pedagogía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM].

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60806 • ARTÍCULOS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60806
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Producción y consumo alimentario en espacios periurbanos de proximidad. Procesos socio-territoriales en la conformación de los sistemas agroalimentarios

Food production in proximity peri-urban spaces. Phenomena, processes and socio-territorial expressions in the formation of agri-food systems

Héctor Ávila Sánchez*

Recibido: 11/10/2023. Aceptado: 19/01/2024. Publicado: 21/03/2024

Resumen. La periurbanización constituye una de las expresiones territoriales de mayor dinamismo en la sociedad contemporánea. Se han constituido nuevas formas derivadas del rol preponderante que ejercen los núcleos urbanos, que expresan transformaciones y fenómenos emergentes en sus periferias y en el entorno rural circundante. En esos ámbitos tienen lugar diversas dinámicas territoriales a partir de la reconfiguración de los espacios de la producción alimentaria en los entornos periurbanos que forman parte de los sistemas metropolitanos. Se manifiestan facetas diferenciadas de la institucionalización de la alimentación sostenible en entornos urbanos y periurbanos, en la ruta de la transición hacia la alimentación sustentable y en las que se expresan diferentes modalidades territoriales. Ahí, adquieren relevancia procesos determinantes en la estructuración territorial contemporánea, vinculados a nuevas tendencias alimentarias sustentables y sanitarias, como la proximidad, la consolidación de los circuitos cortos de consumo y la instauración de novedosas formas territoriales como los sistemas alimentarios ciudad-región y los parques agrarios, en un contexto de reestructuración y reordenamiento de los espacios periurbanos, como parte integrante de los sistemas metropolitanos. La figura del parque agrario constituye una innovación territorial frente a la metropolización creciente, que amenaza y desarticula la dinámica de los espacios agrarios periurbanos. Principalmente en Europa, constituye una modalidad a través de la cual se ordenan y gestionan los espacios agrarios en los ámbitos jerárquicos metropolitanos. Se enfatiza el carácter social y las acciones colectivas que sustentan las prácticas agrícolas, como parte de la sustentabilidad urbana. Se señalan los roles trascendentales de los actores sociales, las organizaciones ciudadanas y de productores, así como de las instituciones participantes, en la configuración de la gobernanza territorial periurbana, a partir de los fundamentos de la economía solidaria y la justicia social. Se destaca la difusión que adquieren en estos procesos las modalidades fundamentadas en un amplio sustento cooperativista (*hubs* alimentarios, supermercados cooperativos, obradores compartidos), vinculadas a la gestión productiva y del consumo alimentario. Se señala la idea en torno a la agricultura periurbana de proximidad como un valioso aporte al abasto alimentario, a través de los sistemas alternativos de producción y consumo. Si bien la producción convencional de alimentos predomina aún en el abasto de los centros urbanos, el reto consiste en fortalecer las modalidades existentes en la agricultura urbana y periurbana, como opciones de alimentación sana y como salvaguarda de las economías agrarias locales y campesinas. Su consideración dentro de las políticas públicas de desarrollo rural es limitada, por lo que es imprescindible fortalecer los apoyos de los gobiernos locales y metropolitanos. En términos de la permanente redefinición del carácter multifuncional que experimentan los espacios rurales contemporáneos, sobre todo aquellos vinculados a las dinámicas de los sistemas metropolitanos, se requiere estudiar a fondo otras transformaciones y expresiones diferenciadas en estos ámbitos de interacción

*Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias (CRIM-UNAM). Avenida Universidad s/n Circuito 2, colonia Chamilpa, Cuernavaca, 62210, Morelos, México. ORCID: 0000-0002-9317-1188. Email: ahector@unam.mx; avilhector@gmail.com

urbano-rural, (usos del suelo, nuevas formas de poblamiento, neoruralidad y las diferenciaciones socioterritoriales), por las vinculaciones que establecen entre sí, en la transformación permanentemente de los espacios periurbanos.

Palabras clave: metropolización, multifuncionalidad, ciudad-región, modelos alternativos alimentarios, *hubs* alimentarios, circuitos cortos, parques agrarios.

Abstract. Peri-urbanization constitutes one of the most dynamic territorial expressions in contemporary society. New forms have emerged as a result of the predominant role played by urban centers, which express transformations and emerging phenomena in their peripheries and in the surrounding rural environment. Various territorial dynamics are taking place in these areas as a result of the reconfiguration of food production spaces in the peri-urban environments that are part of metropolitan systems. Differentiated facets of the institutionalization of sustainable food in urban and peri-urban environments are manifested in the transition towards sustainable food and in which different territorial modalities are expressed. Here, decisive processes in contemporary territorial structuring acquire relevance, linked to new sustainable and sanitary food trends, such as proximity, the consolidation of short consumption circuits and the establishment of new territorial forms such as city-region food systems and agricultural parks, in a context of restructuring and reorganization of peri-urban spaces, as an integral part of metropolitan systems. The figure of the agricultural park constitutes a territorial innovation in the face of growing metropolization, which threatens and disarticulates the dynamics of periurban agricultural spaces. Mainly in Europe, it constitutes a modality through which agricultural spaces are organized and managed in metropolitan hierarchical spheres. Emphasis is placed on the social character and collective actions that sustain agricultural practices, as part of urban sustainability. The transcendental roles of social actors, citizen and producer organizations, as well as participating institutions, in the configuration of peri-urban territorial governance, based on the foundations of solidarity economy and social justice, are pointed out. The dissemination acquired in these processes, the modalities based on a broad cooperativist support (food hubs, cooperative supermarkets, shared workshops), linked to the management of food production and consumption, are highlighted. The idea of peri-urban proximity agriculture is highlighted as a valuable contribution to food supply through alternative production and consumption systems. Although conventional food production still predominates in the food supply of urban centers, the challenge is to strengthen the existing modalities of urban and peri-urban agriculture, as healthy food options and as a safeguard for local and peasant agrarian economies. Their consideration within the public policies of Rural Development is limited, so it is essential to strengthen the support of local and metropolitan governments. In terms of the permanent redefinition of the multifunctional character experienced by contemporary rural spaces, especially those linked to the dynamics of metropolitan systems, it is necessary to study in depth other transformations and differentiated expressions in these areas of urban-rural interaction (land use, new forms of population, neo-rurality and socio-territorial differentiations), due to the links they establish among themselves, in the permanent transformation of peri-urban spaces.

Keywords: metropolization, multifunctionality, city-region, alternative food models, food hubs, short circuits, agricultural parks.

INTRODUCCIÓN. LA PERIURBANIZACIÓN COMO FENÓMENO TERRITORIAL CONTEMPORÁNEO

La periurbanización se encuentra ampliamente vinculada al análisis de las dinámicas metropolitanas y sus interacciones en las periferias urbanas y con la ruralidad circundante; caracteriza una de las modalidades prevalecientes en la urbanización contemporánea. Es un proceso territorial que afecta e incide en toda la ciudad, como parte integrada e integrante del movimiento generalizado de la urbanización de toda la sociedad y, por lo tanto, de la globalización (Donzelot y Mongin, 2013). Inicialmente, se le ha considerado en términos de la expansión urbana y del consumo de espacio con fines habitacionales, a expensas de los ámbitos agrícolas y naturales contiguos (Rougé, 2018). Al vincular al espacio rural, constituye una de las expresiones del proceso identificado como la nueva geografía del campo globalizado (Woods, 2007). En la década de los setenta, el periurbano se perfilaba como un universo para las clases medias (Jaillet, 2004; Donzelot, 2004), conformando ámbitos poco receptivos a la diversidad social (de clases trabajadoras y de un fuerte componente étnico). En su evolución, se ha planteado la idea del *periurbano maduro*, debido, en primera instancia, a la diversidad poblacional cada vez más heterogénea (trayectorias de vida, familias monoparentales, parejas sin hijos, jubilados, diversidad étnica), así como también por el reforzamiento en la movilidad de proximidad, desde los

centros urbanos hacia la periferia (Berger, Aragau y Rougé, 2014).

En esa evolución también se han fortalecido paulatinamente las posiciones en torno a la defensa del ambiente en las periferias urbanas y el rural circundante, como el surgimiento de formas alternativas de producción de alimentos, consolidados con el arribo progresivo de pobladores neorrurales, con un capital cultural y profesional diferenciado del local, críticos de la degradación de los entornos urbanos y su calidad de vida (Halfacree, 2001; Hoggart, 1997).

Una vertiente en el análisis acerca de las transformaciones y expresiones de los espacios rurales periurbanos tiene lugar a partir de las dinámicas de reorganización territorial que establecen los sistemas agroalimentarios. Tal situación modifica las funciones del espacio periurbano mediante los rápidos cambios en los usos del suelo, fundamentalmente los dedicados a la agricultura y, especialmente, a la producción de alimentos (Ávila, 2019). Actividades como la agricultura urbana y periurbana, por su carácter multifuncional, son importantes en la gestión territorial para la protección de la biodiversidad y el seguimiento de la huella ecológica en las actividades urbanas (Ravetz, Fertner y Nielsen, 2013). En la dinámica de dichos espacios intervienen una gran diversidad de actores, que establecen o desempeñan vinculaciones, negociaciones e intercambios con las diversas instancias participantes (productores, comercializadores, planificadores, instituciones gubernamentales, organizaciones ciudadanas) (Poulot, 2011). En los espacios agrícolas bajo influencia metropolitana, se fortalece el desarrollo de las cadenas cortas y la interacción con actores diversos involucrados en la producción, procesamiento y distribución. Se desarrollan también diversas sinergias con el agroturismo y la gestión de los paisajes naturales (Zasada, 2011).

En la Tabla 1 se sintetizan las principales vertientes y expresiones en las que actualmente se manifiesta la operatividad de los espacios periurbanos, en el ámbito de los sistemas metropolitanos.

METODOLOGÍA

Los planteamientos que se discuten son producto de la permanente revisión de materiales en torno a

Tabla 1. Periurbanización y procesos territoriales. Fenómenos, expresiones, causalidades.

Fenómeno	Expresión	Escuelas y disciplinas	Agentes	Fundamentos teóricos y conceptuales
Residencial	Periurbano, espacio de clases medias; periferia urbana marginal (población local y migrantes); segregación socio-residencial y espacial (uso y disposición de recursos).	Geografía francesa; urbanismo; geografía anglosajona (Estados Unidos y Reino Unido); sociología y geografía Urbana en América Latina (México, Brasil, Argentina, Colombia, Chile).	*Commuters*; capital inmobiliario; organizaciones vecinales; asociaciones de productores; neorurales; migrantes.	Movilidad pendular: proximidad (geográfica); gobernanza territorial; paisajística; identidad territorial; planeación y ordenamiento urbano.
Industria, gestión, administración, servicios e infraestructura	Cambios uso del suelo; sustitución superficies agrícolas y forestales; ocupación cuerpos de agua y cobertura vegetal.	Economía espacial anglosajona; geografía francesa; geografía rural en América Latina (Chile, Brasil, México).;	Capital inmobiliario; ordenamiento territorial; cámaras industriales; asociaciones empresariales; sectores educativos; instituciones científicas.	Proximidad (organizacional, geográfica); gobernanza territorial; paisaje; jerarquías metropolitanas; planeación y ordenamiento urbano.

Tabla 1. Continuación.

Amenidades y gentrificación	Campo "bucólico"; granjas terapéuticas; espacios lúdicos y deportivos; paisajes naturales; educación ambiental; turismo rural; hostelería; patrimonio histórico y territorial.	Geografía rural; sociología rural; urbanismo; antropología social; psicología social; arquitectura del paisaje; escuelas diversas en Europa (Reino Unido, Francia, España, Suecia); América Latina (Argentina; Chile, Brasil, México).	Neorrurales; capital inmobiliario; cámaras empresariales; profesiones agrícolas; organizaciones ciudadanas: grupos de gestión y defensa territorial.	Rural profundo; gestión paisajística; gobernanza territorial; patrimonio territorial; gestión ambiental; procesos identitarios territoriales; jerarquías metropolitanas; nueva ruralidad.
Producción agrícola y pecuaria	Agricultura periurbana; cadenas alimentarias; agricultura de proximidad; sistemas agroalimentarios localizados; parques agrarios; sistemas agrícolas ciudad-región.	Economía agrícola; geografía rural; sociología rural; agronomía; Francia, Reino Unido, Norteamérica, América Latina; agroecología; antropología social.	Neorrurales; productores agrícolas; comercializadores; asociaciones productivas; organizaciones consumo solidario; organizaciones no gubernamentales; movimientos ecologistas; organizaciones de defensa del territorio.	Proximidad (geográfica y organizacional); circuitos cortos; ciudad-región; bioeconomía; agroecología; gobernanza territorial; paisajística; economía circular; centros logísticos alimentarios; grupos de consumo solidario; jerarquías metropolitanas; nueva ruralidad.
Diferenciación rural	Interacciones urbano-rurales; Identidades territoriales.	Antropología social; sociología rural y urbana. Geografía social francesa, anglosajona y latinoamericana;	Pueblos originarios; neorurales; cooperativas consumo solidario.	Multifuncionalidad; pluriactividad; patrimonialización natural y cultural.

Fuente: elaboración propia (2022-2023).

los temas de la periurbanización, específicamente en su vinculación con la dinámica de los sistemas agroalimentarios. Se trata sobre todo de artículos electrónicos publicados en revistas especializadas en temas rurales en francés e inglés, así como también en lengua castellana. También se consideraron algunas fuentes de estudios urbanos, específicamente en lo referente a temas periurbanos y de periferias urbanas[1]. Se ha definido como línea temporal de inicio el año 2000, donde ya eran manifiestas las transformaciones territoriales periurbanas en torno

[1] Algunas revistas que incorporan permanentemente análisis y estudios en torno a los espacios urbano-rurales*: Journal of Rural Studies; Sociologia Ruralis; Progress in Human Geography; L'information Géographique; Annales de Géographie; Geocarrefour; Boletín de la Asociación de Geógrafos Rurales de España; Revista Alasru; Revue d'Économie Régionale et Urbaine; Urban Studies; Cities; Revue d'Économie Urbaine et Rural; Environnmental Studies ; Géographie, Economie et Societé ; Revista de Agricultura Urbana (RUAF); Revista Eure; Cuadernos de Desarrollo Rural; Investigaciones Geográficas; Revista Mexicana de Sociología; Economía, Sociedad y Territorio; Estudios Urbanos y Demográficos.*

a los sistemas agroalimentarios y la agricultura de proximidad, donde cada vez con mayor precisión se expresaban las interacciones de la ruralidad y las dinámicas urbanas. A partir de esto, se realizó una revisión de las principales tendencias manifiestas de los fenómenos en cuestión y las expresiones territoriales emergentes en la sociedad contemporánea. Se consideraron artículos que analizan procesos y fenomenologías bajo metodologías cualitativas y se priorizaron algunos enfoques disciplinarios con amplia tradición en los estudios territoriales (sociología rural, antropología social, geografía rural, economía agrícola, geografía y sociología urbana).[2]

Se reitera el hecho de partir del año 2000, donde la difusión territorial de las fenomenologías aludidas ya es clara o presente en la literatura científica disponible (anglófona, francófona, así como la disponible en distintos países latinoamericanos).

METROPOLIZACIÓN, PERIURBANIZACIÓN Y PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

El desarrollo de las prácticas agrícolas en el ámbito de las regiones metropolitanas ha impulsado una transición territorial hacia la sostenibilidad debido al incremento de la demanda local y la reorganización de la producción de alimentos (Yacamán, 2018).

Las funciones tradicionales de la agricultura y sus valores han sido reemplazadas por nuevos componentes orientados hacia el consumo, incorporándolos a los patrones productivos predominantes. Debido a la proximidad a los centros urbanos como núcleos de transiciones sociales y de estilos de vida, el proceso presenta una oportunidad frente al modelo alimentario convencional. Los valores recreacionales y ambientales que aportan las actividades agrícolas vinculadas a los entornos urbanos se han incrementado al inicio de la sociedad posfordista. Se multiplican los usos y el aprovechamiento de los paisajes naturales y las áreas recreacionales, que las hacen competitivas con otras regiones urbanas, además de los permanentes cambios a los usos del suelo (Zasada, 2011). Constituye una reapropiación tanto del espacio público como de la función alimentaria, pero también destaca su función social en términos del ocio, así como la inserción social (Fleury y Donadieu, 1997).

En los espacios agrícolas periurbanos prevalecen las modalidades productivas convencionales, pero se multiplican las formas alternativas de consumo solidario y de producción de alimentos sanos, que si bien en ciernes, podrían adquirir relevancia en la funcionalidad de los sistemas metropolitanos (Ávila, 2019). En este sentido, la operatividad de los mercados concentradores y distribuidores de alimentos "… requiere la proximidad de la oferta y debe responder a los procesos de urbanización y reorganización del abasto de alimentos con base en los criterios de localización y funcionalidad" (Torres-Salcido, 2010). El proceso enfrenta numerosos obstáculos y dificultades para su consolidación, sobre todo en lo referente al establecimiento de pactos y relaciones de gobernanza entre productores e instituciones gubernamentales, municipales y provinciales, cuyos resultados no siempre resultan exitosos.[3]

FORMAS Y PROCESOS TERRITORIALES EN EL PERIURBANO RURAL

Las modalidades prevalecientes en el modelo convencional de la producción alimentaria priorizan

[2] Se enfatizó en el análisis de artículos sobre temas específicos: agricultura urbana y periurbana; gobernanza territorial; metropolización y gestión territorial; cambios en uso del suelo; nuevas economías urbano-rurales; sustentabilidad y periurbanización; territorios urbano-rurales; mercado de tierras periféricas; actores sociales e institucionales; multifuncionalidad; gentrificación rural; sistemas agroalimentarios; nuevas vinculaciones campo-ciudad; reestructuración de procesos productivos periurbanos; teoría y métodos en los estudios urbano-rurales, entre otros.

[3] Sobre todo en las estrategias de producción agroecológica, visibles en las regiones metropolitanas y sus áreas periurbanas, donde la demanda local y la reorganización de la producción de alimentos pretenden fortalecer la transición territorial hacia la sostenibilidad, con innovaciones producidas por agricultores y consumidores indistintamente. Alberdi (2018) lo analizó en el desarrollo de la agricultura de proximidad y los circuitos cortos en Euskadi (San Sebastián).

la movilidad de las mercancías desde grandes distancias, dentro o fuera de las fronteras nacionales, hacia los principales centros de abasto. Debido al fortalecimiento de las vías de comunicación (sobre todo los sistemas carreteros) y a las innovaciones tecnológicas en la movilidad de la carga de mercancías (Aubry y Chiffoleau, 2009), los procesos señalados (proximidad, circuitos cortos de consumo, innovación y otros) también dan lugar a formas y dinámicas territoriales identificadas con el impulso a formas vinculadas con la práctica de comercio justo, consumos solidarios y justicia social (Méndez, 2018).

PROXIMIDAD Y PRODUCCIÓN AGRÍCOLA PERIURBANA

El concepto o idea de *proximidad* analiza la relación entre la economía y el territorio. Se ha conformado como un elemento de gran importancia en la dinámica y ocupación de los espacios naturales y de la producción agrícola, con fundamento en la teoría de los distritos industriales y de los entornos innovadores. Ahí, la distancia física se considera como una separación económica entre los actores, condicionada por factores naturales, si bien construida socialmente a través de la infraestructura y la proximidad organizacional. Como proceso, la proximidad reconoce y analiza detalladamente las nuevas urbanidades agrícolas y los modelos vigentes en la gobernanza entre la ciudad y la producción agrícola para la alimentación (Lardon y Loudiyi, 2014; Torre, 2013).

Boschma (2005) distingue cinco tipos de proximidad; 1) *la geográfica*, referida a la distancia física entre los agentes o procesos; 2) la *cognitiva,* que tiene que ver con el conocimiento que aportan los agentes concurrentes; 3) la *organizacional,* que concierne a la historia de las relaciones entre las organizaciones; 4) la *social*, en tanto fenómeno micronivel, que considera los lazos de amistad y parentesco, y 5) la *proximidad institucional* que crea un fenómeno macronivel, correspondiente a las normas compartidas, los valores, los hábitos y las rutinas.

La proximidad *geográfica* junto con la *organizacional* conforman un constructo social que determina una mayor o menor contigüidad en las estrategias económico-organizacionales de los agentes económicos y las instituciones locales (Rallet, 2002). En el análisis de los procesos agrícolas periurbanos, la proximidad *organizacional* es considerada un elemento fundamental en el posicionamiento de intereses económicos, políticos, culturales e históricos entre los actores participantes (Torre y Beuret, 2012). En la escuela francesa de la proximidad se identifican dos de las corrientes como no geográficas: la proximidad *institucional* y la proximidad *organizada*, en su corriente interaccionista, que se remite a la potencial capacidad de una organización para que sus miembros interactúen (Gallaud, 2020).

En contraposición a los modelos de innovación territorial (organización del conocimiento por las firmas innovadoras, el *milieu*), se ha planteado otra modalidad de proximidad, bajo el concepto de *conversaciones,* como espacios sociales de creación del conocimiento (Rutten, 2017). Los agricultores de la periferia se relacionan cotidianamente con los habitantes urbanos para desarrollar prácticas específicas (producción, residencia, circulación, ocio, terapias, etc.) (Thareau, 2008). Ahí, los contactos y conversaciones permanentes (*geografía de las conversaciones*) al conectar el espacio social con los lugares físicos, construyen una explicación socioespacial de la creación del conocimiento (Rutten, 2017). Sin embargo, el desarrollo de las tecnologías de la información y la comunicación (correos electrónicos, videoconferencias, etc.) y su difusión progresiva, limitan o desalientan las interacciones cara a cara, favorecidos por la co-localización de los actores (Gallaud, 2020; Torre y Talbot, 2018).

En los espacios periurbanos de proximidad existen productores familiares, así como también pequeños productores privados, que realizan el proceso con la conformación de circuitos cortos de comercialización y consumo, donde la producción llega directa o casi directamente al consumidor, a través cestas o cajas de alimentos diversos (regularmente orgánicos, sanos),[4] en modalidades similares

[4] Como las asociaciones mexicanas de economía sustentable y social que cultivan y venden productos orgánicos y convencionales de pequeños productores (canastaxmexico.

a las existentes en otros países, como los *Community Support Agriculture* (CSA) y las *AMAP* (Asociaciones para el Mantenimiento de la Agricultura Campesina), de gran vigencia en Europa y América del Norte. Además, la agricultura de proximidad (sobre todo la urbana), tiene un sentido lúdico y constituye un elemento de confort (Perrier-Cornet, 2001), si bien ha evolucionado hacia la conformación de modelos alternativos y reivindicatorios de la patrimonialización de los territorios rurales bajo influencia urbana (Duvernoy *et al.*, 2018; Sanz y Yacamán, 2022), al tiempo que incide en la degradación de los territorios y su patrimonio cultural[5] (Segrelles, 2015). Estos espacios no se centran solamente en su carácter de explotación agrícola, sino buscan la construcción de nuevas modalidades colectivas para vivir sus territorios (Bernard, *et al.*, 2006).

CIRCUITOS CORTOS DE CONSUMO Y PROXIMIDAD

La cuestión de la producción de alimentos en las cercanías de las ciudades es un fenómeno muy arraigado históricamente. Durante el nuevo siglo se ha fortalecido el interés por establecer innovaciones y procesos novedosos, sea en la búsqueda de opciones sustentables para el cultivo de alimentos sanos y sustentables bajo nuevas formas de organización e innovaciones tecnológicas (Chiffoleau y Prevost, 2012). Por otro lado, se desarrolla la revalorización de los territorios de la actividad agrícola debido a la proximidad a las urbes.[6]

Los usos específicos de las tecnologías de la información y la comunicación en los circuitos cortos facilitan la instauración y la coordinación de grupos de consumidores comprometidos a través de un contrato. Priorizan la difusión de informaciones y puntos de vista de productores alternos al sistema agroindustrial y favorece la cooperación entre productores y actores del territorio (artesanos, consumidores, restauranteros, etc.), lo que contribuye al desarrollo local y al acceso a una alimentación de calidad (Chiffoleau *et al.*, 2019; Chiffoleau y Prevost, 2012).

Los circuitos cortos son una forma de diversificación de la agricultura que intenta fortalecer los vínculos del consumidor con la producción de su territorio, que debiera estar gestionado por los agricultores locales (Chiffoleau *et al.*, 2019). Como objeto de investigación, requieren un acercamiento pluridisciplinario y territorial, anclado en la cuestión de la investigación-acción, analizando y evaluando los vínculos entre modos de producción y de consumo y los roles de las políticas de apoyo a escala local, sobre la inserción de estas explotaciones y colectivos en el tejido social y profesional agrícola, pero también en el urbano (Aubry y Chiffoleau, 2009).

Por lo general, se reconoce la existencia de tres tipos de circuitos cortos, mediante los que se establecen relaciones y vinculaciones entre productores, agentes e instituciones diversas, y consumidores. Renting, Marsden y Banks (2003) reconocen las siguientes: la relación o interacción "cara a cara", la más directa, donde el productor contacta directamente al consumidor e incluso al distribuidor. El segundo tipo de cadena se establece a partir de la estructuración de relaciones y redes de proximidad; adquiere múltiples y variadas expresiones (tiendas de productores, sellos distintivos regionales, cooperativas de consumidores, ferias agrícolas, agriculturas comunitarias, rutas temáticas, restaurantes, empresas turísticas, servicio a escuelas, hospitales, etc.).

com). Sociedades de pequeños productores, que comercializan sus productos naturales y artesanales cultivados mediante prácticas agrícolas sustentables y orgánicas, a fin de salvaguardar su patrimonio territorial y paisajístico. Es el caso de las chinampas en Xochimilco, al sur de la capital mexicana (Ávila, 2019).

[5] Se ha calculado que entre 1992 y 2004, en Francia se vieron afectadas 800 000 hectáreas por espacios habitacionales e infraestructuras, de las cuales, un 80% eran tierras agrícolas, con incidencia en la seguridad alimentaria y la biodiversidad (Plant, *et al.*, 2018).

[6] En la región Île-de- France, entre 1994 y 2008, los precios de venta de los terrenos agrícolas se quintuplicaron y el precio medio de los terrenos comprados por no agricultores aumentó notablemente. Las tierras agrícolas en esa región disminuyeron en promedio 1200 hectáreas/año entre 2000-2010, y para entonces constituían menos de la mitad en la región (Torre, 2014).

La tercera forma, más especializada, se desarrolla a partir del establecimiento de sólidas relaciones tanto en el tiempo como en el espacio. Son bienes para el consumo fuera de la región productora, para mercados de alcance nacional e internacional. Son productos que dan reconocimiento a la región productora (vinos, destilados, quesos, café y otros) (Renting *et al.*, 2003).

La conformación de los circuitos cortos es compleja y aún poco independientes de los circuitos más largos. Se requiere profundizar en las peculiaridades de los procesos técnico-económicos, las vinculaciones internas de estos circuitos, así como los impactos y la construcción de alternativas sustentables (Aubry y Chiffoleau, 2009).

El futuro de los circuitos cortos periurbanos depende de las prácticas y los alcances de los consumidores. También de los sistemas de producción dominantes, así como de las políticas gubernamentales de respaldo que se implementen a escala local. Desempeñarán cada vez en mayor medida un rol fundamental para fortalecer los vínculos de los circuitos cortos con la agricultura de proximidad y fortalecer las relaciones entre los actores (Aubry y Chiffoleau, 2009; Chiffoleau *et al.*, 2019).

MULTIFUNCIONALIDAD DE LA AGRICULTURA PERIURBANA

La noción de multifuncionalidad se difundió ampliamente en Europa durante la década de los años 1990 y se ha expresado a plenitud en la globalización, como un marco para la definición de las políticas públicas de la ruralidad. Y para la búsqueda de opciones y modalidades diferenciadas para la práctica de las actividades rurales. En América Latina ha tenido amplia difusión, paralelamente al concepto de la Nueva Ruralidad, y se ha incorporado en el estudio de los espacios rurales y las periferias urbanas con las que contacta (Bonnal, Bosc y Díaz, 2004).

La agricultura periurbana con carácter *multifuncional* se ha conformado en el contexto del desarrollo rural sustentable, con la intención de afrontar los retos posproductivistas y afianzarse como una de las modalidades alternas de uso en los espacios periurbanos (fortalecimiento comunitario, ocio, placer, terapeútica) (Poulot, 2011). Considera la diversidad de estrategias y actividades para las unidades productivas y fortalece la existencia de cadenas cortas de abasto, así como la diversificación social de los productores, la especialización en el procesamiento de la producción y su mercantilización, además de intervenir en la gestión e integración de los paisajes en los proyectos de ciudad y región (Zasada, 2011; Duvernoy *et al.*, 2005).

En la multifuncionalidad de la agricultura periurbana, los circuitos cortos juegan un rol vital para el sistema alimentario de las ciudades y fortalecen las reconexiones sociales entre los espacios agrícola y rural, e incide en las negociaciones para afrontar las contradicciones entre las ocupaciones urbanas y rurales (Duvernoy *et al.*, 2005). Desarrolla ámbitos de proximidad que les permiten a los productores identificar mejor los nichos de mercado, innovación y adaptación a nuevas demandas, si bien está sujetos a la competencia de las modalidades de la gran producción global de alimentos (Chiffoleau y Prevost, 2012). En la multifuncionalidad, las prácticas agrícolas tradicionales se renuevan mediante la innovación y las interrelaciones entre las múltiples redes que los actores construyen. Se fortalece y diversifica el saber-hacer de las sociedades rurales, con incidencia en los circuitos de proximidad y la cadena de valor[7] (Tissone *et al.*, 2019).

El carácter multifuncional de la agricultura periurbana y las oportunidades de la proximidad urbana, fortalecen la producción de alimentos, de gestión del paisaje, la identidad territorial, el mantenimiento de los servicios ecosistémicos, y aporta al mejoramiento de la sostenibilidad económica, social y ambiental del sistema alimentario urbano (Yacamán, 2018).

La incorporación de la cuestión alimentaria, en el contexto de la multifuncionalidad, debe sobrepasar la simple agenda nutricional, a fin de ubicar adecuadamente la fuerte problemática de la malnutrición (el hambre y la obesidad) y plantear las medidas para afrontarla, como un acto

[7] Tissone, Hernandez y Moustier (2019) identifican a este proceso circular como espirales alimentarias (*boucles alimentaires*).

de justicia social y lucha contra las desigualdades sociales. Esta cuestión se vuelve un imperativo en sociedades con una fuerte base campesina étnica, con accesos limitados a la dieta básica alimenticia, por lo general dentro de los umbrales de pobreza y pobreza extrema, un fenómeno común en numerosas sociedades latinoamericanas.

LOS ACTORES SOCIOTERRITORIALES EN LA CONSTRUCCIÓN DE GOBERNANZA

La cuestión de la gobernanza es fundamental en la comprensión de las participaciones o acciones diversas de los actores, en la construcción y gestión de la seguridad alimentaria. Los sistemas agroalimentarios se desarrollan bajo un diverso pluralismo social e institucional y, por tanto, requieren el establecimiento de sólidos mecanismos de gobernanza e interacciones entre actores y agentes involucrados (López-García *et al.* 2020).

En la elaboración de los proyectos territoriales intervienen una gran cantidad de actores: agricultores, agencias de urbanismo, municipios, estados o provincias, sindicatos y organismos agrícolas, cámaras de agricultores y organizaciones ciudadanas. Los diversos actores tienen visiones e intereses diferenciados; de ahí su heterogeneidad y la consecuente dificultad de establecer acuerdos, pactos y mecanismos de concertación (Condor y Lavissière, 2023). Igualmente, es trascendente el rol de los actores en la esfera pública (asociaciones de consumidores, productores en jardines comunitarios y huertos urbanos, organizaciones no gubernamentales, etc.), así como de otros actores privados (agricultores, asociaciones empresariales y profesionales) y del ámbito académico (universidades y centros de investigación). Una gobernanza con una amplia instrumentación posibilita la creación de iniciativas originales, con prácticas innovadoras que se manifiestan a través de modalidades determinadas (agricultura urbana y periurbana, agricultura biológica, agroecología, actividad agro-silvo-pastoril, cocinas comunitarias, asociaciones colectivas de productores, restauración agroecológica y comercios de productos locales, etc.) (Tissone *et al.*, 2019). El objetivo consiste en generar el óptimo equilibrio en el sistema agroalimentario local-regional, así como una reterritorialización alimentaria y el fortalecimiento de los vínculos sociales y cognitivos entre la producción y el consumo (Tissone *et al.*, 2019; Bonnefoy y Brand, 2014).

EXPRESIONES TERRITORIALES Y PROCESOS VINCULADOS A LA AGRICULTURA PERIURBANA DE PROXIMIDAD

En la actualidad se expresan numerosos procesos mediante los que se manifiestan facetas diferenciadas de la institucionalización de la alimentación sostenible en entornos urbanos y periurbanos. Giran en torno a la búsqueda y consolidación de la transición hacia la alimentación sustentable y en el cual existen diferentes modalidades (*food hubs*, obradores colectivos, huertos comunitarios, comedores públicos con alimentación responsable, centros de formación e innovación) y otras expresiones territoriales como los parques agrarios. Se han constituido como formas diferenciadas de reestructuración territorial regidas en torno a las jerarquías y funciones establecidas por los sistemas metropolitanos, con incidencias precisas en las dinámicas del uso del suelo y la determinación de los patrones de cultivo.

Una de estas expresiones, los *Sistemas Alimentarios Ciudad-Región* (SACR), constituyen propuestas novedosas en la estructuración de los sistemas agroalimentarios que abastecen a los mercados urbanos (Jennings *et al.*, 2015), donde tienen lugar importantes dinámicas en los diferentes ámbitos vinculados a las jerarquías metropolitanas (Tornaghi y Dehaene, 2019). Los SACR articulan en forma integral los flujos de recursos vinculados con la alimentación en un territorio dado, que evalúa y desarrolla políticas y programas que transponen las escalas de lo rural, urbano y periurbano. Se establecen a partir de los vínculos entre los centros urbanos y su área rural circundante, donde se promuevan cadenas de abasto alimentarias más cortas y se establecen empresas alimentarias regionales,

al tiempo que se crean y fortalecen las estructuras de gobernanza participativa (3keel, 2015; López-García *et al.,* 2020).

El objetivo principal de los SACR consiste en lograr la óptima vinculación de las áreas urbanas y rurales, en particular de las áreas próximas, las periurbanas, a las que se reconoce un importante papel para abordar los desafíos nutricionales en las sociedades contemporáneas. En estos vínculos urbano-rurales destacan tres dimensiones: ecológica, socio-económica y la de los vínculos de gobernanza. Articulan experiencias aisladas de producción y consumo alternativos en los entornos urbanos de proyectos de sistemas alimentarios territorializados.

Se reconocen dos tipos principales de SACR. En el primero, intervienen numerosos actores (locales y regionales) en todas las etapas de la cadena de abasto. Ahí prevalecen los pequeños productores periurbanos y los actores informales y de subsistencia, que producen alimentos no procesados, principalmente hortalizas y especies animales menores. Considera a un amplio sector informal cuyos vendedores compran a intermediarios o directamente a los productores periurbanos. Otra modalidad está caracterizada por un perfil global y nacional, con un pequeño número de actores en las diversas etapas de la cadena de abasto, así como un sector de venta al por menor formalizado y consolidado; desarrolla una menor dependencia de la producción urbana y periurbana y posibilita el acceso a un mayor consumo de alimentos procesados (3keel, 2015).

En el contexto internacional, la producción de alimentos sanos ha dado paso a nuevas fórmulas de institucionalidad cooperativa para el impulso de la alimentación sostenible. Se reivindican los sistemas agroalimentarios basados en modalidades y procesos, que priorizan los ritmos de conservación y reproducción ambiental y los que valoran las modalidades que consideran los saberes populares y otros aspectos histórico-culturales, fundamentales en la salvaguarda de su patrimonio territorial (Sanz y Gómez, 2021).

Emerge el concepto de los *hubs alimentarios*, estructuras nucleadas para la escala de producción y consumo de alimentos que involucra a pequeños y medianos productores en la logística y la distribución, favoreciendo la organización de las cadenas cortas de consumo y las políticas de compra responsable de alimentos. Son organizaciones basadas en la comunidad o en empresas sociales, vinculadas con la constitución de comunidades alimentarias sustentables. El proceso requiere fortalecer los canales cortos de distribución y la integración cooperativa de las actividades logísticas y de comercio mayorista de los pequeños productores a fin de realizar el *salto de escala* mediante el que se trasciende el ámbito local (Sanz y Yacamán, 2022). El objetivo de los *hubs* consiste en crear y consolidar modalidades diferenciadas de producción, comercialización y consumo, así como el fortalecimiento de los valores y principios ambientales y sociales en un sistema dominado por los objetivos económicos[8] (Cleveland, Mueller y Tranovich *et al.*, 2014).

Los *hubs* alimentarios fortalecen el establecimiento de estrategias competitivas para las pequeñas granjas familiares, para facilitar la distribución de sus productos en pequeños comercios, escuelas, hospitales y restaurantes. Constituye un modelo diferenciado de negocios que posibilita la vinculación de pequeños y medianos productores con compradores mayoristas como escuelas, hospitales, restaurantes, supermercados y otros (Berti y Mulligan, 2016).

Vinculados a los *hubs* alimentarios se han instituido los supermercados cooperativos, donde los clientes o asociados asumen la gestión y las diversas funciones para el buen desarrollo de la empresa social. Se trata de asociaciones sin ánimo de lucro, que tienen el objetivo de procurar el mejoramiento de la alimentación, mediante la oferta de productos de mayor calidad nutricional, más sostenibles,

[8] Grandes compañías líderes en el comercio de la distribución alimentaria convencional (Sysco, Walmart), han respaldado campañas para impulsar el consumo de productos locales debido al incremento en la demanda y el consumo (Cleveland et al., 2014). En la periferia de Madrid, la existencia de parques agrarios (de producción agroecológica y convencional), estimuló desde la década de 2010 la producción agrícola de proximidad (Sanz y Yacamán 2022) y el consumo de hortalizas producidas con variedades autóctonas de semillas (tomates), comercializados en cadenas de supermercados.

saludables y con precios de producción justos. Comercializan fundamentalmente productos de origen ecológico y local. El origen de estas figuras comerciales se ubica en la cooperativa *Park Sloop Food Coop,* en Brooklyn, Nueva York, que para el año 2021 contaba con más de 12 000 socios y era el supermercado con mayor rentabilidad por metro cuadrado en los Estados Unidos (Falkowitz, 2018). El modelo se ha replicado en otras ciudades europeas. En el año 2016, se abrió el supermercado cooperativo *La Louve*, en París, que ha multiplicado su presencia en Francia, pues en 2021 ya se habían desarrollado proyectos y modalidades vinculadas (pequeños y medianos supermercados) en 40 ciudades (Colla, 2019).

En 2020 se creó el supermercado *La Osa* en Madrid (https://laosa.coop/). Para el año 2022 contaba ya con diez modalidades cooperativas, de tamaño mediano y grande en diferentes ciudades españolas (Medina, 2019).

EL PARQUE AGRARIO COMO FIGURA TERRITORIAL INNOVADORA

La esencia del parque agrario se ubica en las expresiones que se han desarrollado en otras disciplinas, ocupadas en el diseño u ocupaciones espaciales para la realización de actividades productivas, o bien la salvaguarda patrimonial y la gestión sustentable de los espacios naturales (Yacamán, 2018a).

Los parques agrarios se han constituido a partir de diversas situaciones vinculadas con la expansión permanente de las ciudades: 1) la evolución de las periferias o bordes urbanos irregulares; 2) por las continuas transformaciones en el uso del suelo, por el establecimiento de grandes infraestructuras sanitarias y del transporte, vitales en la dinámica metropolitana; 3) debido al avance de zonas y conjuntos habitacionales de diverso nivel socioeconómico (barrios de clases medias y altas, que pueden situarse junto a espacios marginales), y 4) por la proliferación de prácticas agrícolas (huertos urbanos y parcelas periurbanas), además del fortalecimiento de la agricultura de proximidad.

En este sentido, la figura del parque agrario es innovadora para hacer frente a la metropolización creciente, que amenaza, e incluso desarticula la dinámica de los espacios agrarios periurbanos. Constituye una modalidad a través de la cual se ordenan y gestionan los espacios agrarios localizados en los ámbitos jerárquicos metropolitanos vinculados con su dinámica (Yacamán, 2015).

En diversos países se han implementado experiencias precisas acordes a su dinámica metropolitana. Han sido producto de una intensa interacción de instituciones y actores diversos: asociaciones de productores, sindicatos agrarios, organismos políticos y empresariales, entre otros. Los ejemplos más reconocidos en el establecimiento de los parques agrarios y los espacios urbanos para el ocio y la sustentabilidad se han desarrollado en el sur de Milán, en Italia, en la aglomeración de Montpellier, en el sur de Francia (Soulard *et al.*, 2018) y en el parque de Baix Llobregat en Barcelona (Paül, 2015, Zazo, 2010), así como el complejo territorial de la planicie de Saclay en la región parisina (Vidal y Fleury, 2008).[9] En España han sido importantes las experiencias en Fuenlabrada y Rivas-Vaciamadrid (Yacamán, 2018a; Mata y Yacamán, 2015), Sabadell (Cataluña), la Horta Valenciana (Folgado, 2020), entre otras.

En América Latina se han desarrollado algunos proyectos, fundamentalmente en Argentina, en regiones de una importante producción alimentaria. La figura de parque agrario ha sido propuesta como una medida para oponerse a los mecanismos y efectos de una intensa urbanización en las ciudades de dicha nación. Se han realizado proyectos de ordenamiento urbanístico de protección a espacios periurbanos, donde se realizan prácticas de producción agropecuaria, fundamentalmente alimentos en ciudades (Santa Fe y Córdoba), donde se ha observado una sostenida disminución de su superficie cultivada,[10] la merma en la

[9] En Francia, un país con larga experiencia en el ordenamiento del territorio y el paisaje agrario, se intervino en la creación de un complejo científico en Saclay (Île de France), que coexiste con un espacio agrícola de 2000 ha, ya amenazado por el crecimiento urbano.

[10] El área metropolitana de Santa Fe perdió el 45% de la superficie dedicada a la producción frutihortícola entre 2001 y 2008 (Ministerio de la Producción de Santa Fe, 2009), mientras que en el período 2001-2012 la reducción

diversificación de su producción y el abandono de las unidades productivas por parte del trabajador rural. Al tiempo, crecieron las superficies con cultivos extensivos, como soja, maíz, trigo y alfalfa (Mantovani *et al.*, 2020).

Para una óptima funcionalidad de los parques agrarios, se reconoce como imprescindible la construcción de una sólida gobernanza; un planeamiento municipal y metropolitano que integre las funciones de las metrópolis y la actividad agraria de su entorno, vinculando las políticas territoriales con la alimentación, la agricultura y los agricultores, y la multifuncionalidad de los agroecosistemas. Se requiere fortalecer la legitimación de la actividad agraria periurbana como abastecedora de productos frescos y de calidad, al tiempo que se resguarde la identidad de los lugares, la sostenibilidad y la cohesión en las relaciones campo-ciudad (Mata y Yacamán, 2015; Zazo, 2010).

EL SENTIDO SOCIAL Y COLECTIVO DE LAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS EN LA SUSTENTABILIDAD URBANA. RETOS Y LÍMITES

Las dinámicas y procesos territoriales que sustentan a los sistemas agroalimentarios en los espacios periurbanos metropolitanos son resultado de negociaciones y pactos que establecen los actores y las instituciones sociales. Trascienden en escalas de operación diferenciada (local, regional), donde se establecen vinculaciones, negociaciones e intercambios entre las instancias que participan (organismos políticos, planificadores, productores y organizaciones ciudadanas). La existencia de las prácticas agrícolas (urbanas y periurbanas) se legitiman mediante las sinergias en sus dinámicas y entre los actores participantes, en el interés de atenuar las contradicciones entre las ocupaciones urbanas y rurales. El periurbano no es solo un espacio de explotación agrícola, sino de construcción de nuevas modalidades colectivas para vivir los territorios. Es, por tanto, un *espacio vivido* (Bernard *et al.*, 2006), en el que se establecen vinculaciones diversas con el entorno institucional urbano para reivindicar la actividad agrícola en los planes de urbanismo y las instancias para la financiación.

En los procesos emergentes de la producción agrícola vinculada a las ciudades se ha constituido un amplio abanico de modalidades que reivindican la producción sana de alimentos y sistemas productivos sostenibles, así como también se han establecido esquemas que impulsan la planificación territorial de los sistemas alimentarios. Esta idea se ha fortalecido ante las debilidades del sistema agroalimentario en las grandes urbes, sobre todo en lo referente a la modalidad prevaleciente, la de la producción alimentaria convencional. Una de las expresiones emergentes, la agricultura periurbana de proximidad, se constituye en un valioso aporte al abasto alimentario bajo condiciones de emergencia, especialmente a través de los sistemas alternativos de producción y consumo, que fortalece el sentido solidario y comunitario en las economías locales.[11]

En el contexto de la justicia social se consideran otros procesos y expresiones territoriales, en la búsqueda de la salvaguarda de la agricultura familiar y las economías campesinas locales. Se trata de modalidades con un amplio sustento cooperativista (*hubs* alimentarios, supermercados cooperativos, obradores compartidos),[12] que constituyen un sustento primordial para atender requerimientos alimentarios con bajos costos, para amplios sectores de población de las periferias y su entorno rural, sobre todo, los que se ubican en distintos estratos de pobreza y que no siempre son cubiertos por los

alcanzó más de un 60% (INTA, 2013, citado en Mantovani *et al.*, 2020).

[11] Desde la última década del siglo XX, en coincidencia con el incremento de las crisis sanitarias (especialmente con la pandemia del Covid-19), se incrementó la demanda de productos de origen local, de calidad nutricional y sin agroquímicos, muy vinculada a la proximidad y al conocimiento en el origen de los productores (Renting et al., 2003).

[12] Organizaciones o cooperativas de productores y ciudadanos, con fines de producción, acopio y comercialización de alimentos básicos a bajo costo. Considera también el uso compartido de infraestructura básica y de movilidad para la producción entre los socios. Se rige bajo los principios de la economía solidaria.

programas y las políticas públicas para la seguridad alimentaria (Sanz y Yacamán, 2022).

En el contexto internacional, la producción de alimentos sanos ha dado paso a nuevas fórmulas de institucionalidad cooperativa, que pueden tener un mayor impacto a corto y medio plazo en el impulso a la alimentación sostenible. Bajo los enfoques disciplinarios de la agroecología y la bioeconomía circular (Sanz y Gómez *et al.*, 2020), se han desarrollado modelos que colocan en el centro a la alimentación sustentable y el desarrollo comunitario sin fines lucrativos, en los que intervienen activamente los consumidores y la sociedad civil. En ese sentido, los supermercados cooperativos han sido una importante experiencia. Su expansión está en auge y en los últimos años han replicado en importantes centros urbanos (Nueva York, París, Milán, Bruselas, San Francisco, Madrid, Barcelona, Valencia y diversas ciudades españolas),[13] y constituyen una valiosa aportación en la Economía Social.

Los parques agrarios son otra novedosa expresión en el ámbito de las jerarquías metropolitanas, que se han constituido como figuras territoriales para ordenar y gestionar el espacio agrícola amenazado por la expansión urbana, donde la producción de alimentos y la protección paisajística se convierten en medios para promover la concertación entre los diversos agentes que lo construyen, así como para proteger y gestionar los valores identitarios del territorio (Mata y Yacamán, 2015). Si bien esta expresión territorial ha sido poco difundida, forma parte de las modalidades contemporáneas de la metropolización y en algunos países europeos se les considera en los planes de ordenamiento urbano. Constituye una de las transformaciones principales que se conforman en el periurbano, como un componente del *posmetropolitano* (Friedmann, 2016). Su presencia fortalece las prácticas agrícolas de proximidad.

El reconocimiento de los roles territoriales de la agricultura por las colectividades locales resignifica a la ruralidad en el periurbano. Posibilita una mayor inserción de los productores agrícolas y una negociación más equilibrada sobre el compartimiento de los recursos territoriales a través de la elaboración simétrica de *proyectos territoriales agrícolas y urbanos* (Thareau, 2008). Ahí, se fortalece el sentido multifuncional de los espacios rurales, en los que la agricultura se mantiene como una actividad económica con importancia local, destacando también sus atractivos residenciales y la apertura a las actividades recreativas y la preservación del ambiente. Más que procesos de adaptación de la agricultura en un entorno urbano, la actividad agrícola genera un proyecto de desarrollo y valoración de los recursos territoriales periurbanos específicos. Aun así, se deben valorar los alcances a mediano y largo plazo, pues los modelos alternativos se confrontan con patrones de consumo ampliamente arraigados, con efectos altamente nocivos para la salud poblacional (Condor y Lavissière, 2023).

La producción convencional de alimentos sigue siendo predominante en el abasto alimentario de los centros urbanos. El reto consiste en fortalecer las modalidades existentes en la agricultura urbana y periurbana pese a sus dificultades, pues en los países latinoamericanos aún no se cuenta con un nicho suficiente de consumidores para los productos provenientes de modelos alternativos, que sustentan al proceso. Su consideración dentro de las políticas públicas de desarrollo rural es incipiente y cuenta con apoyos gubernamentales muy limitados. Sin embargo, el fortalecimiento y el impulso aún mayor a estas modalidades, incorporaría dentro del sistema agroalimentario a una mayor cantidad de productores pequeños, que regularmente encuentran dificultades para su sostenimiento como agricultores, sean colectivos o privados. Se pretende, además, que mediante el fortalecimiento de los circuitos cortos, se optimicen los beneficios tanto para productores como para consumidores participantes en la cadena de valor.

[13] Desde mediados del siglo XIX, las asociaciones de consumo colectivo fueron muy comunes en diversos países europeos, con la intención de autoabastecerse y controlar los precios y la distribución de los alimentos. Se vinculaban con las asociaciones obreras y constituían una valiosa ayuda a la población de bajos recursos. Es uno de los diversos gérmenes de las asociaciones y grupos contemporáneos de gestión colectiva y solidaria para la alimentación, cuya principal expresión lo constituye los supermercados cooperativos, empresas sociales no lucrativas (Polo, 2024).

La discusión sobre la difusión de estos procesos socioterritoriales es importante debido a la permanente redefinición del carácter multifuncional que experimentan los espacios rurales contemporáneos, sobre todo aquellos vinculados a las dinámicas de los sistemas metropolitanos. No solo se requiere el análisis a mayor profundidad de los procesos que tienen que ver con las diversas expresiones de los sistemas agroalimentarios, sino también estudiar otras transformaciones y expresiones diferenciadas en estos ámbitos de interacción urbano-rural, como la diversidad de los usos del suelo, las nuevas formas de poblamiento y su movilidad, la neoruralidad, las diferenciaciones socioterritoriales, entre otras expresiones que transforman permanentemente a los espacios periurbanos.

AGRADECIMIENTO

La presente aportación es producto del proyecto de investigación PAPIIT CG 300122, "La Mega-urbanización en la Región Centro de México. Desigualdad Socio-Territorial y Nuevos Procesos de Peri-urbanización", en el que el autor es co-responsable.

REFERENCIAS

Alberdi, J. (2018). Agricultura ecológica y de proximidad como herramienta para el desarrollo rural: el ejemplo de San Sebastián. *Ager. Revista de Estudios sobre Despoblación y Desarrollo Rural*, *24,* 191-224.

Aubry, C. y Chiffoleau Y. (2009). Le développement des circuits courts et l'agriculture périurbaine: histoire, évolution en cours et questions actuelles. *Innovations Agronomiques, 5, 53-67.* https://hal.science/hal-01197823

Ávila, H. (2019). Agricultura urbana y periurbana. Reconfiguraciones territoriales y potencialidades en torno a los sistemas alimentarios urbanos. *Investigaciones Geográficas, 98*, DOI: 10.14350/rig.59785.

Berger, M., Aragau, C., y Rougé, L. (2014). Vers une maturité des territoires périurbains? *EchoGéo*. *27*. DOI: 10.4000/echogeo.13683

Bernard, C., Duvernoy, I.; Dufour, A., y Albaladejo, C. (2006). Les relations sociales des agriculteurs périurbains: quelles articulations au territoire?. *Cahiers Agricultures,15(6*), 529-534. DOI: 10.1684/agr.2006.0032

Berti, G. y Mulligan, C. (2016.). Competitiveness of Small Farms and Innovative Food Supply Chains: The Role of Food Hubs in Creating Sustainable Regional and Local Food Systems. *Sustainability, 8(616)*. DOI:10.3390/su8070616

Bonnal, P. M., Bosc., J. M, y Díaz, B. L. (2004). Multifuncionalidad de la agricultura y Nueva Ruralidad: ¿Reestructuración de las políticas públicas a la hora de la globalización? En E. Pérez y M. A. Farah (comp.*), Desarrollo Rural y Nueva Ruralidad en América Latina y la Unión Europea*. Pontificia Universidad Javeriana.

Boschma, R. A. (2005). Proximity and innovation. A critical assessment, *Regional Studies*, *39*(1), 61-74. DOI: 10.1080/0034340052000320887http://www.regional-studies-assoc.ac.uk

Bonnefoy S. y Brand, C. (2014). Régulation politique et territorialisation du fait alimentaire: de l'agriculture à l'agri-alimentaire. *Géocarrefour. 89*(1-2), 95-103. DOI: https://doi.org/10.4000/geocarrefour.9424

Chiffoleau, Y. y Prevost, B. (2012), Les circuits courts, des innovations sociales pour une alimentation durable dans les territoires. *Norois, 220,* 7-20. DOI : https://doi.org/10.4000/norois.4245

Chiffoleau, Y., Millet-Amrania, S., Rossib, A., Rivera-Ferrec, M. G., Lopez, Merino, P. (2019). The participatory construction of new economic models in short food supply chains. *Journal of Rural Studies, 68*, 182-190. Recuperado de: https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.01.019.

Cleveland, D. M., Mueller, N., Tranovich, A. C., Mazaroli, N., Hinson, K. (2014). Local food hubs for alternative food systems: A case study from Santa Barbara County, California. *Journal of Rural Studies, 35,* 26-36. http//dx.doi.org/10.1016/j.rurstud.2014.03.008

Colla, S. (2019). Essor des supermarchés coopératifs: une carte pour les localiser dans toute la France. *We Demain un média pour changer d'époque*. https://www.wedemain.fr/partager/essor-des-supermarches-cooperatifs-une-carte-pour-les-localiser-dans-toute-la-france_a4036-html/

Condor, R. y Lavissière, M. (2023). Les nouvelles formes d'agriculture un nouveau modèle agricole?. *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, 111-134. https://doi.org/10.3917/reru.231.0111

Donzelot, J. (2004). La ville à trois vitesses: relégation, périurbanisation, gentrification. *Esprit, 303(3/4),* 14-39. Recuperado de: www.esprit.presse.fr. https://esprit.presse.fr/article/jacques-donzelot/la-ville-a-trois-vitesses-relegation-periurbanisation-gentrification-7903.

Donzelot, J. y Mongin, O. (2013). Tous périurbains ! Tous urbains ! Introduction. *Esprit*. Recuperado

de: https://esprit.presse.fr/article/jacques-donzelot-et-olivier-mongin/tous-periurbains-tous-urbains-introduction-37406.

Duvernoy, I., Jarrige, F., Moustier, P., y Serrano, J. (2005) Une agriculture multifonctionnelle dans le projet urbain: quelle reconnaissance, quelle gouvernance? *Les Cahiers de la multifonctionnalité, 8,* 87-104.

Duvernoy, I., Gambino, M., Panegos, P., y Weisben, J. (2018). La métropolisation vue depuis les espaces agricoles et naturels en *Projet POPSU3-Toulouse Métropole. De l'étalement urbain à l'articulation métropolitaine. Territoires, projets, stratégies et métropolisation de Toulouse. Axe 3.* Projet de recherche 2018-2021

Falkowitz, M. (2018). How a food-loving community center became the most infamous and best socialist grocery utopia in America. *New York Magazine.* Recuperado de: https://www.grubstreet.com/2018/04/history-of-the-park-slope-food-coop.html

Fleury, A. y Donadieu, P. (1997) de l'agriculture péri-urbaine à l'agriculture urbaine. *Courrier de l'environnement de I'INRA, 31,* 45-61. Recuperado de: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Fleury+y+Donadieu%2C+1997&btnG=

Folgado, F. (2020). Los parques agrarios metropolitanos como modelo de sostenibilidad territorial. *Espacios de transición campo-ciudad*. Curso 2019/2020. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Valencia.

Gallaud, D. (2020). Proximité organisée " subie " et effets négatifs des proximités. *Revue d'Économie Régionale & Urbaine,* 113-128. Recuperado de: https://doi.org/10.3917/reru.201.0113

Halfacree, K. (2001). Constructing the object: taxonomic practices, counterurbanisation' and positioning marginal rural settlement. En *International Journal of Population Geography*, *7*, 395-411. DOI: https://doi.org/10.1002/ijpg.238

Hoggart, K. (1997). Rural Migration and Counterurbanization in the European Periphery: The Case of Andalucía. En *Sociologia Ruralis*, *37*(1), pp. 134-153. DOI: https://doi.org/10.1111/1467-9523.00040

Jaillet, M. C. (2004, mayo-abril). L'espace périurbain: un univers pour les clases moyennes. *Esprit*.

Jennings, S. J., Cottee, T. Curtis, y Miller, S. (2015). Food in an Urbanised World. The Role of City Region Food Systems in Resilience and Sustainable Development. Londres: International Sustainability Unit. Recuperado de: https://www.fao.org/fileadmin/templates/FCIT/documents/Food_in_an_Urbanised_World_Report_DRAFT_February_2015.pdf

Lardon, S. y Loudiyi, S. (2014). Agriculture et alimentation urbaines : entre politiques publiques et initiatives locales. *Géocarrefour, 89,* 1-2. https://journals.openedition.org/geocarrefour/9296

López-García, D., Alonso-Leal, N., García-García, V., Molero-Cortés, J., Fernández-García, J., Arroyo-Escudero, L., y Herrera-Calvo, P. M. (2020). Ámbitos de gobernanza en las políticas alimentarias urbanas: Una mirada operativa. *Estudios Geográficos*, *81*(289), e051. DOI: https://doi.org/10.3989/estgeogr.202065.065

Mantovani, G. V., Peralta Flores, M. C., y C. Soijet, M. G. (2020). La figura del parque agrario en Argentina. Un recurso para afrontar las problemáticas de la urbanización metropolitana. *Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo (SIIU), 12.* DOI: http://dx.doi.org/10.5821/siiu.9923.

Mata, R. y Yacamán, C. (2015). Gobernanza para una agricultura viva en un paisaje periurbano de calidad. Estudios de caso en la huerta metropolitana de Madrid. En J. De la Riva, P. Ibarra, R. Montorio, y M. Rodrigues (Eds.), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación* (pp. 265-274). Universidad de Zaragoza-AGE.

Méndez, R. (2018). Prácticas económicas alternativas y nuevas dinámicas urbanas: los grupos de consumo agroecológico. En J. Sanz y J. Delgadillo (Coords.), *Sistemas Agroalimentarios locales de proximidad. Contextos rururbanos en México y España.* UNAM, Instituto de Investigaciones Económicas.

Medina, M. A. (2019). En el supermercado cooperativo, el cliente es el dueño. *El País.* Recuperado de: https://elpais.com/sociedad/2019/10/10/actualidad/1570707713_354751.html

Paül, V. (2015). Los parques agrarios en Cataluña. Breve análisis de la contribución de Josep Montasell a su concepción, desarrollo e implantación. En C. Yacamán y A. Zazo-Moratalla, A. (coords.), *El parque agrario. Una figura de transición hacia nuevos modelos de gobernanza territorial y alimentaria*. Heliconia S. Coop.

Perrier-Cornet, P. (2001). La dynamique des espaces ruraux dans la société française : un cadre d'analyse. *Territoires, 3*, 61-74.

Plant, R., Maurel, P., Barbe, É., y Brennan, J. (Eds.) (2018). *Les terres agricoles face à l'urbanisation: De la donnée à l'action, quels rôles pour l'information ?* Éditions Quæ. Extraído de http://books.openedition.org/quae/28250

Polo, C. (2024, 20 de febrero). España tiene ya 10 supermercados cooperativos en diferentes ciudades. *El País*. Recuperado de: https://elpais.com/gastronomia/2024-02-20/espana-ya-tiene-10-supermercados-colaborativos-en-diferentes-ciudades.html

Poulot, M. (2011). Des arrangements autour de l'agriculture en périurbain: du lotissement agricole au projet de territoire, *VertigO.la revue électronique en sciences de l'environnement, 11* (2). DOI: http://dx.doi.org/10.4000/vertigo.11188

Rallet, A. (2002) L'économie des proximités. Propos d'étape. *Études et Recherches sur les Systèmes Agraires et Développement, 33*, 11-25.

Ravetz, J., Fertner, C., Nielsen, T. (2013). The Dynamics of Peri-Urbanization. En C. Aalbers, K. Nilsson, S. Bell, S. Pauleit, T. S. Nielsen. (Eds.), *Peri-urban Futures: Scenarios and Models for Land Use Change in Europe* (pp. 13-44). University of Manchester, Springer. Recuperado de: https://findit.dtu.dk/en/catalog/63f183934c5c7e91ac5595fd

Renting, H., Marsden, T., Banks, J. (2003). Understanding alternative food networks : exploring the role of short supply chains in rural development. *Environment and Planning A,* 35, 393-411. DOI: https://doi.org/10.1068/a3510. Source: RePEc

Rougé, L. (2018). Notion en débat : périurbanisation. *Géoconfluences.* http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/a-la-une/notion-a-la-une/notion-a-la-une-periurbanisation

Rutten, R. (2017). Beyond proximities: The socio-spatial dynamics of knowledge creation. *Progress in Human* Geography, *41*(2), 159-177. DOI: https://doi.org/10.1177/0309132516629003

Sanz, J. y Gómez, L. (Coords. Gral.). (2021). *Agroecology and Circular Bioeconomy.* En E. Olmos Aranda y M. Venegas Calerón (Coords. temáticos). *Volume 6. Sustainable Primary Production.* CSIC Scientific Challenges: Towards 2030. Recuperado de: http://libros.csic.es/product_info.php?cPath=164&products_id=1471

Sanz, J. y Yacamán, C. (2022). *Innovación y alimentación sostenible. Políticas y modelos cooperativos de logística y comercialización*. Cajamar Caja Rural.

Segrelles, J. A. (2015). Agricultura periurbana, parques naturales agrarios y mercados agropecuarios locales: una respuesta territorial y productiva a la subordinación del campo a la ciudad. *Scripta Nova Revista electrónica de geografía y ciencias sociales, XIX(502)*. Recuperado de: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/44522/1/Agric_Periurb.pdf

Soulard, C. T., Perrin, C., Jarrige, F., Laurens, L., Nougarèdes, B., Scheromm, P., Chia, E., Clément, C., Michel, L., Hasnaoui Amri, N., Duffaudprévost, M-L, y Ubilla-Bravo, G. (2018). Territorial innovation in the relationships between agriculture and the city. En F. Guy, Y. Chiffoleau, F. Goulet, L. Temple, y J.-M. Touzard (Ed.), *Innovation and development in agricultural and food systems*. Éditions Quæ.

Thareau, B. (2008). L'agriculture dans une dynamique urbaine : négociations autour d'usages du territoire. *Géographie, économie, société*, *8*(3), 351-368. DOI: https://doi.org10.3166/ges.8.351-368

Tissone, F., Hernandez, S., y Moustier, E. (2019). Le bonheur est-il dans le champ ? Initiatives locales et soutenables dans l'agri-alimentaire urbain et périurbain : émergence d'un travail institutionnel de redéfinition des espaces. *Gestion et management public, 7*(4), 27-50. Recuperado de: https://doi.org/10.3917/gmp.074.0027

Tornaghi, C. y Dehaene, M. (2019). The prefigurative power of urban political agroecology: rethinking the urbanisms of agroecological transitions for food system transformation. *Agroecology and Sustainable Food Systems, 44(5).* DOI: https://doi.org/10.1080/21683565.2019.1680593

Torre, A. (2014). L'agriculture de proximité face aux enjeux fonciers. Quelques réflexions à partir du cas francilien. *Espaces et sociétés*, 158, 31-48. DOI: https://doi.org/10.3917/esp.158.0031

Torre, A. y Talbot, D. (2018). Proximités : retour sur 25 années d'analyse. *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, 917-936. DOI : https://doi.org/10.3917/reru.185.0917

Torre, A. y Beuret, J.-E. (2012). Développement durable et territoires. *Proximités territoriales, Economica*, *collection Anthropos, 4*(1). DOI https://doi.org/10.4000/developpementdurable.9638

Torre, A. (2013). Introduction. *Natures urbaines : l'agriculture au coeur des Métropoles?* Demeter.

Torres-Salcido, G. (2010). *Los sistemas agroalimentarios locales en México. Aportaciones teóricas y empíricas para el estudio de la gobernanza.* Seminario. 116th Seminar European Association of Agricultural Economists._DOI: http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.95237

Vidal, R. y Fleury, A. (2008). Agriculture, City and Territory: French experiments in urban agricultura. E*n Actes du colloque de Leuven: Rurality near the City. U*niversité de Leuven. Recuperado de: URL http://agriurbanisme.fr/publi.html

Yacamán, C. (2015). Reflexiones sobre la gestión y dinamización de los Parques Agrarios: democratizando el sistema alimentario. En C. Yacamán, y A Zazo (coords.), *El parque agrario. Una figura de transición hacia nuevos modelos de gobernanza territorial y alimentaria*. Heliconia S. Coop.

Yacamán C. (2018). Agricultura periurbana: revisión crítica de los riesgos y desafíos en la actual agenda política de las interacciones agro-urbanas. *Biblio3W. Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, *23*(1.237). DOI: https://doi.org/10.1344/b3w.0.2018.26487. Recuperado de: https://revistes.ub.edu/index.php/b3w/article/view/26487

Yacamán, C. (2018a). El Parque Agrario: Planificación estratégica para la preservación y gestión de los espacios agrarios metropolitanos. *Ciudad y Territorio. Estudios Territoriales, 50*(198), 787-804. Recuperado de: https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/view/76700/47015

Woods, M. (2007). Engaging the global countryside: globalization, hibridity and the reconstitution of rural place. *Progress in Human Geography, 31*(4). DOI: https://doi.org/10.1177/0309132507079503

Zasada, I. (2011). Multifunctional peri-urban agriculture. A review of societal demands and the provision of goods and services by farming. *Land Use Policy, 28*(4), 639-648. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.01.008

Zazo, A. (2010). El Parque Agrario: Preservación de la actividad agraria en espacios periurbanos (El caso del Bajo Llobregat). *Revista Territorios en Formación*, 01. Recuperado de: URL: https://oa.upm.es/37980/1/INVE_MEM_2011_206038.pdf

3Keel Prince's charities. (2015). *Food in an urbanized world. The role of city region food systems in resilience and sustainable development*. Draft. Recuperado de: www.cityregionfoodsystems.org

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60807 • ARTÍCULOS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60807
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Servicios ecosistémicos culturales de los cenotes del municipio de Tulum, Quintana Roo: usos, beneficios y amenazas

Cultural ecosystem services of the cenotes of the municipality of Tulum, Quintana Roo: uses, benefits and threats

Elsi Margarita May Arias,* Lucinda Arroyo Arcos** y María Luisa Hernández Aguilar***

Recibido: 21/10/2023. Aceptado: 15/01/2024. Publicado: 01/04/2024.

Resumen. Los servicios ecosistémicos se conceptualizan como todos aquellos procesos, bienes, valores y servicios que el ser humano extrae de forma tangible e intangible de los diferentes ecosistemas distribuidos por el mundo. Algunos ecosistemas son peculiares y de importancia local o regional, como es el caso de los cenotes (dolinas inundadas), característicos de la península de Yucatán y de gran importancia para la provisión de diversos servicios ecosistémicos, como el turismo y la recreación, clasificados dentro de la categoría de servicios culturales, tema de interés de este artículo. El objetivo fue analizar los servicios ecosistémicos culturales de los cenotes, las implicaciones de su uso y las amenazas a las que se exponen, se indagó sobre la relación hombre-naturaleza y su importancia socioeconómica en los territorios de mayor crecimiento turístico, como el municipio de Tulum, en el que las actividades turísticas se desarrollan en torno a espacios naturales y creados para fomento de la cultura, como sus playas, zonas arqueológicas, cenotes y cuevas. La investigación tiene un corte descriptivo y exploratorio con un proceso metodológico dividido en tres fases: 1) búsqueda y revisión de literatura en buscadores especializados, sitios web y páginas de sitios, así como consulta de bases de datos sobre hallazgos arqueo-paleontológicos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) e inventario de cenotes de la asociación civil Amigos de *Sian Ka'an;* 2) identificación de cenotes con mayor cantidad de visitas por medio de la base de datos Amigos *Sian Ka'an* y datos obtenidos de Google Earth. En esta fase del proceso fue de utilidad la herramienta espacial *InVEST* para calcular las tasas de visitación y centrar la investigación en los cenotes con mayor número de visitas, y 3) clasificación de cenotes de acuerdo con la ubicación geográfica, procesos de disolución y una propuesta basada en la infraestructura y la accesibilidad. Toda la información cartográfica presentada en el trabajo fue procesada en los sistemas de información geográfica QGis3 y ArcGis 10.8. Entre los resultados obtenidos podemos destacar que la mayor cantidad de visitas se registró en Casa Cenote, Gran Cenote, Calavera, Dos Ojos, Yal Ku y Karwash, clasificados como prístinos y costeros principalmente, con administración privada, desarrollo de infraestructura turística dentro y fuera de las instalaciones, accesibilidad y cercanía a centros de población. Se identificaron dos servicios ecosistémicos culturales en los cenotes: a) turismo-recreación, cuyos principales beneficiarios son los turistas, la población trabajadora, los propietarios y los locales. Las actividades turísticas más importantes son *snorkel*, buceo, nado libre, *paddleboard,*

**Estudiante del Doctorado en Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort, col. del Bosque, 77019, Chetumal, Quintana Roo, México. ORCID https://orcid.org/0000-0001-5348-8853. Email: emayarias@hotmail.com. Autora de correspondencia.
** Profesora investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Campus Cozumel. Avenida Andrés Quintana Roo s/n, esq. Calle 110 sur. Col. Maravilla, 77600, Cozumel, Quintana Roo, México. ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6696-7124. Email: larroyo@uqroo.edu.mx
*** Profesora de Apoyo Técnico Académico de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Campus Chetumal. Boulevard Bahía s/n Esq. Ignacio Comonfort, col. Del Bosque, 77019, Chetumal, Quintana Roo, México. ORCID https://orcid.org/0000-0002-7699-9418. Email: malu@uqroo.edu.mx

observación de flora y fauna, senderismo y tirolesa; b) educación-investigación, incentivado por los hallazgos arqueológicos y paleontológicos del Pleistoceno o la Edad de Hielo en cuevas y cavernas, así como el descubrimiento de complejos sistemas de ríos subterráneos interconectados entre sí. Este servicio ecosistémico tiene un impacto a nivel global, como lo exponen las nuevas teorías y un mayor conocimiento del pasado, del presente y sus prospecciones, aunado al creciente interés multidisciplinar y científico por los ecosistemas kársticos. El buceo especializado, y sea como exploración por investigadores y como deporte extremo por turistas, principalmente extranjeros, ha crecido al punto de existir empresas de capacitación y certificación, tiendas especializadas para renta de equipo y guías especializados en buceo. Se analizó una compleja organización en la prestación de servicios turísticos y beneficios en cadena, así como impactos negativos derivados principalmente de la masificación de los cenotes, vacíos legales y una débil gestión. Sin embargo, Tulum es un destino turístico con un segmento ligado a la búsqueda de la armonía interior, la conexión con la cultura y el cuidado del medio ambiente, situación que puede ser aprovechada para dar a los cenotes un uso más sostenible y resaltar la espiritualidad, la apreciación de la naturaleza, el paisaje, el arte, la identidad y la pertenencia, entre otros servicios ecosistémicos culturales.

Palabras clave: ecosistema kárstico, depresiones, turismo, análisis espacial.

Abstract (DL). Ecosystem services are conceptualized as all those processes, goods, values and services that humans extract tangibly and intangibly from the different ecosystems distributed throughout the world. Some ecosystems are peculiar and of local or regional importance, as is the case of the cenotes (flooded sinkholes), characteristic of the Yucatan Peninsula and of great importance for the provision of diverse ecosystem services, such as tourism and recreation, classified within the category of cultural services, the subject of interest of this article. The objective was to analyze the cultural ecosystem services of the cenotes, the implications of their use and the threats to which they are exposed, the human-nature relationship and their socio-economic importance in the territories of greatest tourist growth, such as the municipality of Tulum, where tourist activities are developed around natural spaces created for the promotion of culture, such as its beaches, archaeological zones, cenotes and caves. The research is descriptive and exploratory with a methodological process divided into three phases: 1) literature search and review in specialized search engines, websites and web pages, as well as consultation of databases on archaeo-paleontological findings of the National Institute of Anthropology and History (INAH) and inventory of cenotes of the civil association Amigos de Sian Ka'an; 2) identification of cenotes with the highest number of visits through the database Amigos Sian Ka'an and data obtained from Google Earth. In this phase of the process, the InVEST spatial tool was useful to calculate visitation rates and focus the research on the cenotes with the highest number of visits, and 3) classification of cenotes according to geographic location, dissolution processes, and a proposal based on infrastructure and accessibility. All the cartographic information presented in the work was processed in QGis3 and ArcGis 10.8 geographic information systems. Among the results obtained we can highlight that the highest number of visits was registered in Casa Cenote, Gran Cenote, Calavera, Dos Ojos, Yal Ku and Karwash, mainly classified as pristine and coastal, with private administration, development of tourist infrastructure inside and outside the facilities, accessibility and proximity to population centers. Two cultural ecosystem services were identified in the cenotes: a) tourism-recreation, whose main beneficiaries are tourists, the working population, owners and locals. The most important tourist activities are snorkeling, scuba diving, free swimming, paddleboarding, flora and fauna observation, hiking and zip-lining; b) education-research, encouraged by archeological and paleontological findings from the Pleistocene or Ice Age in caves and caverns, as well as the discovery of complex systems of interconnected subway rivers. This ecosystem service has a global impact, as shown by new theories and a greater knowledge of the past, the present and its prospections, together with the growing multidisciplinary and scientific interest in karst ecosystems. Specialized diving, both as exploration by researchers and as an extreme sport for tourists, mainly foreigners, has grown to the point that there are training and certification companies, specialized equipment rental stores and specialized diving guides. A complex organization in the provision of tourism services and chain benefits was analyzed, as well as negative impacts derived mainly from the overcrowding of cenotes, legal loopholes and weak management. However, Tulum is a tourist destination with a segment linked to the search for inner harmony, connection with culture and care for the environment, a situation that can be taken advantage of to give the cenotes a more sustainable use and highlight spirituality, appreciation of nature, landscape, art, identity and belonging, among other cultural ecosystem services.

Keywords: karst ecosystem, karstic ecosystem, depressions, tourism, spatial analysis.

INTRODUCCIÓN

La definición y clasificación de los servicios ecosistémicos ha sido un proceso continuo, resultado del arduo trabajo de investigadores, académicos y diversos grupos comprometidos con el ambiente. Los beneficios que emanan de los ecosistemas y rinden algún provecho de forma directa o indirecta a la sociedad incluyen: a) procesos, b) servicios, c) bienes y d) valores (Costanza *et al.*, 2017; Osaka *et al.*, 2021; Watson *et al.*, 2019).

Los servicios ecosistémicos son todos aquellos beneficios que las personas obtienen de la diversidad de ecosistemas distribuidos por el planeta y mediante los cuales satisfacen sus necesidades y búsqueda de desarrollo social y económico. Este concepto se forma con bases científicas asociadas a las nociones de las ciencias naturales y sociales, y con relación al binomio hombre-naturaleza (FAO, 2023; Guan y Xiong, 2022; B. Wang *et al.*, 2022).

La taxonomía general de los servicios ecosistémicos incluye aquellos de: 1) soporte; 2) regulación; 3) abastecimiento y 4) culturales (Hu *et al.*, 2022; Luo *et al.*, 2021; MEA, 2005; Meacham *et al.*, 2022). Los servicios de soporte son aquellos indispensables para la producción de todos los demás (Avendaño-Leadem *et al.*, 2020; MAE *et al.*, 2018); los servicios de regulación se refieren a los procesos ecosistémicos que regulan las condiciones ambientales (FAO, 2023), mientras que los servicios de abastecimiento o provisión son todos aquellos productos extraídos de la naturaleza, es decir, beneficios materializados por los mismos ecosistemas (Monsalve-Castro *et al.*, 2019). Entre los servicios de abastecimiento se contemplan las materias primas, alimentos y recursos hídricos, en los de regulación el ecosistema tiene la función de regular los gases, el clima, el medio ambiente y procesos hidrológicos; en los servicios de soporte se considera la conservación del suelo, nutrientes y el mantenimiento de la biodiversidad (Shi *et al.*, 2020; B. Wang *et al.*, 2022).

Los servicios ecosistémicos culturales (SEC), objeto de estudio del presente trabajo, se definen como los beneficios intangibles que las personas obtienen de un ecosistema por medio de interacciones físicas y cognitivas (Banarsyadhimi *et al.*, 2022; MEA, 2005). Los SEC incluyen brindar sentido de lugar, patrimonio cultural, recreación, turismo, lo estético, espiritual y religioso; la apreciación de la naturaleza y el paisaje, el arte y la ciencia, la identidad y pertenencia, entre otros (Arnaiz-Schmitz *et al.*, 2021; Csurgó y Smith 2022; De Groot *et al.*, 2010). Esta categoría trata de entender el modo de vivir de las personas, los valores, sus historias, las prácticas materiales y simbólicas de sus territorios (Csurgó y Smith 2022; Fish *et al.*, 2016). En este sentido se destaca la importancia de la naturaleza y la cultura de la península de Yucatán (Infante-Ramírez y Arce- Ibarra, 2015), fusionadas en paisajes peculiares de gran importancia para la región.

En el paisaje kárstico de la región, algunas de las formas más significativas son las dolinas, depresiones circulares provocadas por el hundimiento del terreno, y si contienen agua se conocen como cenotes. Estos, a su vez, se clasifican por su grado de desarrollo del karst, (Ayuntamiento de Tulum 2021-2024 y Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, 2023). El término regional de cenote tiene su origen en la lengua maya *"dzonot"*, que significa abismo (Arroyo-Arcos *et al.*, 2019; Hernández-Aguilar, 2019), utilizado de manera general para referirse a depresiones naturales originadas en la roca y con presencia permanente o estacional de agua (Gijón-Yescas *et al.*, 2021). Constituyen el rasgo topográfico y característico más importante del territorio, distribuidos principalmente en la zona norte (Beddows *et al.*, 2007; Mondragón-Mejía *et al.*, 2019).

Las clasificaciones en torno a los cenotes destacan por los siguientes aspectos. Por su forma: a) forma de vaso, b) forma de aguada, c) cántaro, y d) forma de caverna (Hall, 1936). Por sus características hidrobiogeoquímicas: a) cenotes jóvenes, y b) cenotes viejos o lóticos (Schmitter-Soto *et al.*, 2002). En cuanto a su ubicación geográfica: a) costeros (agua dulce y marina mezclada), y b) internos (agua dulce o ligeramente salobre) (Navarro-Mendoza, 1988). Con respecto a los procesos de disolución de la roca: a) endokarst (en el subsuelo se forman cenotes cerrados), y b) exokarst (en la superficie se forman cenotes abiertos), cuando los procesos se desarrollan tanto en el subsuelo como en la superficie, los cenotes son de tipo semiabierto (Hernández-Aguilar, 2019).

Estas clasificaciones y diferenciaciones permiten entender su diversidad de servicios ecosistémicos. Estos ambientes proveen mantenimiento de biodiversidad de especies (National Geographic Society *et al.*, 2021), lo cual resalta la importancia biogeográfica de la región, en especial por los grupos microfaunísticos de invertebrados acuáticos, macrofauna y especies primitivas, así como endémicas, particularmente crustáceos dentro de un ambiente altamente oligotrófico (Pohlman y

Brankovits, 2017; Ruíz-Cancino *et al.*, 2019), presentes principalmente en cenotes costeros y cuevas inundadas.

Al igual que la fauna, la vegetación circundante a estos cuerpos de agua muestra características diferenciadas (Flores y Espejel, 1994), por ejemplo, en los cenotes costeros domina la vegetación de selva baja subcaducifolia y manglar, mientras que en los internos predomina la vegetación secundaria arbórea de selva mediana subperennifolia (INEGI, 2020). Los cenotes también proporcionan refugio y son hábitat de múltiples especies silvestres (MacSwiney G. *et al.*, 2007; Martos-López, 2007).

La formación de suelos, el mantenimiento de sus nutrientes y la conservación de las características biofísicas, forman parte de los servicios ecosistémicos de soporte vinculados a los cenotes.

Dentro de los servicios de aprovisionamiento destaca la producción y almacenamiento de agua, ya que estos son la principal fuente de agua dulce para los habitantes y la vida silvestre (Cortés-Campos, 2018; Llanes-Salazar y Rejón-Márquez, 2022). En algunas comunidades se les ha dado un uso pesquero, lo que representan una fuente de alimento (MacSwiney G. *et al.*, 2007; Martos-López, 2007). A lo anterior se puede sumar la producción de madera, fibras, plantas medicinales y energía (SEDUMA *et al.*, 2011).

En los servicios ecosistémicos de regulación destacan: la depuración de masas de agua, barrera de inclusión salina, gradiente hidráulico, mantenimiento térmico y captura de carbono (López-Monzalvo, 2017; Méndez-González, 2010; SEDUMA *et al.*, 2011).

Finalmente, los servicios ecosistémicos culturales, como el turismo y la recreación, las experiencias espirituales, de saberes y apreciación, así como de reflexión y desarrollo son importantes desde hace cientos de años. Por ejemplo, para los antiguos mayas de la península de Yucatán, los cenotes formaron parte indisociable de su cosmovisión (Cortés-Campos, 2018; Mondragón-Mejía *et al.*, 2019).

Estos cuerpos de agua continúan simbolizando espiritualidad y muchos pueblos mantienen creencias vinculadas a ellos, sin embargo, su uso actual se ha extendido a actividades turísticas y servicios de educación e investigación (Gabriel *et al.*, 2009; Infante-Ramírez y Arce-Ibarra 2015). En las dos últimas décadas, los cenotes han despertado gran interés en ciencias de investigación histórica como la arqueología y la paleontología.

En el sentido económico los cenotes se han transformado en un producto de la oferta turística-recreativa, con beneficios tangibles para familias enteras. Sin embargo, el acelerado desarrollo de la infraestructura turística, inmobiliaria y las visitas masivas sin control, suman a la vulnerabilidad intrínseca de estos ecosistemas. Por eso este artículo pretende analizar los servicios culturales de los cenotes del municipio de Tulum, Quintana Roo, sus usos, beneficios y amenazas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El municipio de Tulum, en el estado de Quintana Roo, es parte de la península de Yucatán, plataforma formada por rocas solubles, principalmente calizas y dolomitas, que se configuraron con sedimentos calcáreos de especies marinas (Suárez-Morales y Rivera-Arriaga, 1988). Este territorio presenta una compleja estructura hidrogeológica asociada a los procesos kársticos que dieron origen a sistemas de cuevas subacuáticas, consideradas entre las más grandes del planeta: Sac Actún y Ox Bel Ha. La primera con aproximadamente 228 cenotes localizados y la segunda con cerca de 152 (Monroy-Ríos, 2019; QRSS, 2022). La ciudad de Tulum se ubica entre estos dos sistemas de ríos subterráneos. En correlación al patrón de distribución de estos sistemas de ríos subterráneos, cuevas y cenotes, se encuentra una serie de fallas y fracturas (Figura 1).

Diseño metodológico

La investigación parte de un diseño metodológico descriptivo y exploratorio, dividido en tres fases (Figura 2).

Fase 1). Consulta de literatura y bases de datos. Se rastreó literatura en buscadores especializados, así como en sitios web y páginas de sitio. Se solicitó a la Dirección General de Desarrollo Urbano Sustentable Municipal registros y bases de datos de cenotes, al igual que a la Asociación

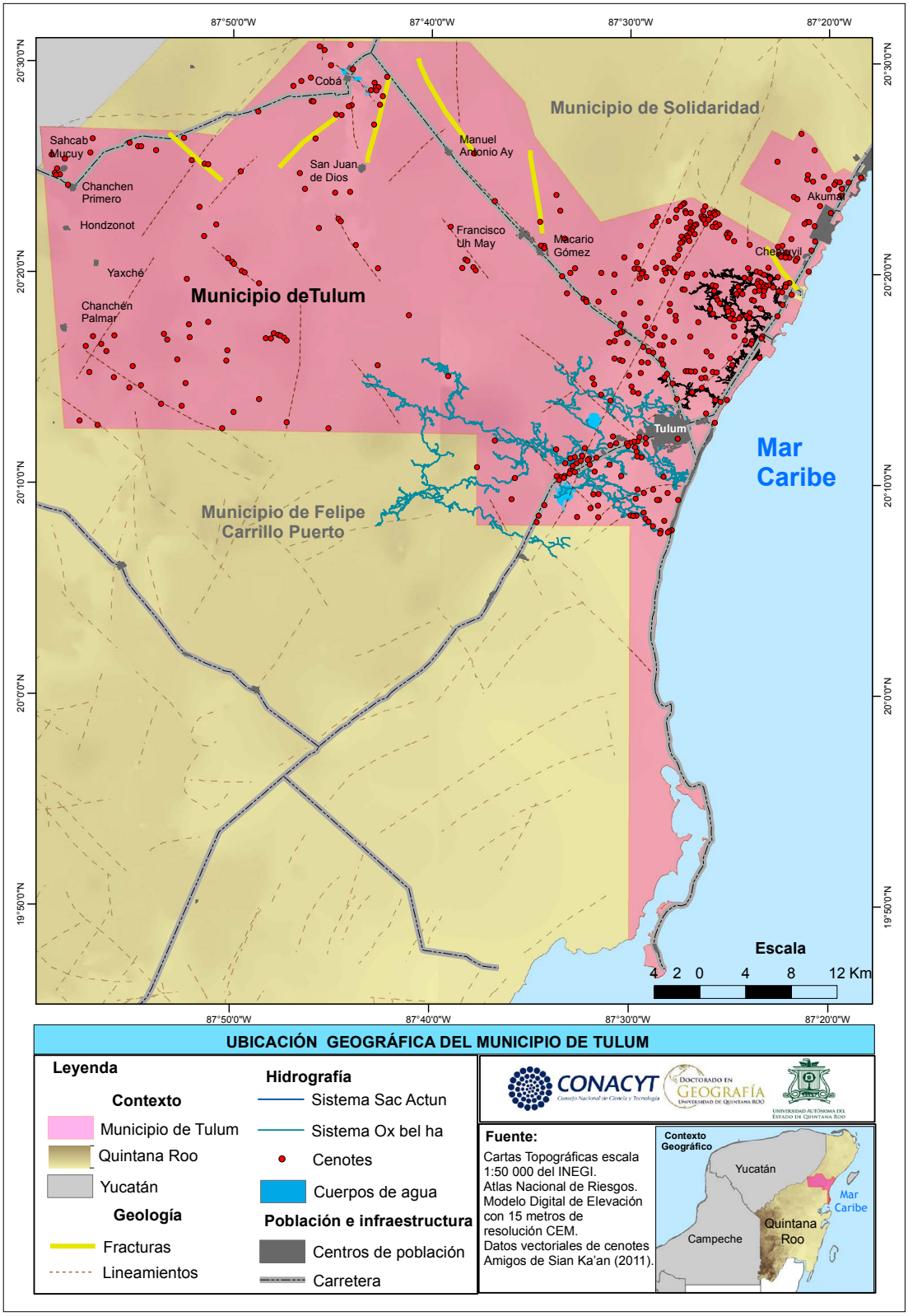


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del municipio de Tulum. Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de las cartas topográficas escala 1:50 000; Atlas Nacional de Riesgo, Modelo de Elevación Digital con 15 metros de resolución del INEGI y datos vectoriales de cenotes Amigos de *Sian Ka'an* (2011).

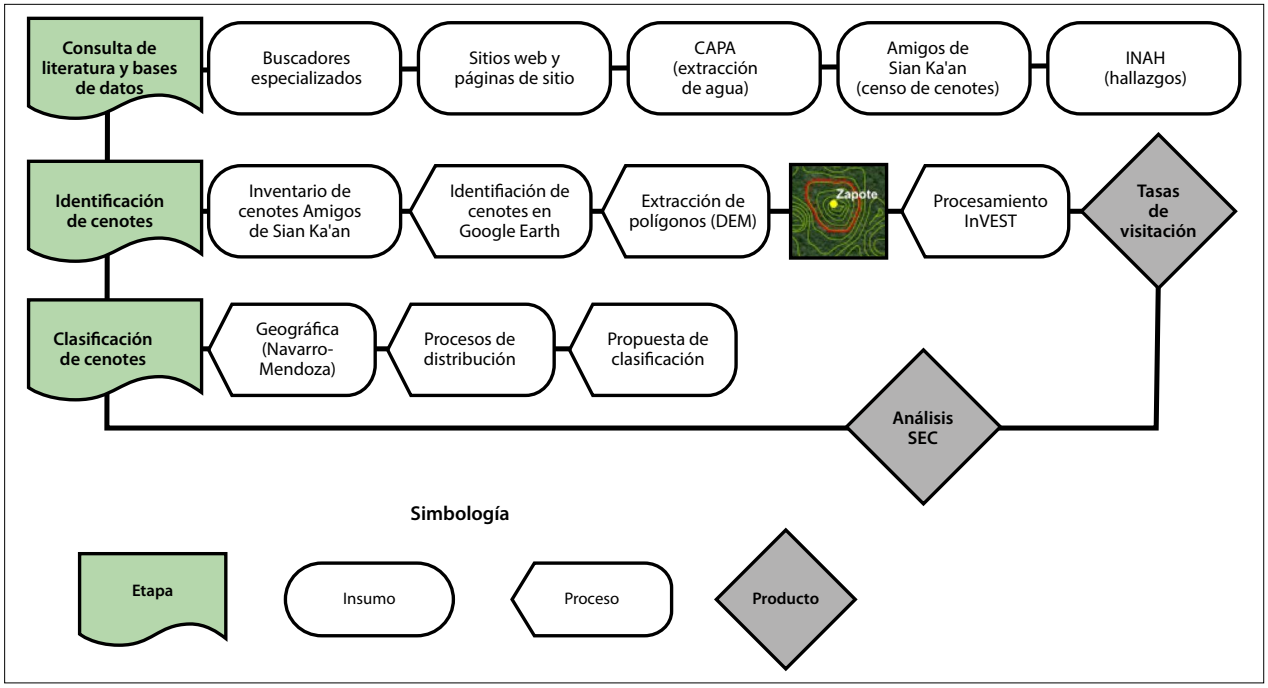


Figura 2. Diagrama metodológico.

Civil Amigos de *Sian Ka'an*. Al Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) sobre vestigios arqueológicos y antropológicos descubiertos en cenotes y cuevas; a la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo (CAPA) la ubicación de los cenotes que son aprovechados para la extracción de agua. Las solicitudes al INAH y CAPA se llevaron a cabo a través de la Plataforma Nacional de Transparencia. Por cuestiones de seguridad nacional, no fue posible obtener la ubicación de los cenotes utilizados para la extracción de agua, sin embargo, en trabajo de campo se identificó un cenote en Chemuyil que abastece agua a la comunidad de Akumal y al resort Bahía Príncipe. En la visita a la Dirección General de Desarrollo Urbano Sustentable se constató que no hay un inventario de cenotes, pese a su importancia señalada en el Reglamento de Cenotes y Cavernas del Municipio de Tulum. Algunos datos se obtuvieron a través de la observación y entrevistas no estructuradas durante las visitas a algunos cenotes en trabajo de campo durante 2023.

Fase 2). Identificación de cenotes con mayor número de visitación. Se utilizó la herramienta InVEST 3.13.0 (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) de Natural Capital Project, específicamente su modelo de recreación. Esta herramienta crea insumos para desarrollar cartografía, utilizados para conocer el manejo recreativo del ecosistema analizado.

Este instrumento genera tasas de visitación a partir de fotografías georreferenciadas del sitio web Flickr, es decir, el número de visitas en cenotes a partir de imágenes georreferenciadas y compartidas en el sitio, lo que mejora la falta de datos empíricos (no todos los cenotes llevan registro de las visitas) y disminuye los costos de visitar cada uno de los cenotes con actividades turísticas. El modelo permite promediar el número de fotografías/usuario/días por mes y año.

La base de datos vectoriales, utilizados para mostrar la distribución de cenotes, fue proporcionada por la asociación civil Amigos de *Sian Ka'an* (2011) en formato .shp, estos a su vez se identificaron en Google Earth (reconociendo los turísticos principalmente). Puesto que la herramienta InVEST trabaja con archivos vectoriales de tipo polígono, se creó un nuevo archivo sobreponiendo la capa de cenotes (tipo puntos) en la capa depresiones kársticas (tipo polígono) identificadas a través de curvas

de nivel de un metro de equidistancia y extraídas de un modelo digital de elevación de imágenes (DEM) Alos Palsar con 12.5 m de resolución. Como polígonos, insumos para InVEST, se utilizaron las escarpas de las depresiones kársticas que coincidían con los cenotes en forma de puntos.

Fase 3). Clasificación de cenotes. A partir del objeto vectorial espacial tipo punto (cenotes) se realizó la clasificación propuesta por Navarro-Mendoza (1988), descrita en la introducción, ya que explica la espacialidad de los cenotes, desde el punto de vista geográfico (costeros e internos). También se realizó la clasificación de acuerdo con los procesos de disolución (abiertos, cerrados y semiabiertos). Sin embargo, estas clasificaciones no fueron suficientes para el análisis de los servicios ecosistémicos culturales. Por lo tanto, partiendo de las características encontradas de localización, infraestructura y accesibilidad, se propuso una nueva clasificación en la que interviene el factor humano:

- Cenotes prístinos: se encuentran alejados de centros de población y servicios públicos/privados. Algunos de ellos no han sido identificados por encontrarse dentro de la espesa vegetación, carecen del mínimo adecuamiento de infraestructura, son inaccesibles o de difícil acceso. En algunos casos, los cenotes son de poco interés para el turismo, pero proveen otros beneficios ambientales, culturales y económicos.
- Cenotes no prístinos: aquellos ampliamente conocidos, gestionados de manera privada, pública o colectiva (por los ejidos), son muy accesibles, se encuentran dentro de los principales centros de población o cercanos a ellos, así como a las principales vías de comunicación. Estos también se caracterizan por diferentes niveles de desarrollo en la infraestructura, su organización en torno a actividades turísticas y su belleza paisajística. Todos han sido bautizados con un nombre relacionado a su ubicación o alguna otra característica específica.

Para la elaboración de los mapas, se utilizaron, además de la capa de cenotes, áreas geoestadísticas básicas (AGEB), infraestructura (carreteras), división política nacional y estatal, cuerpos de agua de INEGI, así como datos vectoriales de agentes perturbadores geológicos del Atlas Nacional de Riesgo y sistemas de cuevas subterráneas de Quintana Roo Speleological Survey. La cartografía se diseñó en los programas de Sistemas de Información Geográfica (GIS) ArcMap 10.8 y QGIS3, con lo que fue posible realizar un análisis espacial de los servicios ecosistémicos culturales.

RESULTADOS

Por medio del procesamiento de los insumos cartográficos se identificó que los cenotes abiertos al público (no prístinos), se distribuyen principalmente en la zona turística a lo largo de la costa (cenotes costeros, de acuerdo con Navarro-Mendoza, 1988), sobre todo en la parte norte de la ciudad. El área donde se distribuyen corresponde a las zonas circundantes a la cabecera municipal, centros de población y aquellas en las que se extienden nuevos proyectos inmobiliarios (Figuras 3 y 4). En algunos de ellos se presenta el fenómeno de la haloclina, que consiste en una capa de separación entre agua dulce y salada por diferencia de densidad (Cenote Tours, 2022; Schmitter-Soto, Escobar-Briones *et al.*, 2002).

Por su parte, los cenotes prístinos (Figuras 3 y 5), sin infraestructura, poco conocidos o sin interés turístico se localizan en la parte oeste y noreste del municipio, cerca de la carretera 307 y Chemuyil, en zonas con poca o nula población y en línea a fracturas y lineamientos, principalmente en la fractura que atraviesa el municipio de norte a sur (Figura 3).

Los cenotes internos pueden contener agua dulce y salada, y se encuentran enclavados en la espesa vegetación. Se caracterizan por una mayor dispersión y en su mayoría son prístinos, por ende, tienden a estar mejor conservados y proveer un mayor número de servicios ecosistémicos de regulación, provisión y soporte, mientras que los servicios culturales son casi nulos.

Con el modelo de turismo y recreación de InVEST, utilizado en esta investigación, se crearon

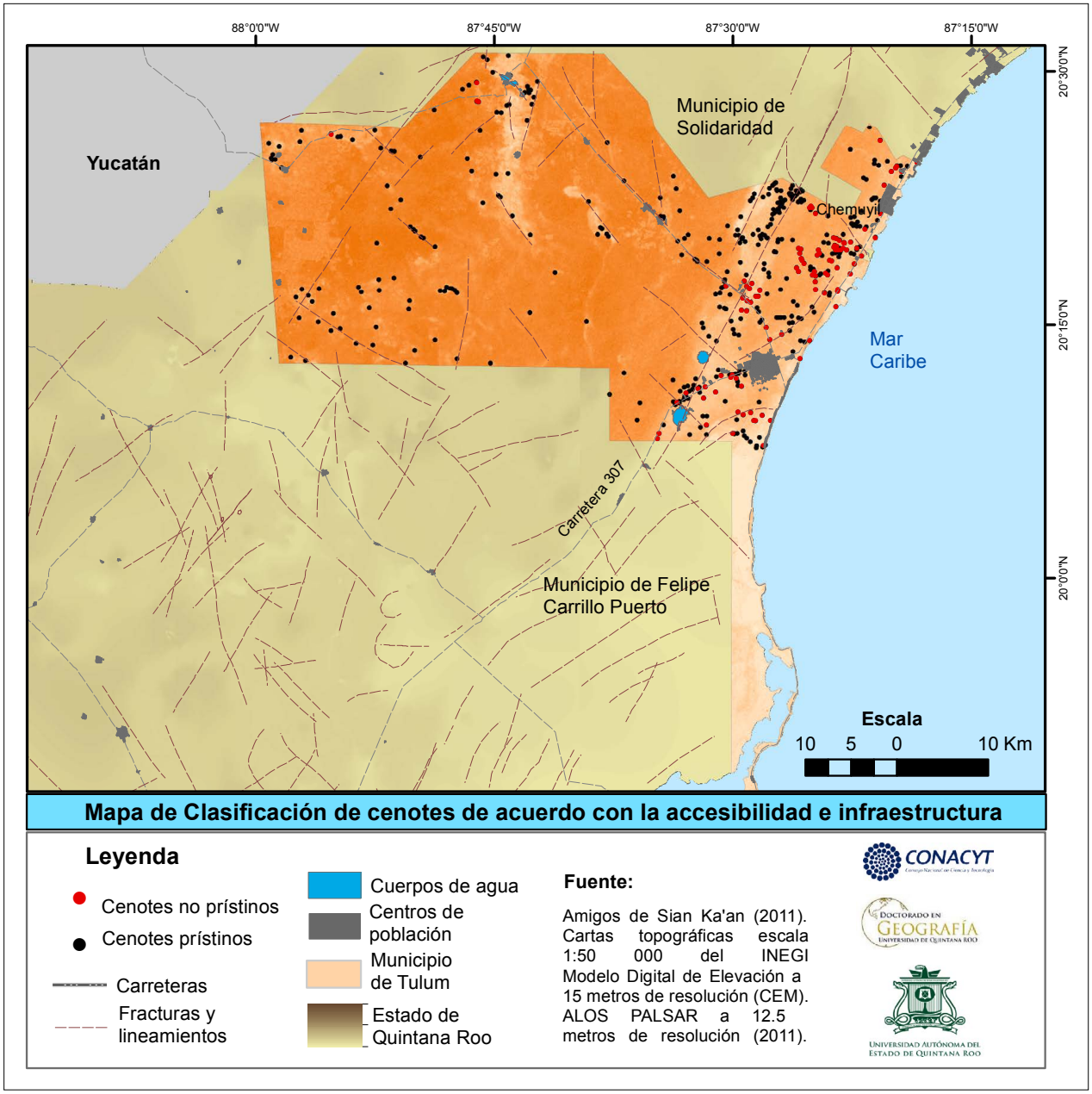


Figura 3. Mapa de clasificación de cenotes de acuerdo con la accesibilidad e infraestructura. Fuente: elaboración propia con datos de Amigos de Sian Ka'an (2011), cartas topográficas escala 1:50 000 del INEGI, Modelo Digital de Elevación del CEM a 15 metros de resolución y Alos Palsar a 12.5 metros de resolución (2011).

rangos de promedio de visitación, esto permitió prestar mayor atención a algunos cenotes (Figura 6).

Se identificaron seis cenotes con las mayores tasas de visitación (Tabla 1): el rango de mayor visitación pertenece a Casa Cenote o Cenote Manatí, posiblemente por su cercanía a playas y la desembocadura de sus aguas al mar Caribe. Le sigue Gran Cenote, popular por sus dimensiones y conexión con cuevas y cavernas; cenote Calavera conocido por su peculiar forma y los cursos de acreditación de buceo que se ofrecen en el sitio; Dos ojos, un sistema de dos cenotes y una cueva; cenotes *Yal Kú* en la caleta de Akumal y cenote *Carwash,* utilizado anteriormente como lavadero de coches.

Figura 4. Foto de cenotes no prístinos con uso recreativo. a) cenote Escondido y, b) cenote Casa Tortuga. Fuente: los autores.

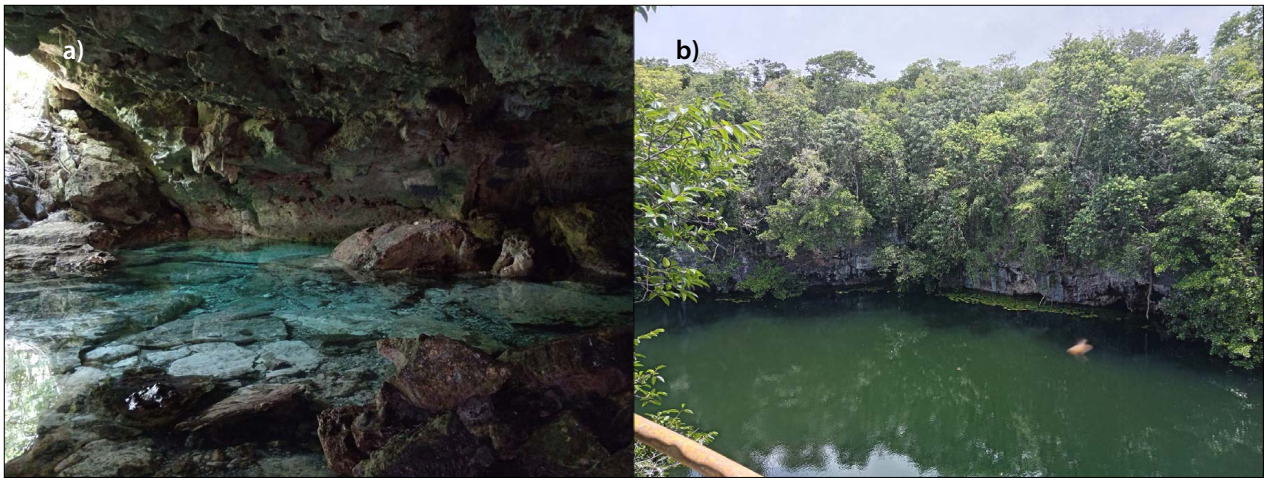


Figura 5. Fotos de cenotes prístinos ubicados en Chemuyil: a) cenote murciélago y b) cenote abastecimiento de agua potable de CAPA. Fuente: los autores.

Los cenotes *Taak Bi Ha*, *Batcave* (cuevas), Escondido, *Mutul-Ha*, *Choo Ha* (cuevas), *Tanka*, Cristal, *Xunaan ha*, el *Pit*, *Nic Te Ha*, *Tak Be Ha* y *Nohoch Na Chich* y Cristal también tienen visitas significativas de acuerdo con InVEST; estos cenotes no prístinos son atractivos a los visitantes por su particular belleza, la cercanía con los centros de población, dotación de infraestructura y accesibilidad.

Los cenotes con mayores índices de visitación se encuentran fácilmente en páginas de internet y son de mayor promoción por tour operadores, guías y agencias de turismo, que realizan alianzas con sus administradores. Esta colaboración ha permitido un mayor número de turistas, empleos y beneficios de forma directa e indirecta, pero también un proceso de masificación que está provocando impactos negativos. Algunas de las prácticas insostenibles observadas en estos cenotes fue la concentración masiva de visitantes en distintos horarios, incorporación de flora exótica, grandes modificaciones en la infraestructura natural y distintos tipos de basura. Los cenotes con mayor número de visitas no cuentan con estudios de capacidad de carga y han presentado algunos problemas derivados de la masificación turística, entre ellos, la presencia de la bacteria *Escherichia coli* registrada en 2022 por la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris) durante los estudios de calidad de agua en los cenotes Calavera, Casa Cenote y cenote Cristal. Otro impacto derivado de las altas tasas de visitación es la disminución de

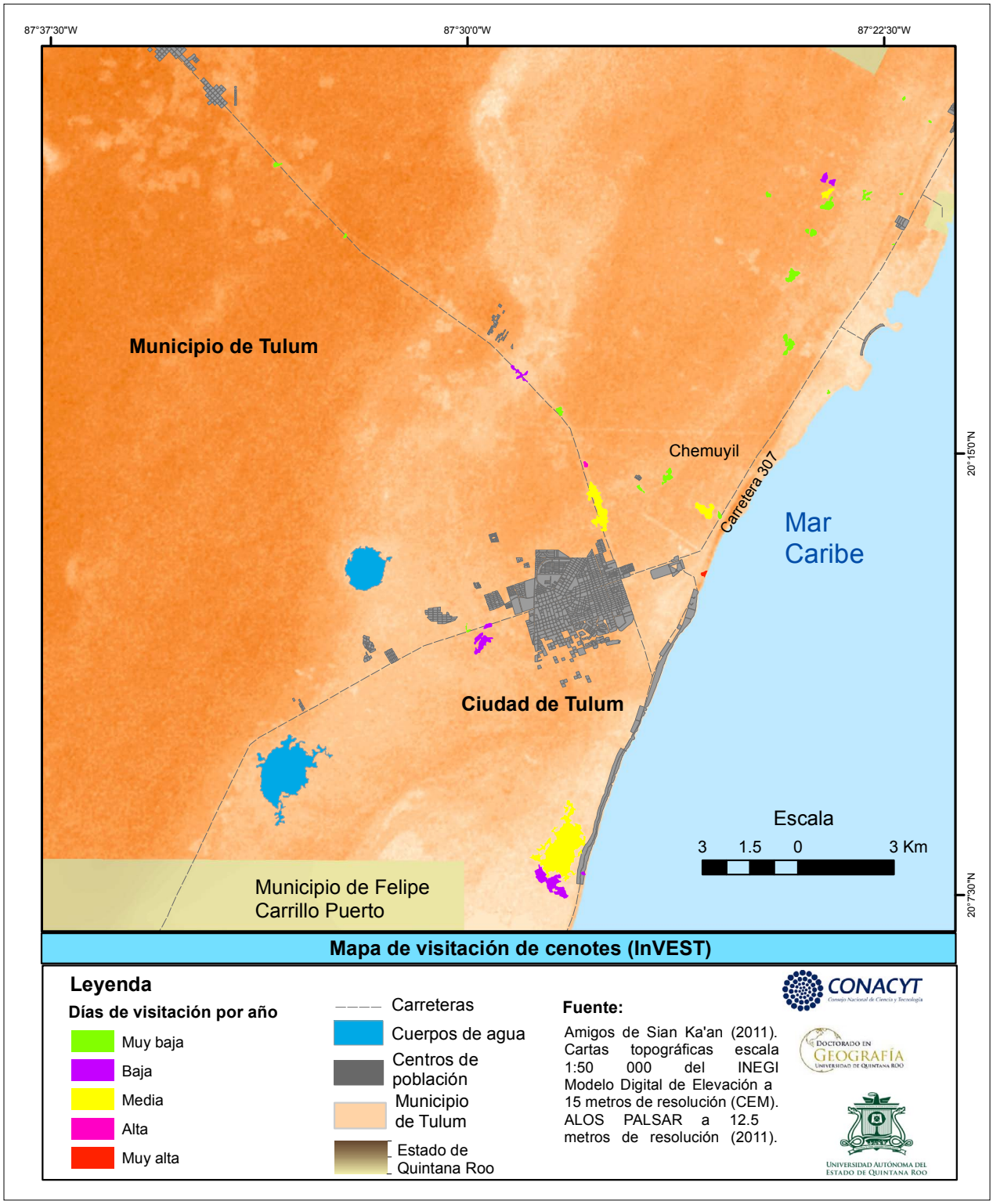


Figura 6. Mapa de visitación de cenotes (InVEST). Fuente: elaboración propia con datos de Amigos de *Sian Ka'an* (2011), Cartas topográficas escala 1:50 000 del INEGI, Modelo Digital de Elevación del CEM a 15 metros de resolución y Alos Palsar a 12.5 metros de resolución (2011).

Tabla 1. Cenotes con mayores días de visitación.

Nombre	Características físicas	Tipo	Ubicación	Nivel de visitación	Especies representativas	Infraestructura turística	Servicios turísticos	Tipo de propiedad
Casa Cenote o Cenote Manatí (Por los manatíes)	Abierto Costero Cuevas subterráneas Haloclina	No prístino	Zona residencial de Tankah	Muy alta	Manglares Manatíes Cocodrilos	Regaderas Camastros Casilleros Baños Restaurante Señalética	Buceo, Paddleboard Esnórquel Observación de flora y fauna Renta de equipo para actividades acuáticas Alimentos y bebidas	Administración privada
Gran Cenote (Por su tamaño)	Semiabierto, Interno Forma parte del sistema Sac Actun	No prístino	Carretera Tulum-Cobá	Alta	Vegetación selvática Tortugas	Estacionamiento Plataformas, Barandales, Escaleras, Casilleros, Vestidores Restaurante	Nado libre Buceo Nado con tortugas Renta de equipo para realizar actividades recreativas Guías Alimentos y bebidas	Propiedad privada
Calavera o Temple of doom (Por la forma que se aprecia desde las alturas)	Joven, Semiabierto Interno	No prístino	Carretera Tulum-Coba	Media	Vegetación selvática	Escaleras Barandales Baños Estacionamiento Camastros	Buceo especializado Cursos de acreditación Renta de equipo para actividades acuáticas	Administración privada
Dos ojos	Sistema de dos cenotes y una cueva Formación de espeleotemas Emplazamiento de fósiles Forma parte del sistema Sac Actun Interconexión con otros cenotes	No prístino	Carreteara federal 307	Media	Vegetación selvática Murciélagos	Casilleros, Restaurantes Tiendas de recuerdos, Zonas de descanso, Estacionamiento Regaderas Restaurante Vestidores Escaleras Barandales	Renta de equipo de buceo y Bicicletas Buceo (diferentes niveles), Snorkel, Tirolesa, Visitas al Museo de la Prehistoria Senderismo Guía	Pertenece al parque Dos Ojos (alberga al cenote Jaguar, El Pit, Monos, Misterio Maya y Nicté-Ha), un proyecto del Ejido Jacinto Pat
Yal Kú (Laguna Yal-Kú o Caleta Yal-Kú)	Costero conexión subterránea al mar a través de cuevas	No prístino	Akumal	Baja	Manglares Peces Reptiles Aves	Casilleros Barandales Escaleras Puentes Baños Regaderas Renta de equipo Restaurante Cabañas Hamacas Sillas	Snorkel	Propiedad privada (Parque)
Carwash (Aktun Ha)	Cenote abierto De interior Pertenece al sistema Sac Atún Cuevas subterráneas	No prístino	Carretera Tulum- Coba.	Baja	Vegetación submarina Tortugas Peces Lagartos	Infraestructura incluyente Estacionamiento Mesas Plataforma de saltos Casilleros Baños Vestidores Senderos	Snorkel Buceo Observación flora y fauna	

avistamiento de manatíes en cenote Manatí (Casa Cenote), a los cuales debe su nombre.

Algunos de los cenotes cercanos a la costa y conectados a cuevas presentan el fenómeno de la haloclina al igual que singulares paisajes subterráneos, los cuales son ideales para realizar buceo (de investigación y deporte extremo), actividad ampliamente desarrollada en el municipio. Los de gran belleza escénica, infraestructura turística y accesibilidad son usados en la práctica de actividades que no requieren profesionalización y son los más visitados. Una minoría se utiliza como abrevadero (lugar destinado para la cría y alimentación de ganado), se encuentran dentro de la clasificación de cenotes no prístinos, carecen de infraestructura y se localizan cercanos a potreros o dentro de ellos. Por otra parte, también hay cenotes que se ubican en polígonos pertenecientes a áreas naturales protegidas, por su importancia ambiental, como los tres que se encuentran en el Área Natural Protegida Xcacel-Xcacelito, en ellos la gestión permite un mayor cuidado y control en el número de visitantes (Figura 7).

Además del turismo, otros de los servicios ecosistémicos culturales provistos por los cenotes, se relacionan con la ciencia, la exploración, el legado y la identidad cultural. En los cenotes y cuevas se han encontrado restos arqueológicos y paleontológicos útiles a investigadores y científicos para reconstruir parte de la historia, dar respuestas a diversas interrogantes y crear modelos futuros. El buceo especializado y con fines científico-educativos se realiza principalmente en cenotes prístinos, cercanos a vías de comunicación, señalados en la Figura 7: El Pet Cementery, El Pit Cuevas, Abejas, Angelita, Carwash, Manatí, Dos pisos y El Koi. En algunos también se han identificado vestigios arqueopaleontológicos, conexiones con cavernas, importantes nichos ecológicos y el fenómeno de la haloclina, al mismo tiempo, estos cuerpos de agua generan percepción de identidad dentro de los pueblos mayas, forman parte de su cosmovisión y su relación con el medio ambiente. Las cuevas sumergidas de Tulum son ricas en evidencia fósil y prehistórica (Rojas-Sandoval, 2021), tal como lo evidencia la Tabla 2 y la Figura 8.

Tabla 2. Hallazgos arqueo-paleontológicos encontrados en cenotes pertenecientes al municipio de Tulum, Quintana Roo

Cenote	Sistema de cuevas	Subsistema	Tipo de hallazgo	Hallazgo
Las Palmas	Ox Bel Ha	Mukal	Arqueológico	La señora de las Palmas, el abuelo de Muknal, madera quemada
Naharon o Cristal	Ox Bel Ha	Naranjal	Arqueológico	Esqueleto de Eva/mujer de Naharon
El Templo	Templo		Arqueológico	El hombre del templo o el extraviado
Las Calaveras			Arqueológico	122 cráneos humanos de la época prehispánica
Aktun-Ha			Arqueológica	Madera quemada
El Pit (Jacinto Pat)	Sac Aktun	Dos Ojos	Arqueo-paleontológico	Una nueva especie de felino
Cenote Chanhol	Ton Há		Arqueológico	Tres esqueletos humanos, entre ellos Ixchel
La chimenea			paleontológico	
Hoyo negro	Sac Aktun	Aktun Hu	Arqueo-paleontológico	Esqueleto de Nahia, sinsacro de un perezoso gigante de Tierra, tigre dientes de sable, gonfoterio, osos, armadillos, tapires

Fuente: elaboración propia con datos de González-González *et al.* (2008); González-González *et al.* (2014); INAH (2020); Rojas-Sandoval y González (2006).

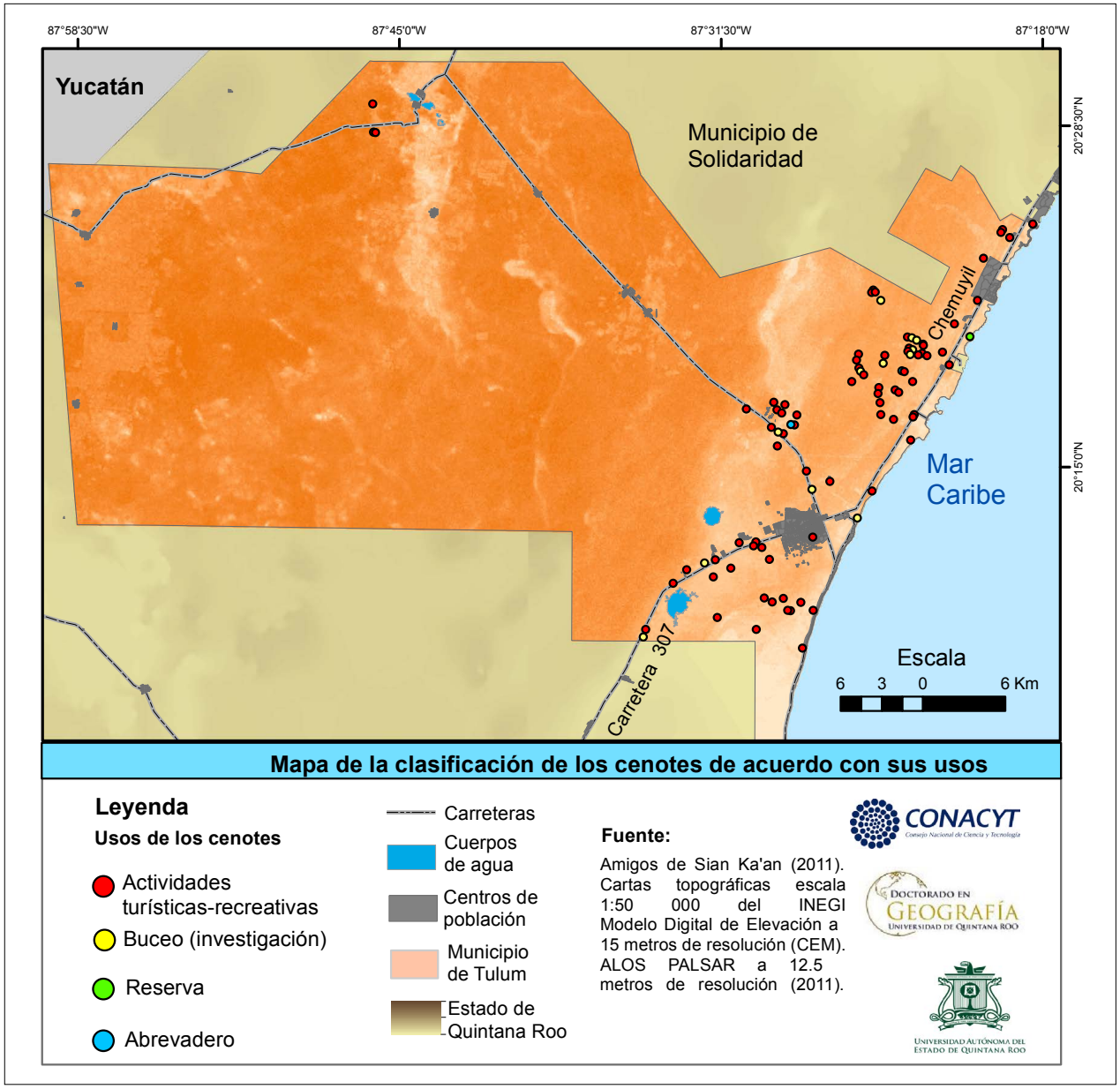


Figura 7. Mapa de la clasificación de los cenotes de acuerdo con sus usos. Fuente: elaboración propia Amigos de Sian Ka'an (2011), Cartas topográficas escala 1:50 000 del INEGI, Modelo Digital de Elevación del CEM a 15 metros de resolución y Alos Palsar a 12.5 metros de resolución (2011).

En toda la península de Yucatán se han identificado restos históricos de la cultura maya, sin embargo, en el cenote Calaveras de Tulum, se ha hecho el mayor descubrimiento de restos humanos prehispánicos y en buen estado de conservación. En otros cenotes y cuevas se han descubierto restos humanos (pertenecientes a diez individuos) de la Era de Hielo, que ponen en duda teorías sobre los primeros pobladores del continente y abren la posibilidad a nuevas explicaciones sobre el origen del hombre americano. También se han encontrado restos de megafauna, algunos extintos, especies de las cuales no se conocía su existencia y otras que se han adaptado. Estos restos permiten tener conocimiento del paleoclima de la región y los ecosistemas prehistóricos. Algunos cenotes y cuevas han sido

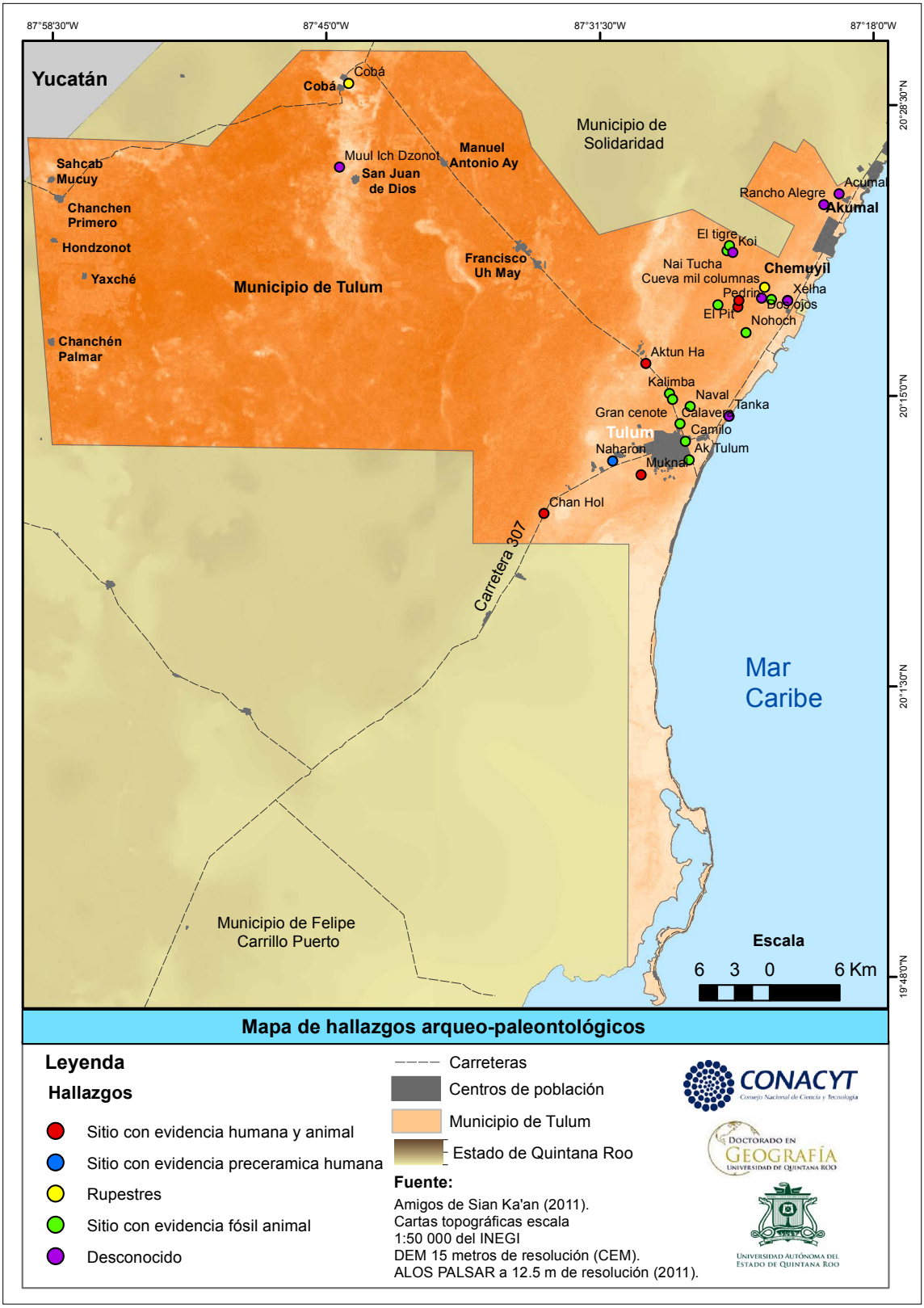


Figura 8. Mapa de hallazgos arqueo-paleontológicos. Fuente: Martos-López (2007) y datos obtenidos del INAH por medio de la Plataforma Nacional de Transparencia.

saqueados por el valor que representan para algunos coleccionistas.

En la Figura 8 se observa que la mayoría de los cenotes en los cuales se ha encontrado algún tipo de hallazgo arqueológico, corresponden a cenotes cercanos a la costa y no prístinos, y la mayoría de los cenotes con evidencia fósil animal se ubican muy cerca de la ciudad con dirección a Cobá. La accesibilidad ha permitido un mayor conocimiento sobre los cenotes y sistemas de cuevas que se distribuyen cerca de la costa.

DISCUSIÓN

Actualmente, los cenotes tienen una gran relevancia para el desarrollo económico, cultural y social de la península de Yucatán. En la zona conocida como el anillo de cenotes, en el estado de Yucatán, los servicios ecosistémicos culturales basados en la naturaleza, el paisaje y valores espirituales han beneficiado a las comunidades con ingresos, empleos, especialización del trabajo, revalorización de la identidad y mejoras en la infraestructura (López-Monsalvo (2017). En el caso específico del área de estudio de esta investigación, resaltan dos servicios ecosistémicos culturales, los cuales han propiciado un cambio en la dinámica del territorio e incentivado el desarrollo de todo un segmento turístico.

En primer lugar, el SEC turismo y recreación de cenotes se ha vuelto cada vez más importante dentro de la oferta turística de la región, especialmente después de la pandemia del COVID-19, dándole a la península de Yucatán un sello único incluso a nivel internacional. El número de visitas está relacionado con la dotación de infraestructura, la accesibilidad y las peculiaridades escénicas de cada cenote, por lo que la mayor visitación se observa en aquellos cercanos a la ciudad, servicios básicos y turísticos. En Tulum, el uso recreativo se extiende a otros ejidos y comunidades casi a la par de la expansión urbana. En años recientes, las playas del Caribe se han inundado de sargazo, lo que ha impactado en la imagen paradisiaca proyectada. El malestar de los visitantes por este fenómeno ha aumentado las visitas a diferentes cenotes que poseen características propias y que se han resaltado mediante la promoción de paquetes y rutas con visitas guiadas. Alrededor del turismo de cenotes se ha formado toda una industria con beneficios económicos palpables a través de los costos de entrada, la renta de equipo para actividades de buceo, snorkel y otras actividades acuáticas, renta de bicicletas, motos y coches, renta de casilleros, venta de trajes de baño y bloqueadores *ecofriendly*, tiendas de artesanías, creación de hoteles cercanos o dentro de las instalaciones, venta de alimentos, renta de estacionamiento, servicio de guías, creación de parques temáticos, actividades de turismo de aventura y ecoturismo, tour operadores, cursos, capacitaciones y certificaciones; con beneficios para locales, ejidatarios, nacionales y extranjeros. Toda esta dinámica vinculada a los servicios ha provocado un fuerte movimiento inmigratorio con crecimiento exponencial en el número de habitantes y, por ende, la expansión urbana descontrolada, el desarrollo de la industria inmobiliaria, de la construcción y la comercialización, así como la especulación y privatización del suelo urbano.

En segundo lugar, el SEC investigación y educación de cenotes se encuentra relacionado con los hallazgos arqueopaleontológicos de las últimas décadas en cuevas y cenotes de Tulum y el descubrimiento de laberintos y sistemas complejos de ríos subterráneos. Esto ha provocado el desplazamiento de investigadores de todas partes del mundo y de académicos e investigadores nacionales y locales, entre ellos geólogos, geógrafos, espeleólogos, espeleólogos acuáticos, antropólogos y biólogos. Los cenotes y cuevas desde esta perspectiva han funcionado como una capsula del tiempo que ha comenzado a abrirse y un laboratorio disponible para todas las ciencias, que favorece el desarrollo del conocimiento científico.

Una actividad con un alto nivel de desarrollo en el municipio de Tulum, y que se relaciona tanto con el turismo y la investigación, es el buceo especializado. Incluso se han abierto tiendas con renta de equipo que incluyen entradas a cenotes, pertenecientes en su mayoría a extranjeros. También se ofrecen cursos y certificaciones para diferentes niveles de buceo (cenote Calavera es uno de los cenotes donde se realizan prácticas) y se crean

alianzas para la promoción de la actividad como un producto más.

Los servicios ecosistémicos culturales y las diferentes actividades realizadas en los cenotes y, en consecuencia, a sus alrededores, también tienen impactos negativos como el uso intensivo de los cenotes (Suárez-Morales y Rivera-Arriaga, 1988), contaminación de cuerpos de agua (Duhart, 2022; Organización Editorial Mexicana, 2022), degradación en la calidad del agua (Leal-Bautista *et al.*, 2013), saqueo de piezas prehispánicas y arqueológicas, desplazamiento e introducción de especies, disputas e incertidumbre respecto a la tenencia de la tierra, derivados principalmente de la falta de estudios de capacidad de carga (Arroyo Arcos *et al.*, 2019), la mala gestión, los vacíos legales, la modificación de los espacios naturales para la construcción de megaproyectos (Marín-Marín *et al.*, 2020), la vulnerabilidad intrínseca de los ecosistemas de cuevas y cenotes, la poca coordinación entre organismos involucrados, la desinformación y la falta de educación sobre el funcionamiento sistémico de los ecosistemas, el débil proceso de gobernanza, la diferencia de interés sobre los servicios ecosistémicos y el uso insostenible de los cenotes, así como la desigualdad en las figuras de la tenencia de la tierra y los gestores de los cenotes.

Aunque el agua es un bien inalienable, sus contenedores, los cenotes, sí lo son, mediante la comercialización de los terrenos donde se encuentran (Cortés-Campos, 2018), por ello los cenotes pueden pertenecer a privados y colectivos, tener mínimas restricciones y sus propios reglamentos internos.

La masificación turística de estos espacios, además de ejercer presión sobre el medio ambiente, también lo hace en las experiencias de visitantes y locales (Mondragón-Mejía *et al.*, 2019). Parte de la masificación se debe a los grupos guiados que llegan de otras áreas turísticas cercanas a Tulum. Los cenotes han pasado de ser un espacio sagrado a un producto de la mercantilización, incluso los gestionados por ejidos.

En las zonas turísticas con alta diversidad ecológica existe una estrecha relación entre los servicios ecosistémicos y el turismo, ya que los primeros desempeñan un rol importante para el desarrollo del turismo especialmente en zonas rurales, además de ser indispensables para el desarrollo y la continuidad humana (J. Wang *et al.*, 2023; SEMARNAT, 2021). En los entornos urbanos los servicios ecosistémicos también son de suma importancia para el desarrollo, sin embargo, es evidente la falta de investigaciones que profundicen en las relaciones entre lo urbano, los servicios ecosistémicos y el desarrollo del turismo (Muyibul *et al.*, 2023).

Aunque Tulum es uno de los pocos municipios con reglamento para el manejo de cenotes, cuevas y caverna (Reglamento de cenotes y cavernas del municipio de Tulum), existen vacíos legales, derivados principalmente de la falta de información y conocimiento, así como la ineficiente gestión. Aun cuando se sabe de la vulnerabilidad del sistema kárstico, continúan como prioridad las obras que generen mayor derrama económica. Los responsables de la administración pública se han inclinado a crear productos competitivos, capaces de captar mercados turísticos internacionales (Toledo *et al.*, 2008), sin pensar en el costo-beneficio de sus acciones. Es necesario entender la compleja relación hombre-naturaleza, no solo la importancia de los ecosistemas y sus beneficios para el desarrollo y la continuidad humana (SEMARNAT, 2021), sino también los impactos negativos derivados de su uso.

CONCLUSIONES

El turismo y la recreación dependen de ecosistemas saludables, al mismo tiempo esta actividad incentiva el desarrollo de las comunidades locales, siempre y cuando se realice bajo esquemas de responsabilidad y conocimiento, ya que, de otra manera, se transforma en un riesgo para la provisión de otros servicios ecosistémicos tales como agua, alimento y hábitat para distintas especies, investigaciones y mantenimiento de la biodiversidad.

El abordaje de los servicios ecosistémicos constituye una herramienta de planificación/gestión del territorio para los tomadores de decisiones, así como una oportunidad social para modificar los patrones de consumo y transitar hacia un aprovechamiento responsable que garantice la provisión de los servicios. Los gobiernos han rebasado su ca-

pacidad para un crecimiento ordenado de la ciudad y el rápido aumento del turismo en el territorio, lo que se traduce en un área de oportunidad para crear mecanismos de gestión de cenotes y rescatar la idea inicial de Tulum como una alternativa turística, regular las actividades turísticas en los cenotes y aprovechar las tendencias *Holistic Wellnes* que caracterizan a Tulum. La espiritualidad y la salud mental son servicios ecosistémicos que apenas se observaron en algunos cenotes; sin embargo, Tulum vive una atmósfera de espacios exclusivos en armonía con la naturaleza, con santuarios de la hospitalidad, terapias de sanación, cocina gourmet, yoga, estilos *eco-chic* y espacios arquitectónicos rústicos. Este segmento está muy ligado a la búsqueda de la armonía interior, la conexión con la cultura y el cuidado del medio ambiente. También se observó que, por la belleza escénica de estos espacios, son ideales para cursos de modelaje y fotografía profesional.

Existe un área de oportunidad para nuevas investigaciones sobre servicios ecosistémicos de los cenotes, desde perspectivas sociales, económicas y físicas que complementen este trabajo mediante metodologías empleadas en el estudio de otros ecosistemas. Futuras investigaciones tendrán que enfrentarse a algunas limitaciones como: 1) la falta de insumos y capital intelectual; 2) la información dispersa, a veces contradictoria y confusa; 3) la accesibilidad a bases de datos sobre la caracterización o ubicación de los cenotes y finalmente, y 4) el acceso a cenotes enclavados en la selva.

REFERENCIAS

Arnaiz-Schmitz, C., Herrero-Jáuregui, C., y Schmitz, M. F. (2021). Recreational and Nature-Based Tourism as a Cultural Ecosystem Service. Assessment and Mapping in a Rural-Urban Gradient of Central Spain. *Land, 10*(4), 343. https://doi.org/10.3390/land10040343

Arroyo Arcos, L., Bolan Sorchini, S., y Hernández Aguilar, M. L. (2019). Potencial turístico del sistema de cenotes del municipio de Tulum, México. En O. Frausto Martínez (Ed.), *Conocimientos y saberes sobre el karst tropical de México* (pp. 177-196). https://www.researchgate.net/publication/335541363_Potencial_turistico_del_sistema_de_cenotes_del_municipio_de_Tulum_Mexico

Avendaño-Leadem, D., Cedeño-Montoya, B., y Arroyo-Zeledón, M. S. (2020). Integrando el concepto de servicios ecosistémicos en el ordenamiento territorial. *Revista Geográfica de América Central, 2*(65), 63-90. https://doi.org/10.15359/rgac.65-2.3

Ayuntamiento de Tulum 2021-2024, y Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. (2023). *Avances Atlas de Riesgos del Municipio de Tulum, Quintana Roo, 2023*. Ayuntamiento de Tulum, Quintana Roo 2021-2024.

Banarsyadhimi, U. R. A. M. F., Dargusch, P., y Kurniawan, F. (2022). Assessing the Impact of Marine Tourism and Protection on Cultural Ecosystem Services Using Integrated Approach: A Case Study of Gili Matra Islands. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(19), 12078. https://doi.org/10.3390/ijerph191912078

Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E., y Torres-Talamante, O. (2007). Los Cenotes de la Península de Yucatán. *Arqueología Mexicana, 83*, 32-35. https://arqueologiamexicana.mx/mexico-antiguo/los-cenotes-de-la-peninsula-de-yucatan

Braat, L. C., y de Groot, R. (2012). The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy. *Ecosystem Services, 1*(1), 4-15. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.011

Cenote Tours. (2022, mayo 12). ¿Qué es una haloclina? https://www.cenotetours.com/es/articulos/que-es-una-haloclina/

Cortés-Campos, I. (2018). Los cenotes en el mercado de tierras ejidales del oriente de Yucatán (2013-2016). *Península, XIII*(1), 181-202. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-57662018000100181&lng=es&tlng=es.

Costanza, R., de Groot, R., Braat, L., Kubiszewski, I., Fioramonti, L., Sutton, P., Farber, S., y Grasso, M. (2017). Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? En *Ecosystem Services* (Vol. 28, pp. 1-16). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008

Csurgó, B., y Smith, M. K. (2022). Cultural Heritage, Sense of Place and Tourism: An Analysis of Cultural Ecosystem Services in Rural Hungary. *Sustainability, 14*(12), 7305. https://doi.org/10.3390/su14127305

De Groot, R. S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., y Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity, 7*(3), 260-272. https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006

De Groot, R. S., Fisher, B., Christie, M., Aronson, J., Braat, L., Haines-Young, R. H., Gowdy, J. M., Maltby, E., Neuville, A., Polasky, S., Portela, R., y Ring, I. (2010). Chapter 1, Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation. En P. Kumar (Ed.), *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations* (Vol. Chapter 1, pp. 9-40). Ecological and Economic Foundations; Earthscan, Routledge. https://doi.org/10.4324/9781849775489

Duhart, M. (2022, agosto 25). Bejil-Há: una historia de éxito en Chemuyil tras la sombra de la destrucción. [Archivo de Vídeo]. https://www.youtube.com/watch?v=v2WbhUF0_RQ

FAO. (2023). *Servicios ecosistémicos y biodiversidad*. Organización de Las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura (FAO). https://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/

Fish, R., Church, A., Willis, C., Winter, M., Tratalos, J. A., Haines-Young, R., y Potschin, M. (2016). Making space for cultural ecosystem services: Insights from a study of the UK nature improvement initiative. *Ecosystem Services, 21*, 329-343. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.09.017

Flores, J. S., y Espejel, I. (1994). *Tipos de vegetación de la Península de Yucatán. Etnoflora Yucatanense* (J. S. Flores, Ed.). Universidad Autónoma de Yucatán.

Gabriel, J. J., Reinhardt, E. G., Peros, M. C., Davidson, D. E., van Hengstum, P. J., y Beddows, P. A. (2009). Palaeoenvironmental evolution of Cenote Aktun Ha (Carwash) on the Yucatan Peninsula, Mexico and its response to Holocene sea-level rise. *Journal of Paleolimnology, 42*(2), 199-213. https://doi.org/10.1007/s10933-008-9271-x

Gijón Yescas, N., Aguilar Duarte, Y., Frausto Martínez, O., y Bautista Zuñiga, F. (2021). Anatomía de un cenote con el uso de dron. Tropical and Subtropical *Agroecosystems, 24*(30). https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/3634

González González, A. H., Rojas Sandoval, C., Terrazas, A., Sanvicente, M. B., Stinnesbeck, W., Avilés, J., de Los Ríos-Paredes, M. M., y Acevez, E. (2008). The arrival of humans on the Yucatan Peninsula: Evidence from submerged caves in the state of Quintana Roo, Mexico. *Current Research in the Pleistocene, 25*, 1-24. https://www.researchgate.net/publication/310750546_The_arrival_of_humans_on_the-Yucatan_Peninsula_Evidence_from_submerged_caves_in_the_state_of_Quintana_Roo_Mexico

González González, A. H., Terrazas, A., Stinnesbeck, W., Benavente, M. E., Avilés, J., Rojas, C., Padilla, J. M., Velásquez, A., Acevez, E., y Frey, E. "Dino." (2014). The first human settlers on the Yucatan Peninsula: Evidence from drowned caves in the State of Quintana Roo (South Mexico). 323–337. https://www.researchgate.net/publication/290914765_The_first_human_settlers_on_the_Yucatan_Peninsula_Evidence_from_drowned_caves_in_the_State_of_Quintana_Roo_South_Mexico

Guan, M., y Xiong, C. (2022). The Net Spatio-Temporal Impact of the International Tourism Is-Land Strategy on the Ecosystem Service Value of Hainan Island: A Counterfactual Analysis. *Land, 11*(10), 1694. https://doi.org/10.3390/land11101694

Hall, F. G. (1936). *Physical and chemical survey of cenotes of Yucatan. The cenotes of Yucatán* (AS Pearse, AP Creaser, y FG Hall, Eds.). Carnegie Institute of Washington.

Hernández Aguilar, M. L. (2019). Riesgo de hundimientos y subsidencia kárstica en la zona maya de Quintana Roo. En O. Frausto (Ed.), *Conocimientos y saberes sobre el karst tropical de México*. http://seidcyt.coqcyt.gob.mx/images/pdf/capitulos_libros/pxcjr-12hGlGSQq6Fnr3PXesjeINgtmSBLkAHphEa.pdf

H. Ayuntamiento de Tulum. (2018). *Reglamento de cenotes y cavernas del municipio de Tulum*. Acta de cabildo del Ayuntamiento de Tulum. https://tulum.gob.mx/Transparenciaftp/2022/Secretaria%20Gral/I/1er%20TRIM/?C=M;O=A

Hu, C., Wang, Z., Li, J., Liu, H., y Sun, D. (2022). Quantifying the Temporal and Spatial Patterns of Ecosystem Services and Exploring the Spatial Differentiation of Driving Factors: A Case Study of Sichuan Basin, China. *Frontiers in Environmental Science, 10*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.927818

INAH. (2020, April 26). Proyecto Arqueológico de Cenotes y Cuevas de Quintana Roo. Cenote Aktun Ha, Tulum, Q. Roo. Cámara de los Ancestros (10,750 - 10,250 CalYrBP). Arqueología Subacuática México. https://arqsubmx.weebly.com/blog/cenote-aktun-ha

INEGI. (2020). *Inventario Nacional de Viviendas 2020*. Indicadores de población y vivienda por manzanas. https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/?app=inv

Infante Ramírez, K. D., y Arce Ibarra, A. M. (2015). Percepción local de los servicios ecológicos y de bienestar de la selva de la zona maya en Quintana Roo, México. *Investigaciones Geográficas, 86*. https://doi.org/10.14350/rig.36593

Leal-Bautista, R. Ma., Lenczewski, M., Morgan, C., Gahala, A., y McLain, J. E. (2013). Assessing Fecal Contamination in Groundwater from the Tulum Region, Quintana Roo, Mexico. *Journal of Environmental Protection, 4*(11), 1272-1279. https://doi.org/10.4236/jep.2013.411148

Llanes Salazar, R., y Rejón Márquez, K. (2022). Agua amenazada. Informe sobre la grave contaminación del Anillo de Cenotes en la Península de Yucatán

(México). https://www.dplf.org/sites/default/files/agua_amenazada_-_informe_contaminacion_anillo_de_cenotes_yucatan_mexico.pdf

López Monzalvo, M. L. (2017). *Los servicios ecosistémicos como estrategia para la valoración del agua subterránea de la Reserva Geohidrológica del Anillo de Cenotes, Yucatán*. Tesis de Maestría. CICY. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/428

Luo, X., Yang, J., Sun, W., y He, B. (2021). Suitability of human settlements in mountainous areas from the perspective of ventilation: A case study of the main urban area of Chongqing. *Journal of Cleaner Production, 310*, 127467. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127467

MacSwiney G., M. C., Vilchis L., P., Clarke, F. M., y Racey, P. A. (2007). The importance of cenotes in conserving bat assemblages in the Yucatan, Mexico. *Biological Conservation, 136*(4), 499-509. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.12.021

MAE, UICN, y GIZ. (2018). *Programa de Desarrollo de Capacidades sobre Adaptación basada en Ecosistemas Manabí sAbE para líderes comunitarios*. Módulo 1. Programa Regional "Estrategias de Adaptación al cambio climático basadas en Ecosistemas en Colombia y Ecuador" (MAE, UICN, & GIZ, Eds.; MAE, UICN y GIZ). https://www.ambiente.gob.ec/programa-regional-abe-ecuador/

Marín Marín, A. I., Zizumbo Villarreal, L., Palafox Muñoz, A., y Vargas Martínez, E. E. (2020). Conflictos ambientales del turismo: el caso del ejido José María Pino Suárez, Tulum, Quintana Roo. *Península, 15*(1). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-57662020000100105

Martos López, L. A. (2007). Los cenotes en la actualidad. Entre la veneración y la explotación. *Arqueología Mexicana, XIV*(83). https://arqueologiamexicana.mx/mexico-antiguo/los-cenotes-en-la-actualidad-entre-la-veneracion-y-la-explotacion

MEA. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis* (Millennium Ecosystem Assessment, Ed.). World Resources Institute. https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf

Meacham, M., Norström, A. V., Peterson, G. D., Andersson, E., Bennett, E. M., Biggs, R., Crouzat, E., Cord, A. F., Enfors, E., Felipe-Lucia, M. R., Fischer, J., Hamann, M., Hanspach, J., Hicks, C., Jacobs, S., Lavorel, S., Locatelli, B., Martín-López, B., Plieninger, T., y Queiroz, C. (2022). Advancing research on ecosystem service bundles for comparative assessments and synthesis. *Ecosystems and People, 18*(1), 99–111. https://doi.org/10.1080/26395916.2022.2032356

Méndez González, L. (2010). *Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR) – Versión 2009-2012. Sitio Ramsar Anillo de Cenotes*. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del Gobierno del Estado de Yucatán. Dirección de Conservación de la Biodiversidad. https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/MX2043RIS.pdf

Mondragón-Mejía, J. A., Enseñat-Soberanis, F., y Blanco-Gregory, R. (2019). La percepción de multitud como indicador de gestión sostenible de los cenotes de uso turístico en Yucatán, México. *PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural, 17*(6), 1143-1158. https://doi.org/10.25145/j.pasos.2019.17.079

Monroy Ríos, E. (2019, agosto 4). Por las rutas del "Tren Maya." Karst Geochemistry and Hydrogeology. https://sites.northwestern.edu/monroyrios/2019/08/04/rutas-01/

Monsalve Castro, L. M., Valencia Trujillo, F. L., Guzmán Lenis, A. R., Duque Chaves, C. M., Pérez Giraldo, D. A., Valderrama L., C. F., y Polanco Puerta, M. F. (2019). Servicio ecosistémico de abastecimiento: alimentos. En *Servicios ecosistémicos: Un enfoque introductorio con experiencias del occidente colombiano* (pp. 34-56). Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD. https://doi.org/10.22490/9789586516358.02

Muyibul, Z., Tan, X., Tuniyazi, J., y Du, R. (2023). Relationships between Tourism, Urbanization and Ecosystem Service Value in the Cities of Xinjiang in Northwest China. *Sustainability, 15*(5), 4190. https://doi.org/10.3390/su15054190

National Geographic Society, Kalanbio A. C., y Cenoteando-UNAM. (2021). *Biodiversidad en cenotes de la península de Yucatán. Naturalista*. https://www.biodiversidadencenotes.com/nosotros

Navarro-Mendoza, M. (1988). *Inventario íctico y estudios ecológicos preliminares de los cuerpos de agua continentales en la reserva de la biosfera de Sian Ka'an y áreas circunvecinas en Quintana Roo*. Centro de Investigaciones de Quintana Roo/Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología/United States Fish & Wildlife Service, Chetumal, México.

Organización Editorial Mexicana. (2022, mayo 27). Chemuyil, el hogar de los guardianes de los cenotes. [Archivo de Vídeo]. https://www.youtube.com/watch?v=qSwot46-CD0

Osaka, S., Bellamy, R., y Castree, N. (2021). Framing "nature-based" solutions to climate change. *WIREs Climate Change, 12*(5). https://doi.org/10.1002/wcc.729

Perevochtchikova, M., y Oggioni, J. (2014). Global and Mexican analytical review of the state of the art on ecosystem and environmental services: A geographi-

cal approach. *Investigaciones Geográficas, 85*, 47–65. https://doi.org/10.14350/rig.41239

Pohlman, J. W., y Brankovits, D. (2017). Water column physical and chemical properties of Cenote Bang, a component of the Ox Bel Ha cave network within the subterranean estuary coastal aquifer of the Yucatan Peninsula, from December 2013 to January 2016. U.S. Geological Survey Data Release. https://doi.org/10.5066/F7DJ5DJW

QRSS. (2022, septiembre 16). *Lista de Cuevas Inundadas por Longitud de Quintana Roo México*. Quintana Roo Speleological Survey. National Speleological Society (NSS). https://qrss.caves.org/qrlongesp.htm

Rojas Sandoval, C. (2021). Los primeros pobladores de Tulum. *Glifos, 27*, 6-11. https://revistas.inah.gob.mx/index.php/glifos/article/view/16884

Rojas-Sandoval, C., y González, A. (2006). *Atlas arqueológico subacuático para el registro, estudio y protección de los cenotes en la Península de Yucatán*. https://mydokument.com/atlas-arqueologico-subacuatico-para-el-registro-estudio-y-proteccion-de-los-cenotes-en-la-peninsula-de-yucatan.html

Ruíz-Cancino, G., Mejía-Ortiz, L. M., y Yáñez-Mendoza, G. (2019). La Biodiversidad oculta en los cenotes de la Isla de Cozumel. *Ciencia y Desarrollo*. https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=542

Schmitter-Soto, J. J., Comín, F. A., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Díaz-Arce, V., Marín, L. E., y Steinich, B. (2002). Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia, 467*(1/3), 215-228. https://doi.org/10.1023/A:1014923217206

Schmitter-Soto, J. J., Escobar-Briones, E., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elias-Gutierrez, M., y Marín, L. (2002). Los cenotes de la península de Yucatán. En G. de la Lanza-Espino y J. García-Calderón (Eds.), *Lagos y presas de México* (2nd ed.) (pp. 337-381). AGT. https://www.researchgate.net/publication/228984086_Los_cenotes_de_la_Peninsula_de_Yucatan

SEDUMA, SEMARNAT, y CONANP. (2011). *Saneamiento y manejo integral de cenotes (Sitio RAMSAR Anillo de Cenotes). Mecanismos de pago por servicios ambientales*. https://sds.yucatan.gob.mx/cenotes-grutas/proyecto-saneamiento-cenotes.php

SEMARNAT. (2021, marzo 11). Servicios ambientales o ecosistémicos, esenciales para la vida. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/servicios-ambientales-o-ecosistemicos-esenciales-para-la-vida?idiom=es

Shi, Y., Shi, D., Zhou, L., y Fang, R. (2020). Identification of ecosystem services supply and demand areas and simulation of ecosystem service flows in Shanghai. *Ecological Indicators, 115*, 106418. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106418

Suárez-Morales, E., y Rivera-Arriaga, E. (1988). Hidrología y fauna de los cenotes de la Península de Yucatán. *Revista de La Sociedad Mexicana de Historia Natural, 48*, 37-47. https://biblat.unam.mx/es/revista/revista-de-la-sociedad-mexicana-de-historia-natural/articulo/hidrologia-y-fauna-acuatica-de-los-cenotes-de-la-peninsula-de-yucatan

Toledo, V. M., Barrera-Bassols, N., García-Frapolli, E., y Alarcón-Chaires, P. (2008). Uso múltiple y biodiversidad entre los mayas yucatecos (México). *Interciencia, 33*(5), 345–352.http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S037818442008000500007&lng=es&tlng=es

Vernes, K., y Devos, F. (2022). Use of cenotes and the cave environment by mammals on the Yucatán Peninsula, Mexico. *Biotropica, 54*(4), 881-892. https://doi.org/10.1111/btp.13111

Wallace, K. J. (2007). Classification of ecosystem services: Problems and solutions. *Biological Conservation, 139*(3-4), 235–246. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.07.015

Wang, B., Hu, C., y Li, J. (2022). Coupling and Coordination Relationship between the Tourism Economy and Ecosystem Service Value in Southern Jiangsu, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(23), 16136. https://doi.org/10.3390/ijerph192316136

Wang, J., Han, G., You, J., Zhu, L., Li, Y., y Zhou, X. (2023). Analysis of the Spatial Relationship between Ecosystem Regulation Services and Rural Tourism. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 20*(5), 3888. https://doi.org/10.3390/ijerph20053888

Watson, K. B., Galford, G. L., Sonter, L. J., Koh, I., y Ricketts, T. H. (2019). Effects of human demand on conservation planning for biodiversity and ecosystem services. *Conservation Biology, 33*(4), 942–952. https://doi.org/10.1111/cobi.13276

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60865 • RESEÑAS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60865
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Ecologistas en Acción Madrid (2023).
Operación Chamartín, una losa para Madrid. Suelo público, negocio privado.
Madrid: Traficantes de Sueños
227 pp., ISBN: 978-84-124417-2-7

Esta es una obra colectiva,[1] concebida y coordinada por la Comisión de Ordenación del Territorio de "Ecologistas en Acción"[2] de Madrid. Resulta de interés para los geógrafos(as) porque examina rigurosamente un megaproyecto urbano concebido hace más de tres décadas en la capital española a través de un lenguaje comprensible para no especialistas.

La atención se centra en la llamada "Operación Chamartín", conocida también como "Madrid Nuevo Norte", una macrooperación urbanística sobre un suelo público perteneciente a la compañía ferroviaria Renfe-Adif, que se localiza en el borde septentrional de Madrid, en forma de cuña de unos 5.6 kilómetros de longitud y unos 750 metros de ancho (lo que suma un total de más de tres millones de metros cuadrados), cercana a la estación de trenes de Chamartín y su recinto ferroviario.

Si bien en la página oficial del proyecto se declara que se trata del "gran proyecto de regeneración urbana de Madrid que cerrará la brecha de las vías del tren, dando nueva vida a terrenos en desuso en pleno corazón de la capital, y convirtiéndolos en un innovador entorno urbano centrado en las personas, que respeta la identidad de la ciudad",[3] varios colectivos ciudadanos y ecologistas (la Federación Regional de Asociaciones Vecinales de Madrid[4] y Ecologistas en Acción[5]) han analizado críticamente esta operación no desde una posición utópica o ideal, sino desde una perspectiva anclada en el sistema social y legal, con sus determinantes económicos y políticos.

Este volumen consta de cuatro secciones principales. La primera parte, "De la estación de Chamartín a Madrid Nuevo Norte" (pp. 15-42), describe el contexto geográfico, los antecedentes y un resumen del largo proceso que ha conducido a la actual solución urbanística, para la Operación Chamartín, la cual también se presenta sintetizada en sus características más destacadas (incluso presentando los actores claves del proceso). La segunda parte, "Claves de la operación Madrid Nuevo Norte" (pp. 43-60), explica las razones detrás de este proyecto de regeneración urbana, así como las finalidades y los mecanismos de actuación. La tercera parte, "Madrid Nuevo Norte frente a los grandes retos urbanos" (pp. 61-118), examina el

[1] Entre los autores y autoras participantes se encuentran: Talma Alba, ingeniera agrónoma, Ecologistas en Acción; Ángel C. Aparicio Mourelos, ingeniero de caminos; Daniel Azurza, urbanista; Patricia Calvo, periodista, Ecologistas en Acción; Ana Iglesias, inspectora de transportes, Plataforma de la Zona Norte de Madrid; Aurora Justo, socióloga urbanista, Ecologistas en Acción; Norma Pérez Huerta, arquitecta, Ecologistas en Acción; Miguel Rodríguez Morales, sociólogo, Ecologistas en Acción; Luis Suárez-Carreño, arquitecto, Ecologistas en Acción; y Alberto Tellería, arquitecto, Madrid, asociación Ciudadanía y Patrimonio.

[2] Ecologistas en Acción es una organización no gubernamental con grupos activos en el territorio español y que trabaja en el marco del ecologismo social, de estructura asamblearia y basado, en gran medida, en el activismo de las personas que participan.

[3] CREA Madrid Nuevo Norte. https://creamadridnuevonorte.com/

[4] Federación Regional de Asociaciones Vecinales de Madrid (FRAVM). https://aavvmadrid.org/

[5] Ecologistas en Acción. https://www.ecologistasenaccion.org/federaciones/comunidad-de-madrid/

proyecto de regeneración urbana a la luz de los principales retos sociales, ambientales y territoriales de Madrid, bajo la perspectiva de los principios de sostenibilidad e inclusión, poniendo en relieve además las cuestiones de legalidad urbanística de la propuesta. La cuarta parte, "Fabricación y venta de una ficción" (pp. 119-148), analiza de forma pormenorizada el último tramo de gestación del proceso de Madrid Nuevo Norte desde 2015, resaltando los conflictos políticos y sociales, además de poner en evidencia el aparato propagandístico puesto en marcha por parte de los promotores de la iniciativa para conseguir la aprobación legal en el instrumento de ordenación urbanística local y la aceptación de la ciudadanía madrileña.

Finalmente, el volumen cierra con "Síntesis y conclusiones" (pp. 149-154) y un "Epílogo" (pp. 155-168). Si bien presenta un carácter predominantemente técnico aplicado al contexto español y, más precisamente, al de la ciudad de Madrid, el libro se caracteriza por los temas de posible coincidencia para los geógrafos(as) interesados al momento de mirar [el derecho a] la ciudad latinoamericana, puesto que se han incorporado varios apéndices (pp. 169-220) destinados a profundizar en temas como la vivienda, la infraestructura ferroviaria, las dotaciones y equipamientos, entre otros. De esta manera, este conjunto logra aliviar y optimizar la lectura del cuerpo principal del libro, sin renunciar a exponer el rigor analítico aplicado a aspectos fundamentales de políticas y actuaciones urbanas y urbanísticas.

En el libro se pretende señalar cómo otra Operación Chamartín, mucho más sostenible e inclusiva, era y es posible, mediante los instrumentos y restricciones existentes en el sistema legal y normativo en materia de urbanismo. De manera especial, la intención de los autores y las autoras es poner el énfasis en los resultados de unas políticas urbanas insostenibles y excluyentes, y también de una forma conspirativa de hacer ciudad desde los despachos institucionales y financieros, donde la gestión y los recursos públicos se ponen al servicio de los negocios privados. Según la posición de Ecologistas en Acción Madrid, el proyecto de Madrid Nuevo Norte es la negación práctica del derecho a la ciudad, que ofrece un contraste escandaloso entre sus errores conceptuales, carencias técnicas y trampas legales, y la apabullante dimensión de la maquinaria publicitaria, mediática y política a su servicio.

El libro, en definitiva, permite aprender de esta experiencia fallida de intervenir la ciudad, a la vez que reivindica otra forma de pensar y hacer la ciudad y, también, construir memoria sobre los procesos de transformación urbana. Por eso, interesa no únicamente a profesionales o activistas, sino a toda persona comprometida con el futuro de las ciudades.

Federico Camerin[6]
Investigador post-doctoral
"Margarita Salas", doble afiliación
Universidad de Valladolid (UVA) y
Universidad Politécnica de Madrid (UPM) –
Grupo de Investigación en Arquitectura,
Urbanismo y Sostenibilidad (GIAU+S)
del Departamento de Urbanística y
Ordenación Territorial

[6] Esta reseña se ha realizado en el marco del proyecto "La Regeneración Urbana como una nueva versión de los Programas de Renovación Urbana. Logros y fracasos". Este contrato está cofinanciado por el Ministerio de Universidades en el marco del Plan de recuperación, transformación y resiliencia, por la Unión Europea – NextGenerationEU y por la Universidad de Valladolid.

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60866 • RESEÑAS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60866
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Ramírez Velázquez, B. R. (2023).
Encuentros disciplinarios y debates metodológicos. La investigación crítica sobre las relaciones espacio / territorio
México: Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Xochimilco
336 pp., ISBN 978-607-28-2791-2

El libro titulado *Encuentros disciplinarios y debates metodológicos. La investigación crítica sobre las relaciones espacio/territorio*, de Blanca Rebeca Ramírez Velázquez,[1] fue leído en forma parcial y analizado grupalmente el pasado 13 de noviembre 2023, en un Seminario del Doctorado en Ciencias Sociales, programa insignia del Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades de la Universidad de Guadalajara. Traigo ese dato debido a que tal experiencia me reveló al menos dos atributos del volumen en tanto herramienta para el diálogo.

El primero de ellos es que cumple eficazmente con la función de conectar sensiblemente con personas de diversas disciplinas. La obra aborda conceptos transversales que interesaron al grupo, pero no de igual manera. De ahí se desprende el segundo atributo, cada lector activa su lupa y reacciona de acuerdo con su experiencia cognitiva y sus expectativas, incluso en afanes utilitarios como solventar un marco teórico. Una obra tan vasta ofrece mucha tela de donde cortar y se lee de diversas formas, de lo cual expondré un ejemplo más adelante. Ello comprueba la pertinencia de las expresiones "encuentros disciplinarios" y "debates metodológicos" que forman parte del título. El volumen se organiza mediante cuatro capítulos, a saber: 1. Espacio–tiempo y naturaleza en el análisis territorial. 2. Homogeneidad – diferencias en la construcción del espacio / territorio. 3. Del espacio plano a la producción de múltiples escalas y 4. De las escalas a las redes y las relaciones.

La motivación central que llevó a Ramírez Velázquez a escribir este libro es perfectamente identificable. Entiende la agenda para trabajar las categorías espacio/territorio del planeta a través de un rechazo y de una propuesta. El primero es "deslindarse de la manera tradicional de los estudios del espacio/territorio –centrados en lo general descripciones de lo que hay o lo que tienen–". La segunda consiste en "reconocer analíticamente los procesos generales y particulares, y las relaciones que propician en los espacios y territorios" (p. 16). El texto desgrana en 336 paginas los argumentos para aproximarse en dicho objetivo.

Obviamente no se trata de un manual teórico-metodológico mecanicista ni de un catálogo de técnicas de investigación. Es una sistematización de soportes intelectuales que han surgido principalmente en la escuela anglosajona y en menor medida

[1] Blanca Rebeca Ramírez Velázquez es una figura destacada para geógrafos, arquitectos, urbanistas y en general para las ciencias sociales. Referente colectivo porque sus libros iluminan nuestro edificio intelectual siempre en remodelación, los reflectores requieren ajustarse permanentemente y ser flexibles. En tal ramo, los proveedores nacionales son escasos, no cualquiera aborda solventemente las temáticas epistemológicas, ello exige años, incluso décadas de reflexión y el despliegue de finas herramientas para dar vida a la complejidad y a poner al día la semántica que atañe a una sociedad mundial cambiante y plagada de incertidumbres. Ramírez Velázquez ha sido para nuestro Departamento de Geografía y Ordenación Territorial, de la Universidad de Guadalajara, una persona generosa, en un par de ocasiones nos ha surtido luz a domicilio, luz que a su vez orienta el ejercicio de lectura. El verdadero éxito de un libro consiste en ser leído y a partir de esa práctica desata hechos tan diversos como el impulso a revisar otros libros, retroalimentar un debate, dar coherencia a un curso, apuntalar una investigación, contrastar en campo un hecho territorial.

la francesa. La autora explicita el objetivo del libro: "sugerir una metodología que sirva para identificar de manera más clara, las relaciones espaciales/territoriales que se observan en su transformación, producto de los debates y discusiones que tuvieron lugar desde finales del siglo XX con el postmodernismo, plasmadas en orientaciones diversas desde principios del siglo XXI" (p. 18).

Para coronar la argumentación pinta una raya, que sugiero nunca perder de vista: incorpora "visiones críticas que se sucedieron e impactaron las orientaciones realizadas, desde diferentes campos del conocimiento sobre el espacio, sea este urbano o rural, global o cultural" (p. 18). El principio de acotación centrado en la vertiente crítica otorga identidad al texto y explica el motivo por el que Doreen Massey sea la autora con más obras citadas y le siga David Harvey. Massey y Harvey tienen en común su origen británico y orientación marxista. Ella falleció en 2016 con 72 años mientras que él, a sus 88 años, sigue activo. Ambos geógrafos han desarrollado compromisos sociales con América Latina, la han usado como laboratorio, lo que habría influido en estructurar su pensamiento. De manera análoga, Ramírez Velázquez incluye ejercicios revisionistas en los que analiza, por ejemplo, el tránsito de la diferencia a la desigualdad en América Latina en función de categorías críticas.

La materia prima que alimenta el texto son los debates "históricamente sustanciales" procedentes de las ciencias sociales en general y del urbanismo, la geografía y la planificación en particular. Clasifica esos debates en cuatro apartados: 1. La conjunción espacio–tiempo. 2. El paso del espacio–territorio homogéneo a uno formado por diferencias. 3. La apertura del espacio–tiempo a escalas y dimensiones. 4. Contender con las relaciones espacio/territorio. Más que realizar un resumen de dichos debates o recitar pinceladas de los contenidos de cada capítulo, me pareció más creativo presentarles una reflexión que se desprendió de atar cabos situados en partes distintas del libro. Con ello procuro convencerlos de las bondades de leer este volumen.

La reflexión es sobre las diferencias y desigualdades existentes en el espacio/territorio. Imagino a un docente de grado o posgrado que imparte un curso de planificación, geografía regional o cartografía, no necesariamente se trataría del profesor de filosofía o de epistemología. El estudiantado lee lo siguiente en el libro (p. 163):

> La estrecha relación que puede y debe haber entre las diferencias conduce, cuando se toman como proceso, a lo que se conoce como desigualdades, sin duda un punto por identificar y discutir para analizar si son homónimos o requieren de instrumentos diferentes para tratarse. Lo que queda claro es que la diferencia, en tanto que postura postmoderna, considerada como estática, sin movimiento ni contexto, dista mucho de parecerse a las desigualdades que se mueven, transforman y contextualizan constantemente.

Argumento central: las diferencias espacio territoriales se han abordado como formas estáticas. Si se analizan como proceso reflejan desigualdades. Preguntas asociadas a discutir grupalmente: ¿las diferencias son efectivamente un concepto propio de la posmodernidad y las desigualdades de las visiones críticas?, ¿qué autores adicionales podemos leer para encontrar respuestas e identificar subcategorías?, ¿qué instrumentos metodológicos, técnicas e indicadores son adecuados para analizar las diferencias y las desigualdades?

Luego del debate viene el ejercicio empírico, no sin antes referir el epígrafe de Neil Smith con que Ramírez Velázquez abre su libro: "Como Marx insistió, no puede haber filosofía separada de la ciencia práctica". A partir de ahí el profesor propicia una conexión con la técnica estadística, la cartografía y los sistemas de información geográfica para elaborar mapas y representaciones gráficas de diferencias o desigualdades, por ejemplo, de producción económica, escolaridad o calidad de vida, aplicando el concepto de multiescalaridad y, de ser posible, el de multidimensionalidad. Por tanto, conviene hacerlo, por ejemplo, a escala estatal y por municipios. Saltarán a la vista resultados que retroalimentarán el debate en el que justamente será necesario explicitar el contexto espacio/ temporal bajo una mirada evolutiva.

Se trataría de construir conocimiento nuevo, de proveer de técnicas nunca disociadas del andamio teórico y estimular un razonamiento territorial

crítico que se deslinde de caer en un tratamiento positivista irreflexivo. Como valor agregado, leer otro pasaje del libro de Ramírez Velázquez encaminado a cuestionar la postura estructuralista que aborda el espacio como si fuera un ente estático y cerrado:

> A pesar de lo que argumentan muchos geógrafos tradicionalistas que confunden el análisis del espacio o del territorio con el mapa, es decir, con su representación, es preciso aceptar que el mapa no es el espacio ni el territorio y que, en ocasiones, éstos no son representables: confundir el espacio con la representación impide introducirlo al proceso, y por tanto se asume como carente de movimiento" (p.46). Aquí Ramírez Velázquez se apoya de la obra *For Space* de Doren Massey.

Es un ejercicio para problematizar y reconceptualizar el mapa, uno de nuestros lenguajes predilectos y como mensaje medular, romper con la desarticulación entre la sustancia teórica y el trabajo empírico. En tal sentido este libro es un insumo pedagógico para producir un *clic* entre la teoría y la práctica.

Ello dependerá del ingenio creativo del profesor y contribuirá a combatir el "empirismo rampante" (Montoya, 2009) identificado por el geógrafo colombiano William Montoya, quien sostiene que se trata de un pragmatismo favorecedor de posturas acríticas que llevan a la pérdida de autonomía intelectual (Montoya, 2009, p. 11). Pienso que las técnicas deberían concebirse como la instrumentalización de la teoría. Los libros de talente epistemológica como este no tienen por qué ser de uso exclusivo para mentes privilegiadas, esa falacia conduce a alejarlos, incluso a estigmatizarlos, lo cual propicia reduccionismos.[2]

El libro de Ramírez Velázquez sistematiza magistralmente el entendimiento dualista de las categorías tiempo y espacio por parte de diversos autores. Efectivamente, algunos los manejan como opuestos y otros en forma integrada. El resultado es tan generoso que la autora consigue identificar cinco discusiones que permean la concepción actual del tiempo/espacio o espacio/tiempo. Finalmente, comento mi percepción sobre el lugar de esta obra dentro de la genealogía bibliográfica de la autora. Tengo la sensación de que por hoy se sitúa en la cima de un proceso de maduración de largo aliento. Una curva de aprendizaje personal que conecta puntos datados a lo largo de más de tres décadas de fecundo esfuerzo intelectual.

Refiero solamente dos de esos puntos: el más temprano, citado en este libro, es de 1991: *Lo internacional y lo regional: algunas reflexiones metodológicas*; luego, en 2015, editó en coautoría con otra destacada geógrafa, Liliana López Levi, el libro *Espacio, paisaje, región, territorio y lugar*, sin duda, la obra más conocida de dichas autoras en nuestra comunidad geográfica tapatía. Siempre que lo recomiendo uso la metáfora de la estrella. Figura de cinco picos: el espacio, el paisaje, la región, el territorio y el lugar, estrella de la que debemos apropiarnos a efecto de desarrollar competencias profesionales, investigación científica fundamentada, espíritu crítico. Es necesario trabajar intelectualmente la estrella, sacarle brillo para superar el "empirismo rampante" del que habla Montoya. Este libro viene a reforzar y facilitar la labor.

Luis Felipe Cabrales Barajas
Departamento de Geografía
y Ordenación Territorial
Universidad de Guadalajara

[2] En un trabajo publicado en el libro: *70 años del Instituto de Geografía*, me permití externar un debate que por fortuna Ramírez Velázquez desarrolla en este libro: la simultaneidad espacio/tiempo (Cabrales, 2015, pp. 320-350). No obstante que estudiamos procesos y que, por tanto, contienen una dimensión histórica, existe una disociación o más aún la contraposición de las categorías espacio y tiempo, producto de los cánones dominantes en la ciencia moderna. De ahí se derivó la hegemonía del tiempo sobre el espacio. Este último fue reducido a telón de fondo donde ocurren los hechos, pero supuestamente no influye en ellos. Nuestro lenguaje refleja esa desigualdad, el verbo *historiar* suele usarse mientras que no ocurre lo mismo con el verbo *geografiar* o por lo menos no es común. Un referente para ampliar el debate se expresa en el propio título del libro de Karl Schlögel: *En el espacio leemos el tiempo*, en el que critica esa actitud donde "las relaciones espaciales solo son a modo de *container*, de caja negra, espacio pasivo para los actores históricos" (Schlögel, 2007, p. 48).

REFERENCIAS

Cabrales Barajas, L. F. (2015). Geografiar el Mundo: debates teóricos recientes desde una mirada Latinoamericana. En J. O. Moncada Maya y Á. López López (Coords.), *70 años del Instituto de Geografia: historia, actualidad, perspectiva* (pp. 320-350). Instituto de Geografía, UNAM. http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/75

Montoya, J. W. (Ed) (2009). *Lecturas en teoría de la geografía*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Geografía.

Schlögel, K. (2007). *En el espacio leemos el tiempo. Sobre Historia de la civilización y Geopolítica* (José Luis Arántegui, trad.). Biblioteca de Ensayo 55. Ediciones Siruela.

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60867 • RESEÑAS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60867
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Fernández Christlieb, F. (2023).
Hacer Geografía. Un razonamiento histórico para el mundo que viene.
México: Instituto de Geografía, UNAM
186 pp., ISBN 978-607-30-8097-2

Por allá de 1980, un grupo de historiadores editaron el libro: *Historia ¿Para qué?* para abordar el porqué del discurso histórico y el para qué "se rescata, se ordena y se busca explicar el pasado" (Pereyra, 2005, p. 7). Un libro oportuno en su momento, cuando la reaganomía y la debilidad de la URSS abrían el horizonte a un cambio de época, una marcada por la política mundial del libre mercado. Años después, el filósofo Gabriel Vargas volvía a la misma pregunta, pero centrando su análisis en la madre de todas las ciencias. Su libro: *Filosofía ¿Para qué? Desafíos de la filosofía en el siglo XXI*, explicó: "los grandes desafíos que enfrenta hoy la humanidad y que dan lugar a los problemas que abordará la filosofía en las próximas décadas" (2013, p. 10). Dilemas ocasionados por la enajenación y el individualismo exacerbado, siguiendo su apreciación.

Exactamente una década después, es turno de otra gran y antigua disciplina de los griegos: la geografía. *Hacer Geografía* se nos presenta de la mano de Federico Fernández Christlieb. Aunque el título no expresa la misma pregunta planteada por los historiadores y los filósofos, bien nace de las mismas inquietudes sobre discutir el lugar de la geografía dentro del contexto de la crisis ambiental y social del siglo XXI; así como la generación de mecanismos de intervención.

Fernández Christlieb, doctor en Geografía y Ordenamiento Territorial por la Universidad de París-Sorbonne, es investigador del Instituto de Geografía de la UNAM y representante del enfoque de la geografía cultural en México y en América Latina. Con más de 30 años de experiencia como académico, ha trabajado con grupos de geógrafos internacionales en Francia, Inglaterra y Canadá, lo que ha cristalizado en numerosos artículos y libros sobre el paisaje de los pueblos de tradición indígena del Altiplano Central mexicano.

Con una visión panorámica del saber geográfico a través de la historia y su lugar en los retos de una sociedad cada vez más globalizada, Fernández presenta una ruta crítica para producir una geografía nueva. En este proceso, analiza una serie de etapas continuas y presentes en el razonamiento histórico geográfico. Tales momentos los simplifica en cinco verbos, materializados a su vez, en cinco capítulos: caminar, observar, preguntar, describir e intervenir. Aunque todas son relevantes para hacer geografía, el último acto (la intervención), la más larga del libro, formaliza un camino certero para guiar la acción presente y futura de geógrafos (e historiadores, también).

Con una bibliografía que mezcla los trabajos clásicos de Ratzel, Vidal de la Blache, Sauer, Lefevre, Braudel, Lacoste, Brunet, Claval, Harvey, Capel, Cosgrove y Dollfus; junto con los estudios más contemporáneos de Irasema Alcántara, Atlántida Coll-Hurtado, Key Anderson, Mona Domosh, Augustin Berque, Johanna Broda, Pere Sunyer, entre otros, el autor nos adentra a la evolución del razonamiento geográfico. Por este motivo, el material cartográfico que entrega induce a un viaje para apreciar algunas de las primeras representaciones de la ecúmene, es decir, el mundo habitado, como el mapa de Ptolomeo de *circa* 150, el mapa del Mediterráneo de Al Idrisi de 1154 y el mapa mundi de la Abadía de Westminster de 1265. Estas abstracciones, apunta el autor, fueron resultado de la unión de múltiples registros de

viajeros que caminaron, observaron, cuestionaron y describieron la ecúmene. Estas acciones entrelazaron la corografía, es decir, la descripción de los lugares, con la cosmografía, entendida como la ubicación de los lugares sobre la Tierra con base en la observación del cielo a magnitudes estelares. Con la corografía y la cosmografía fue posible la producción cartográfica, a saber, la representación del mundo habitable en mapas.

Al mismo tiempo, el investigador muestra material cartográfico más contemporáneo que retoma las cuatro anteriores etapas para hacer geografía (caminar, observar, preguntar y describir) junto con la quinta etapa (intervenir) para ejemplificar el poder que tiene esta disciplina para incidir en los problemas de escala local. Tal como lo muestra con el mapa de riesgos de Teziutlán, Puebla del 2020, cuyo objetivo es identificar zonas de deslizamiento del suelo para reducir la construcción de vivienda en zonas de vulnerabilidad y evitar la tragedia de 1999, donde un deslizamiento de tierra sepultó varias casas.

Con estos elementos bibliográficos y cartográficos, el libro de Fernández invita al razonamiento geográfico para generar iniciativas desde la ciudadanía y resolver problemas inmediatos y urgentes. Aunque, advierte el autor, esta intervención debe comenzar por la escala local, ya que en ella los cambios son más efectivos. Pero, al mismo tiempo, es necesario construir lazos con otras comunidades para inducir la organización regional y, con ello, reducir efectivamente nuestra huella ambiental y fortalecer los vínculos.

Este razonamiento, que entrelaza el medio con los grupos humanos, comienza con el acto de caminar (pp. 31-44), el cual involucra un desplazamiento en el terreno a pie, pues es la forma más antigua de traslado, como las migraciones históricas dan cuenta. Otro tipo de desplazamiento a escala humana es la navegación con botes y el andar en bicicleta. El elemento que une estos desplazamientos es la posibilidad de localizar y describir puntos comprobables sobre el terreno, construyendo una corografía de los lugares que, al sumarlos, crean una imagen de la ecúmene. Asimismo, caminar permite que los sujetos y las colectividades reconozcan y se orienten en el espacio. Estos dos aspectos, como lo indicó Claval (1999), tejen una identidad con el espacio.

Una vez que se descubre el entorno al andar, se le percibe con la acción de observar (pp. 45-67). Sin embargo, señala Fernández, observar no es sinónimo de ver, pues se requiere de todo el cuerpo y sus sentidos para reparar en los detalles del entorno. El ver facilita la percepción espacial. Con el acto de observar, diría Cosgrove (2008) se construye un mundo resultado de percibir, imaginar y representar el entorno. En este proceso interviene una experiencia histórica y simbólica colectiva particularizada en el sujeto como observador. Así, el razonamiento geográfico se enmarca en diferentes escuelas que observaron y asimilaron el espacio desde su horizonte de enunciación histórico como el enfoque regional del siglo XIX e inicios del XX, la corriente anglosajona de la cuantificación de mediados del XX, los geógrafos radicales y marxistas o el giro cultural de finales del XX. Esta última logró reunir las virtudes de esta disciplina en el paisaje, al entenderlo como objeto geológico, social-histórico y de percepción subjetiva.

Después de caminar y de observar el espacio, la siguiente etapa para hacer geografía es preguntar (pp. 69-90) por qué el mundo funciona de una determinada manera. Esta disciplina ha intentado responder a tres preguntas, mismas que han llevado su avance: sobre el propósito y la organización de la vida en la Tierra; en qué medida el entorno físico afecta la organización de los pueblos y cuál es la capacidad humana para modificar la organización de la naturaleza. A partir de estos cuestionamientos, han surgido trabajos como el de Cavalli-Sforza, genetista italiano que comparó los genes de los grandes grupos humanos. Con su trabajo afirmó la inexistencia de razas biológicas y determinó que las diferencias entre grupos se basan en cuestiones culturales.

Con los datos, cuestionamientos e hipótesis generados se procede al acto de describir (pp. 91-116) a través de la escritura, la pintura o la cartografía. Para ello, se adapta una metodología que es flexible, pues va desde lo cuantitativo a lo cualitativo, hasta el trabajo de gabinete, de archivo y de campo. A la vez se trabaja con una mirada micro, meso y global que recupera lo cotidiano vivido y lo alejado univer-

sal. Así, es posible escribir sobre el paisaje a través de notas de viajeros, epístolas, dibujos y grabados de las ciudades. También se produce cartografía a escala local que permite visualizar el uso de suelo y saberes de los pueblos, o bien mapas regionales para identificar comarcas y ordenar el territorio.

Por último, con la información dada por nuestro andar, sentir, cuestionar y narrar el paisaje, es posible intervenir (pp. 117-164). Para proponer proyectos es necesario hacer política, señala Fernández, pero no aquella que es partidista, sino la que nace de la ciudadanía que conoce de primera mano sus problemas inmediatos. Por ello, presenta una agenda geográfica para el siglo XXI donde esta disciplina jugará un rol esencial para abastecer de agua y de alimento, dotar de servicios y de seguridad a la población, crear espacios para socializar, generar energía sustentable y accesible y educar en la tolerancia. De esta manera, concluye el autor, la geografía se coloca en un lugar central para abordar los problemas del siglo xxi al tener un razonamiento que empieza por lo local, poseer una mirada multidisciplinaria y de larga duración, vincular al sujeto con el colectivo, generar la participación, reunir lo geológico, biológico y cultural a escala local-global, comprender la relación entre lo rural y lo urbano, utilizar el trabajo de campo y de gabinete, asimilar las nuevas tecnologías, con rutas o protocolos de fácil comprensión.

Alma Patricia Montiel Rogel
Posgrado en Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

REFERENCIAS

Claval, P. (1999). *Geografía cultural*. Editorial Universitaria de Buenos Aires.

Claval, P. (2023). *Nuevo ensayo sobre la evolución de la geografía humana*. Col. Geografía para el siglo XXI. Serie Textos universitarios 40. Instituto de Geografía, UNAM. http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/209

Cosgrove, D. (2008). *Geography and visión. Seeing, imagining and representing the world*. Tauris.

Pereyra, C. (2005). *Historia ¿Para qué?* Siglo XXI Editores.

Vargas Lozano, G. (2013). *Filosofía ¿Para qué?* Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Iztapalapa.

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60868 • RESEÑAS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60868
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Hawthorne, C. y Scott Lewis, J. (Eds.) (2023).
The Black Geographic. Praxis, Resistance, Futurity
Durham, North Carolina: Duke University Press
344 pp., ISBN 1-4780-2515-8

La imbricación de la raza, la diferenciación social y la producción del espacio, son algunas de las principales cuestiones que *The Black Geographic* examina desde la genealogía de las geografías negras. A través de nuevas herramientas analíticas e imaginarios políticos que parten de la rica historia de la tradición radical afroamericana, los capítulos que componen el libro proponen marcos epistémicos geográficos de la diferenciación. Así, este libro cuestiona qué es la negritud y cómo las múltiples formas en que esta es producida desafía su construcción como algo invisible, ocluida en los marcos de análisis espaciales, o hipervisible, a través de la muerte social y la marginalidad como constantes en su definición. *The Black Geographic* demuestra la crucial intervención que estas geografías negras hacen a la disciplina desde la innovación teórica, la praxis ética y experimental, y la centralidad de la experiencia negra en la producción de otras espacialidades. Siguiendo otros trabajos, como los de Katherine McKittrick y Clyde Woods, esta obra expone nuevas trayectorias desde el sentido de lugar de la experiencia negra, al tiempo que busca descentralizar las perspectivas anglosajonas.

Este volumen incluye capítulos escritos por catorce autores que exploran las geografías negras desde la planeación urbana, la geografía histórica, urbana y ambiental, la justicia ambiental, estudios literarios, de género, así como el arte multidisciplinario. Los editores, Camilla Hawthrone y Jovan Scott Lewis, son profesores en la Universidad de California en Santa Cruz y Berkeley, respectivamente. Camilla Hawthorne es profesora en el departamento de sociología y estudia cuestiones de migración, capitalismo racial y las geografías de la abolición insurgentes, particularmente en el Mediterráneo, sobre lo cual ha publicado, entre otros, *Contesting Race and Citizenship: Youth Politics in the Black Mediterranean* (2022). Por su parte, Jovan Scott Lewis es profesor y director del departamento de geografía donde estudia desde el marco de las reparaciones la desigualdad económica y racial a las que están sujetas poblaciones afrodescendientes y promovió la iniciativa Berkeley Black Geographies Project en 2016. Entre sus publicaciones están los libros *Scammer's Yard: The Crime of Black Repair in Jamaica* (2020) y *Violent Utopia: Dispossession and Black Restoration in Tulsa* (2022).

The Black Geographic cuestiona y explora marcos epistémicos desde las tradiciones radicales negras frente a los proyectos coloniales, imperialistas y esclavistas que han sido parte de la disciplina geográfica y su desarrollo a la par de la modernidad occidental. Desde las innovaciones teóricas y epistémicas que nos presentan los diferentes capítulos, se dibuja el horizonte de intervenciones en la disciplina que se articulan desde otras formas de crear mundos. Este volumen también muestra el lugar privilegiado de las geografías negras para el análisis espacial de la diferencia desde una crítica aguda al esencialismo y al capitalismo racial. Por un lado, explora, a partir de los conocimientos situados, alternativas a las formas de construcción y sanción de identidades en su vínculo con modos de organización espacial. Y, por el otro, evidencia cómo la raza "es central en las formas en que ciertos espacios (y, por extensión, los cuerpos de los que han sido "fijados" a o "contenidos" en estos espacios) son construidos como vacíos, pasivos, inmóviles, o sitios prescindibles o explotables para

la acumulación" (Hawthorne y Lewis, 2023, p. 7). Finalmente, *The Black Geographic* también se interna en nuevas direcciones de la investigación y andamiaje de las geografías negras, desde las experiencias en África o las sinergias con las geografías indígenas, cuestionando cómo ampliar las geografías negras más allá de los Estados Unidos sin imponer sus propias formas de producción de conocimiento.

El libro está dividido en tres secciones: praxis, resistencias y futuridad. El primero, que consta de tres capítulos, examina los retos y las provocaciones epistémicas desde las geografías negras y abolicionistas como alternativas metodológicas y de acción social. Estos capítulos abordan cuestiones de la producción de espacialidades afrodescendientes para comprender mejor dimensiones afectivo-emocionales de los paisajes. La sección "Resistencias" incluye cuatro capítulos que exploran formas de vitalidad y fortaleza desde donde prevalecen y se reconstruyen estas espacialidades negras. Los capítulos examinan cuestiones como la migración, frente al aparato estatal y la imposición de identidades de la negritud en el Magreb, las alternativas en la producción de espacios urbanos en Senegal y Costa de Marfil o las estrategias políticas de mujeres negras que ocupan una posición de poder político. Finalmente, la sección "Futuridad", que concluye con cinco capítulos, se centra en las dimensiones espaciales de producción de alternativas desde la experiencia de la negritud, frente a las formas dominantes de planeación urbana y las políticas económicas raciales. En esta sección los capítulos revisan cuestiones como la espacialidad del ocio desde la experiencia negra como una forma de crear nuevos espacios frente a las teorías y prácticas de desarrollo hegemónicas.

De entre esta variedad de aproximaciones a las espacialidades negras y los horizontes geográficos que plantean, me interesa resaltar tres que exploran las alternativas epistémicas desde la oralidad, el lenguaje cartográfico y la especulación creativa. En su capítulo "Call Us Alive Someplace Du Boisian Methods and Living Black Geographies", Danielle Purifoy explora una metodología Du Boisiana desde donde generar marcos que preserven la vida y las formas de vida negras al tiempo que permiten comprender mejor el proyecto capitalista racial de los Estados Unidos. Este desplazamiento epistémico en geografía tiene como fin no solo establecer marcos desde las propias experiencias y espacio de libertad negra sino eludir la definición de la negritud desde la muerte social y las estructuras dominantes. El texto explora la novela de Du Bois *The Quest of the Silver Fleece*,[1] donde el autor borró "la división entre la investigación positiva y la especulación creativa" (Purifoy, 2023, p. 28) y planteó un espacio liberado donde la tierra no es considerada propiedad y el algodón simboliza la liberación de las poblaciones negras. Con este marco de referencia, Purifoy nos lleva de vuelta a Lowndes County, en Alabama, el lugar donde tiene lugar *The Quest* para explorar las continuidades y la persistencia de formas de vida y las alternativas a la definición de la identidad negra.

En este mismo registro, el capítulo "Words Re(en)visioned Black and Indigenous Languages for Autonomy" explora las conexiones entre la geografía crítica, la oralidad y el lenguaje en las tradiciones afrodescendientes e indígenas. Vinculando los trabajos de Katherine McKittrick, Clyde Woods y Silvia Wynter con conceptos y espacialidades mayas y wixaritari, el texto de Diana Negrín "explora el papel de la oralidad y el lenguaje como fuentes de conocimiento y posibles caminos en la práctica decolonial y autonómica" (Negrín, 2023, p. 126). Desde la oralidad como articulación de proyectos alternativos y el lenguaje "como un acto político tanto íntimo como colectivo" (Negrín, 2023, p. 128), la autora examina conceptos que refieren formas de existir y pertenecer a múltiples espacios frente a las formas dominantes que esencializan identidades y establecen vínculos fijos entre identidad y lugar. Así, a través de su capítulo, se exploran conceptos que integran un sentido de prácticas espaciales y de resistencia mostrando cómo el len-

[1] Los trabajos de Du Boise han sido importantes en el desarrollo de marcos epistémicos geográficos alternativos. Otro ejemplo del trabajo del sociólogo afroamericano es: *W. E. B. Du Bois's Data Portraits: Visualizing Black America*, de W. Battle-Baptiste y B. Russert (2018) (véase la reseña de Mónica Ramírez Bernal en *Investigaciones Geográficas*, 2019, número 99).

guaje está vinculado a la reproducción de formas culturales, económicas y políticas centradas en la tierra y la autonomía territorial.

Finalmente, Anna Livia Brand examina alternativas a las agendas de desarrollo urbanas en el contexto pos Katrina en la ciudad de Nueva Orleans cuestionando qué lógicas fundamentan estos proyectos y futuros de disposición, racialización y acumulación. Su capítulo, "Today Like Yesterday, Tomorrow Like Today. Black Geographies in the Breaks of the Fourth Dimension", hace una crítica puntual de las epistemologías espaciales cartesianas y las representaciones y prácticas espaciales derivadas de estas. La autora argumenta que el "cartesianismo existe fuera del tiempo; concretiza el espacio y fija identidades" (Brand, 2023, p. 270) produciendo geometrías urbanas del capitalismo racial. Frente a ello, propone otras maneras de pensar desde las geografías(-temporalidades) negras que "saturan" el medio abstracto de las coordenadas cartesianas situándolo temporalmente y en el contexto del capitalismo racial. Así, las geografías negras rompen con las lógicas subyacentes de orden espacial y amplían formas no opresivas de organización que "no pueden ser mapeadas por una lógica que fundamentalmente borra y omite la vida y la historia negra" (Brand, 2023, p. 278).

The Black Geographic muestra las posibilidades que persisten desde las espacialidades afrodescendientes, como intervención en la disciplina geográfica, en la construcción de otras aproximaciones y marcos metodológicos. Es un libro que demuestra la importancia de estas geografías para avanzar en la construcción de futuros más justos, espacios de libertad negra y la práctica desde formas de investigación colaborativas, horizontales y éticas. Finalmente, este volumen representa un referente para estudiantes o investigadores que estén interesados en otras formas de comprender espacialidades y ampliar las críticas epistémicas de la práctica geográfica.

Gerónimo Barrera de la Torre
Investigador posdoctoral
Brown University

REFERENCIAS

Brand, A. L. (2023). Today Like Yesterday, Tomorrow Like Today. Black Geographies in the Breaks of the Fourth Dimension. En C. Hawthorne y J. S. Lewis (eds.), *The Black Geographic. Praxis, Resistance, Futurity* (pp. 264-286). Duke University Press.

Hawthorne, C., y Lewis, J. C. (2023). Black Geographies. Material Praxis of Black Life and Study. En C. Hawthorne y J. S. Lewis (eds.), *The Black Geographic. Praxis, Resistance, Futurity* (pp. 1-26). Duke University Press.

Negrín, D. (2023). Words Re(en)visioned Black and Indigenous Languages for Autonomy. En C. Hawthorne y J. S. Lewis (eds.), *The Black Geographic. Praxis, Resistance, Futurity* (pp. 124-144). Duke University Press,.

Purifoy, D. (2023). Call Us Alive Someplace Du Boisian Methods and Living Black Geographies. En C. Hawthorne y J. S. Lewis (eds.), *The Black Geographic. Praxis, Resistance, Futurity* (pp. 27-49). Duke University Press.

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60869 • RESEÑAS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60869
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Pérez-Muelas, P. (2023).
Homo Viator. El descubrimiento del mundo a través de los viajeros.
España: Siruela. Biblioteca de ensayo 136. (Serie mayor)
451 pp., ISBN 978-84-19744-43-2

¿Quién lee algo antes de viajar? Los viajes comienzan en los libros y este es una invitación al lector a descubrir el mundo. En su primera obra, Pepe Pérez-Muelas (nacido en Lorca en 1989), filólogo formado en Granada y actual profesor de literatura en Sevilla, demuestra que no hay nada más humano que viajar: desde la imaginación al leer hasta el caminar (p. 19). El objetivo del autor al escribir este ensayo, editado por Siruela, surge de la manera cómo se entienden los viajes: son muy personales, se viven, se sienten, se caminan y se escriben.

Fueron la propia experiencia, los recuerdos, la imaginación y la lectura puesta en los viajeros, las motivaciones de Pérez-Muelas para realizar este compendio titulado *Homo Viator*: *el descubrimiento del mundo a través de los viajeros*, donde queda claro que el ser humano descubrió el mundo para sobrevivir. La idea central del *Homo Viator* (hombre viajero) se presenta en dos vías: 1) entender la vida como un viaje y 2) hacer del viaje un modo de vida (p. 21). Y el autor pretende que en esta obra viajemos con él, es su travesía narrada a modo de ensayo, testigo y lector de los autores o viajeros literarios que cita en cada sección de la obra.

La estructura del libro corresponde a un orden geográfico del mapamundi de Urbano Monti, cada sección se abre con una parte del mapa. Comienza con la India y Asia, las civilizaciones más antiguas y orígenes del viaje, para luego situar Europa y el descubrimiento de los nuevos mundos (Tabla 1). A lo largo de la selección, el autor viaja en el libro, las distintas culturas y viajeros que enuncia dialogan constantemente sin un estricto orden cronológico. Su propuesta ordena los viajes y la espacialidad: sin temporalidad ordenada, donde ninguna cultura se antepone a la otra, lo destacable es que cada individuo o sociedad fueron portadoras de experiencias de viajar en la redondez de la Tierra y capaces de hacer cartografías.

Algo es evidente: la necesidad de viajar y, por consiguiente, las migraciones, han sido inherentes al ser humano. Los viajes han formado parte de la vida de cada uno de nosotros, desde los que se van, hasta los que se quedan. En la antigua Grecia, según Paul Zumthor, el viaje tuvo una existencia triple: desplazamiento espacial, agotamiento del tiempo e iniciación de los mitos fundadores. (Zumthor, 1994, p. 165) Posteriormente, en el siglo VI a.C., los filósofos presocráticos comenzaron a ver los viajes como una posibilidad de ampliar el conocimiento, más allá de la mitología (Pérez, 2023, p. 195). ¿Qué significa ser un *homo viator*? Es aquel que viaja (Zumthor, 1994, p. 162). Si bien el autor no ofrece una definición de "viajar", muestra que en la actualidad cada individuo tiene su propia perspectiva en torno a este acto, para salir, regresar o vacacionar. No se renuncia al viaje (Pérez, 2023, p. 434). El acto de salir pone en marcha nuestra capacidad para afrontar una alteridad, implica movilidad y es la primera conquista espacial que surge de un deseo de conocimiento en las antiguas civilizaciones (Zumthor, 1994, p. 163). Esto está en toda la estructura del libro, pues queda claro que los viajeros preguntaron, aprendieron y descubrieron, ya sea como testigos en primera persona o conocedores por medio de otras fuentes. Aunque no deja de ser una visión del viaje sumamente occidental (Pérez, 2023, p. 131).

Tabla 1. Estructura de *Homo Viator* (2023).

Sección de libro	Sección del mapa de Urbano Monti	Viajero(a) o autor(a)*
Primera parte: donde nace el Sol	India China y Japón El Himalaya	Octavio Paz, Vasco da Gama, Isabella Bird, Alessandro Valignano, Fernao Mendes Pinto, Hervé Joncour, Isabella Bird, Paul Auster, Maurice Hertog, Edurné Pasabán, Rabban Bar Sauma, Pablo Neruda, Marco Polo.
Segunda parte: Oriente	Egipto Mesopotamia La Meca	Heródoto, Justiniano, Alejandro Magno, Ibn Battuta, Mark Twain, Pedro Páez, Dorothy Eady, Egeria, Federico Barbarroja, Mahoma, Elio Galo, Alí Bey.
Tercera parte: los pilares de Occidente	Grecia Roma antigua El Camino de Santiago	Aquiles, Helena, Príamo, Héctor, Homero, Ulises, Tucídides, Heródoto, Jenofonte, Pausanias, Eneas, Plinio el Viejo, Pulio Ovidio, Flavio Josefo, Alfonso III.
Cuarta parte: Las conquistas de nuevos mundos	África América descubierta América dorada	Diogo Cao, Bartolomé Díaz, Vasco de Gama, Cristóbal Colón, Américo Vespuccio, Hernán Cortés, López de Gómara, Vasco Núñez de Balboa, Bernal Díaz del Castillo, Álvar Núñez Cabeza de Vaca, Inés Suárez.
Quinta parte: Un viaje sin límites	Siete mares: ciencia y navegación. Los polos Los cielos, la Luna y el desierto	Fernando de Magallanes, Pigafetta, Juan Sebastián Elcano, Roberto de la Grive, Antonio de Ulloa, Jeanne Baret, James Cook, Malaspina, Julio Verne, Yuri Gagarin, Antoine de Saint-Exupéry, Armstrong
Epílogo	Grecia y Roma	Petrarca, Hernando Colón, Piranesi, Richard Lassels, Lord Byron, Stendhal, Schliemann.

* Los viajeros son una selección de todo el conglomerado, no hay orden cronológico en la presentación.

Los desplazamientos en el libro se dieron por diferentes razones: comercio, religión, fe, trabajo, aventura, burocracia o simplemente por necesidad de experiencias. Los seres humanos se mueven y, un mérito del texto que revisamos, es que también se nombren mujeres viajeras. Esto nos permite a las lectoras identificarnos, ya que todas somos viajeras, aunque este ensayo es un catálogo solo de algunas de ellas. Desde Marco Polo hasta Cristóbal Colón, ellos, ellas, fueron los que salieron, navegaron, caminaron e hicieron de su experiencia un conocimiento plasmado en algún escrito o en un discurso cartográfico.

Es por demás destacable que la narrativa concluya con un "viaje sin límites", precisamente porque no hay lugar al que el ser humano no haya podido viajar: desde los mares y el cielo hasta la Luna. Y hay una ruptura en el entendimiento del viajero, pues se pasa de la aventura al conocimiento científico como principal motivador del salir a recorrer la Tierra.

Finalmente, en el epílogo acerca del redescubrimiento de Grecia y Roma, el autor regresa temporalmente a los orígenes de las civilizaciones occidentales, aquellos que percibieron el viaje en el mundo clásico. Es un ir y venir, en desorden temporal, de los mismos viajeros, lo que llega a ser anacrónico, ya que un solo espacio se vive en muchas épocas, a la vez en cada sección. En resumen, destaco para el potencial lector o lectora que *Homo viator* no es ni tiene por objeto ser un libro de historia, es un ensayo divulgativo con pretensiones literarias, pues los viajes no sucedieron como están organizados. Inclusive, no se considera ese conjunto de obras escritas o acontecimientos conocidos como parte de un solo género, de los "diarios de viaje", pues las circunstancias de origen, la intención y los medios de cada texto son profundamente diversos.

Por otra parte, ¿cuál es el lugar de los mapas en las aventuras de los viajeros? Este componente espacial es clave en la propuesta del autor: los viajes son formadores de mapas. "La geografía es un viaje anticipado" (p. 27). Por tanto, aunque el discurso escrito y la imaginación son fundamentales para entender el mundo, sin la producción cartográfica

no se entendería la visibilidad y espacialidad del viaje. Para Pepe Pérez-Muelas, *ver* mapas es una manera de viajar a lugares desconocidos. Mientras que *viajar* es lo contrario a observar mapas, significa *vivirlos* (p. 20).

A medida que avanza la lectura, es evidente dicha postura del autor respecto de la importancia de la espacialidad y los mapas, pues fue el cartógrafo Urbano Monti y su *Tratatto Universale*,[1] quien le inspiró a leer a los viajeros y realizar una geografía vívida con base en ellos. Este cartógrafo nunca salió de Milán, por lo que se basó en los testimonios de otros viajeros para realizar su mapamundi (p. 258). No obstante, parece que el acento se coloca en los relatos y los mapas terminan por ocupar un lugar meramente ilustrativo en el libro. ¿En dónde está la espacialidad que el autor tanto alude? En las palabras escritas, pero la producción cartográfica de su propia mano, o el análisis de algunos ejemplos, es inexistente. El acercamiento en torno a los mapas en la obra no deja de ser de aventura o de estética. No obstante, Pérez-Muelas señala que mirar un mapa significa poseer el territorio, por lo que se mantiene dentro de la postura que el discurso cartográfico es una representación de la realidad donde su valor no radica en la exactitud si no en la mirada, en cómo se lee y se interpreta (p. 179). Preguntemos, nos señala Harley, ¿cómo hacemos "hablar" a un mapa?

Recordemos que los mapas ubican las acciones humanas en el espacio, son una construcción, imágenes cargadas de intenciones, consecuencias y valores culturales (Harley. 2005, p. 61). Por esto el autor admite que es una de las deudas al señalar que "hay que encontrar el mapa adecuado" y esa tarea se la encomienda al lector (Pérez, 2023, p. 23). Queda abierta la invitación al que se sumerja en esas páginas, que realice sus propios *mapas* y *escritos* a través de sus *viajes*, y viceversa, que haga viajes por medio de *mapas* y *lecturas.* (p. 225) Al final, como indica Harley, los mapas también son un texto con la potencialidad de ser leídos, y Pepe Pérez-Muelas ya ha dado el primer paso al crear su propia geografía, caminada, leída e imaginada a través de los viajeros.

María Fernanda Martínez Muñoz
Posgrado en Historia
Universidad Nacional Autónoma México

REFERENCIAS

Harley, J. B. (2005). *La nueva naturaleza de los mapas. Ensayos sobre la historia de la cartografía*. Fondo de Cultura Económica.

Zumthor, P. (1994). *La medida del mundo.* Cátedra.

[1] Planisferio realizado en Milán (1585), insertado por la editorial en la cubierta y en las secciones del libro.

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60870 • RESEÑAS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60870
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Covarrubias, J. E. y Toledo García, I.
(Coords.: 2023).
La modernización porfiriana vista por los viajeros
Serie Historia Moderna y Contemporánea 79.
México: Instituto de Investigaciones Históricas,
Universidad Nacional Autónoma de México
236 pp., ISBN 978-607-30-7389-9

En este libro colaboran nueve historiadores, especialistas en distintas áreas y periodos, desde diferentes trincheras de la investigación, para ofrecerle al lector un poliedro de reflexiones y miradas sobre "la modernización porfiriana vista por los viajeros". Pero ¿qué es la modernización? Remitiéndome al significado de la palabra, alejándome de la teorización y solicitando la ayuda de María Molinar, encontré que modernización es la acción de modernizar, es decir, "dar a algo carácter moderno". Lo que se refiere a aplicar el término moderno "a lo que se beneficia de los últimos avances de la tecnología y la ciencia" (2016, p. 1716).

Hablemos brevemente de los artículos de este libro para averiguar el registro e interpretación sobre qué hicieron los viajeros ingleses, franceses, alemanes, austriacos, españoles, argentinos y estadounidenses, de cómo se beneficiaban de la política, la economía, la sociedad, la industria, la ingeniería hidráulica, la educación, la gimnasia y el periodismo, "de los últimos avances de la tecnología y la ciencia" de fines del siglo XIX y principios del XX en el México de Porfirio Díaz.

Además de coordinar el volumen, José Enrique Covarrubias, investigador del Instituto de Investigaciones Históricas de la UNAM, e Itzel Toledo García, especialista en literatura de viajeros y la relación de México con países europeos durante el porfiriato y la posrevolución, entregan al lector dos textos analíticos, piezas clave, sobre los testimonios europeos de la modernización en el México de Díaz.

Covarrubias inaugura el libro con el texto "Sobre la madurez necesaria para la modernidad. Valoraciones de viajeros en torno al México de la segunda mitad del siglo XIX". Para comprobar la hipótesis lanzada en el título del ensayo, revisa los escritos de dos viajeros franceses, tres británicos, tres alemanes y un austriaco, que le siven para argumentar en qué medida México, a pesar de ser un país joven, había alcanzado la "madurez" necesaria para conseguir la modernidad en política interna y externa, en materia económica, y en el ámbito científico y tecnológico. Lleva al lector a reflexiones importantes sobre cuál era el tipo de "madurez" que les importó destacar a los viajeros dependiendo de su nacionalidad y cultura.

Por su parte, Itzel Toledo García escribió "La modernización durante el Porfiriato desde la perspectiva de los Bryce", tema sobre el que viene trabajando desde hace un lustro aproximadamente. En 2019 entregó a la revista *Estudios de Historia Moderna y Contemporánea de México* la traducción de las cartas que envió Marion Bryce a su madre, en octubre de 1901, mientras realizaba una visita a México al lado de su esposo, James Bryce, miembro liberal del parlamento británico (Toledo, 2019, pp. 363-390). Correspondencia privada que, junto a otras fuentes primarias de autoría del señor Bryce, fue utilizada por la autora[1] para describir las im-

[1] Toledo señala que entre sus fuentes está la correspondencia que James Bryce envió a sus familiares durante su estancia en México en octubre de 1901, así como dos conferencias sobre México impartidas en 1902 y 1903 por James Bryce en Reino Unido, tituladas "The Relations of the Advanced and the Backward Races of Mankind" y "Mexico: the Land and the People", respectivamente. Finalmente analizó el libro

presiones del matrimonio sobre el proceso de modernización en México en cuanto a la industria, la inmigración y la urbanización durante el porfiriato, presentando un país conectado principalmente por el ferrocarril y con una fuerte presencia extranjera.

El historiador y analista de asuntos exteriores, Marcel Sebastián Anduiza Pimentel, dedica su estudio a los viajes del alemán Friedrich Ratzel por México y Estados Unidos.[2] El internamiento del geógrafo en México sucedió años antes del porfiriato, entre 1873 y 1875, pero se incluyeron en este volumen, por la visión geográfica y naturalista que ofrece de un territorio en ruinas, pero en relativa calma,[3] en contraste con el desarrollo económico ferroviario de los Estados Unidos de América. Retomando una idea de Guillermo Zermeño, Anduiza argumenta que, al parecer, Ratzel al publicar sus relatos y reportajes en 1878 al periódico alemán *Kölnische Zeitung,* le estaba entregando algunos lineamientos al nuevo presidente de México, el general Porfirio Díaz, para sacar a México del atraso.[4]

Omar Olivares Sandoval, investigador del Instituto de Investigaciones Estéticas de la UNAM, realiza una análisis iconográfico de un óleo de Thomas Moran (1894), una fotocromía de William Henry Jackson (1884) y una cromolitografía de Henry Wellge (1906), destacando las características técnicas y materiales de cada imagen, así como el intercambio comercial y la reproducción de estas, para explicar cómo, a partir de la tecnología del momento, estos estadounidenses construyeron una visión estereotipada de los lagos, canales y ríos de la ciudad de México que serían o estaban siendo transformados por un sistema hidráulico más complejo y una traza urbana más extensa durante el porfiriato.

Veremundo Carrillo Reveles, interesado en las relaciones de México con América Latina, revisa y analiza el libro *Recuerdos de mi vida diplomática. Misión en México* (1891), de la pluma de Vicente G. Quesada, ministro de Argentina en el gobierno de Porfirio Díaz y representante de esa nación en Washington. Única mirada de la "modernización porfiriana vista por viajeros" proveniente de América Latina que se encuentra en este volumen. Carrillo destaca que Quesada se enfocó en resaltar la estabilidad política, económica y cultural que había alcanzado México en el periodo analizado, para dejar de manifiesto la necesidad de un acercamiento entre México y Argentina, así como de las otras naciones latinoamericanas, para reducir la hegemonía estadounidense en el continente.

Ana Somahono Eres y Claudia Zehrt trabajaron de manera conjunta para explicar las impresiones del británico Alfred Percival Maudslay sobre la sociedad y la industria de México entre 1872 y 1907. Si bien se han dedicado estudios a la labor de Maudslay como arqueólogo en la región maya de nuestro país, y a sus investigaciones sobre la historia prehispánica y colonial de Mesoamérica, no se ha destacado la información contenida en sus escritos sobre el México de fines del siglo XIX. Las autoras se enfocan en explicar en qué medida le interesaron al arqueólogo y diplomático británico los problemas que achacaban a la sociedad mexicana más allá de que sus relatos sean un anecdotario de viaje.

Genevieve Galán Tamés, analiza el papel de la práctica gimnástica en la educación de los cuerpos femeninos en el Colegio de las Vizcaínas. Se centró en esta ocasión en el estudio de la figura y obra del español José Sánchez Somoana, viajero y gimnasta que se desempeñó como profesor de dicha disciplina en el Colegio de las Vizcaínas, entre otros cargos en materia educativa que ocupó durante el porfiriato. El objetivo de la autora es explicar en qué consistió la lectura moderna que Sánchez hizo del cuerpo, apoyándose en los múltiples textos que legó y en los que abordó la importancia del ejercicio en la conformación del cuerpo moderno, calificado por Pablo Scharagrodsky como "esforzado, eficiente, dócil, obediente, aplicado, activo, seguro, decidido, fuerte, vigoroso, voluntarioso, energético, aseado, útil, racional, simétrico, diestro, patriota y

South America: Observations and Impressions, publicado en 1912, producto de un viaje que James Bryce realizó por Sudamérica en 1910.

[2] El autor señala que se basó principalmente en dos traducciones del alemán, una al inglés, editada por Stewart A. Stehlin (1988) y la otra al español, de Friedrich Ratzel (2009).

[3] Después del largo periodo de guerras civiles e intervenciones.

[4] Para más información sobre esta interpretación véase Zermeño Padilla (2010, pp. 85-103).

sano" (Galán, p. 195). También se preocupó en dar a conocer a Sánchez como viajero interesado en registrar los modismos lingüísticos de los mexicanos, en especial de la población indígena, que prevalecía en la sociedad porfiriana.

Margarita Vásquez Montaño cierra el volumen con un artículo ubicado en las postrimerías del periodo, momento en el que se empezaba a desmoronar la imagen de México en el extranjero, cuando empieza a cuestionarse la idea de que este fuera un país desarrollado, bien comunicado y con importantes transformaciones arquitectónicas y sociales. Tal situación la manifiestan con claridad los textos publicados en 1909 por los periodistas socialistas John F. Turner, John Murray y el mordaz caricaturista Carlo de Fornaro, de origen suizo-italiano, radicado en los Estados Unidos de América. La autora entabla una relación y diálogo entre su biografía y escritos para analizar sus trayectorias e ideologías, el origen y objetivo de sus textos, así como la manera en la que abordan la figura de Porfirio Díaz y presentan a México como el país de las contradicciones. Finalmente, diferencia a estos viajeros-periodistas de los viajeros clásicos que solo describían la naturaleza y la sociedad del porfiriato.

Con cada uno de los artículos y la integración de estos en una sola obra, José Covarrubias e Itzel Toledo cumplen su objetivo, la de reducir el hueco existente en la historiografía sobre la visión de la modernización de México por parte de los viajeros europeos y estadounidenses del último cuarto del siglo XIX y la primera década del siglo XX. Cada ensayo ofrece un acercamiento distinto sobre cómo interpretaron los viajeros extranjeros la decisión de Porfirio Díaz de impulsar a México como una nación moderna intentando parecerse a otra, integrando políticas económicas, sociales y culturales prevalecientes en los últimos años en Europa y los Estados Unidos. Pero, a su vez, creando una política especial de modernización con la intención de resolver las problemáticas particulares de México (Costa Pinto, 1980, pp. 149-150), que más tarde, hacia 1910, provocaron el alzamiento armado de la población que no entró en el carro de la modernización porfiriana.

Con esta revisión grupal y analítica de los registros escritos –correspondencia, diarios de viaje, libros, conferencias, reportajes– y no escritos –fotocromías, litografías y pinturas– de los viajeros extranjeros en México, el lector consigue observar y entender la variedad de opiniones acerca del porfiriato y de su proceso de modernización que Occidente tenía en el mismo momento que transcurría este periodo.

Paulina Millán
Instituto Tecnológico y de Estudios
Superiores de Monterrey
Campus Santa Fe

REFERENCIAS

Costa Pinto, L. A. (1980). Modernización: concepto o ideología. *Revista de Estudios Políticos, 14,* 145-152. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=26607

Galán Tamés, G. (2023). El gimnasta viajero. José Sánchez Somoano y sus lecturas modernas del cuerpo. En J. E. Covarrubias e I. Toledo García (coords.), *La modernización porfiriana vista por los viajeros* (pp. 177-201). Serie Historia Moderna y Contemporánea 79. Instituto de Investigaciones Históricas, Universidad Nacional Autónoma de México.

Moliner, M. (2016). *Diccionario de uso del español*. Editorial Gredos.

Ratzel, F. (2009). *Desde México. Apuntes de viaje de los años 1874-1875*. Herder.

Scharagrodsky, P. (2016). Presentación. En Pablo A. Scharagrodsky (comp.), *La invención del homo gymnasticus.* Prometeo Libros.

Stehlin, S. A. (1988). *Sketches of Urban and Cultural Life in North America.* Rutgers University Press.

Toledo Garcia, I. (2019). Maryon Bryce en México (1901). *Estudios de historia moderna y contemporánea de México*, *58*, 363-390.

Zermeño Padilla, G. (2010). Recorridos a través de un país 'tropical': México en la imaginación del geógrafo Friedrich Ratzel. *Jahrbuch für Geschichte Lateinamerikas, 47*(1), 85-103.

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60871 • RESEÑAS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60871
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Covarrubias, M. (2022).
Corrientes del Pacífico
Colección Antítesis 15
Prefacio de Abraham Cruzvillegas.
México: Alias Editorial
43 pp., + 6 mapas, ISBN 978-607-7985-40-2

Relatively unknown to new generations of geographers and historians, Mexican illustrator Miguel Covarrubias (1904-1957) has received more attention in recent years. An excellent example is Mónica Ramirez Bernal's *El océano como paisaje* (Mexico, UNAM, 2018) which recovers the work of Covarrubias and, in particular, links for the first time the ideas of John Brian Harley (1932-1991) to Covarrubias's maps; opens up art history's relationships with these maps; and analyzes the map series in an overview of the Pacific.

Even so, the maps themselves were rarely, if at all, available at a reasonable size that would allow researchers to enjoy these colorful maps and detect the new meanings of the Pacific that Covarrubias offers us. In a risky and unusual investment of two thousand printed copies, the young and independent publisher Alias, from Mexico City, presents the set of Covarrubias's six maps, on sheets of 94 x 58 centimeters each, folded and arranged in a cardboard box, accompanied by a brochure divided into two parts.

The first part of the brochure is an essay by the conceptual artist Abraham Cruzvillegas which situates Covarrubias in 1923 when, as a young man, he entered the publishing business in Manhattan, working as an illustrator for *Vanity Fair*, *The New Yorker, Vogue* and *Fortune*. That editorial space opened new doors to Covarrubias, including for the development of the "Golden Gate International Exposition" project, timed to intersect with the opening of two major San Francisco bridges: the Golden Gate and the Bay Bridge.. Covarrubias arrived in San Francisco with his wife, Rosa Rolando (1895-1970), in August 1938 to finish a series of large-format maps. The wall maps occupied a leading place in the Pacific House, a building designed to convey, on its very walls, the new possibilities of re-discovering the Pacific. Open between February and November 1939, the exposition sought to inform the United States's west coast public about the marine world, the countries, the landscapes, the economies, and the cultures of the Pacific.

The second part of the brochure is a translation, from English to Spanish (by Carmen Plascencia), of the essay by Covarrubias which accompanied the exhibition and which provides detailed descriptions of the variables and colors that Covarrubias considered for each map. He explains that the exposition organizers accepted the recommendation of Carl Sauer (1889-1975), of Berkeley's Department of Geography, regarding the use of Alphons J. van der Grinten's projection (1852-1921), and they removed the continents of Europe and Africa from the base map, in order to focus attention on the Pacific and escape from a Eurocentric perspective. The series of six wall maps begins with the peoples that surround the Pacific Rim and continues with the themes of flora and fauna, art forms, the economy, native dwellings, and means of transportation.

In these maps by Covarrubias there is a historical density, and they open up to the viewer the multiple interactions that constituted the Pacific. They occupy a key place for approaches that seek to broaden the vision towards other ways of thinking about space within conceptual

frameworks such as mobility or ties. These maps offer new units of study and act as starting points for connections and exchanges; they are, in that sense, an incentive to discover the marine world of the Pacific and to understand and visualize the connection between distant geographies of peoples and earth products (agriculture, mining, livestock), which connect micro-scales of analysis and global dynamics under the impulse of new transport by sea and air.

Covarrubias's maps constituted a new reading of the vast space of the Pacific and of its past and present. They served in part to highlight the interaction of San Francisco, California, as a port, with other Pacific regions; function as a visual pedagogy for teaching the interconnections of remote places between America and Asia; and are part of the global project of the United States and its interests in the Pacific, just before the start of World War II.

Héctor Mendoza Vargas
Instituto de Geografía, UNAM

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60873 • RESEÑAS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60873
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Pérez Alcántara, B. D. (Coord.) (2022).
Las carreras de Geografía en México: pasado y presente
México: Ediciones Comunicación Científica
353 pp., ISBN 978-607-99946-2-4

En plena pandemia de la COVID-19, una llamada nos dejó a todos un tanto inquietos. Un investigador, Bonifacio Pérez Alcántara, de la Universidad Autónoma del Estado de México, en su sabático, nos proponía a coordinadores[1] de programas de licenciatura en Geografía, responsables de departamentos de Geografía y a personas de las distintas universidades mexicanas, participar en una obra que recopilase los ires y venires de cada una de las carreras de Geografía existentes en México, desde su respectiva fundación hasta la actualidad. Eran once licenciaturas, de nueve instituciones universitarias las que se habían contemplado, además de la licenciatura en Ciencias de la Tierra que se imparte en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

No nos cabía ninguna duda sobre el interés de esta obra, en particular en un momento en que muchas de las licenciaturas, seguramente a consecuencia de la pandemia, estaban viviendo horas aciagas por la baja demanda escolar y la reducida eficiencia terminal. En cuanto a su objetivo, lo expresa bien el coordinador de la obra, Pérez Alcántara, con una cita de Patricia Gómez Rey: para cambiar "el rumbo de la enseñanza y las prácticas de la geografía en el país" se requiere "conocer sus orígenes e itinerario" (Gómez Rey, 2012, p. 13). Y esta es una de las virtudes de la obra que aquí presentamos y que José Omar Moncada, el historiador de la geografía en México por antonomasia, subraya en el prólogo: por primera vez se reúnen en una obra conjunta "los datos fundamentales del proceso de institucionalización académica de los estudios geográficos en México" (p. 19).

Para su elaboración, Pérez Alcántara nos convocó en varias ocasiones a los 23 autores participantes a discutir de qué forma debíamos orientar los capítulos para que hubiese una cierta homogeneidad en los enfoques, e incluso se llegó a organizar un coloquio virtual de dos días para verificar los avances y apoyarnos mutuamente en detalles que quizás nos pudieron haber pasado inadvertidos, entre otros muchos aspectos. Se quería evitar que las exposiciones fueran un continuo de datos e informaciones o una propaganda sobre las bondades de cada uno de los programas: al contrario, se pretendían exponer fortalezas y debilidades de forma crítica y subrayar la relevancia de los estudios de geografía en México. En este sentido, el subtítulo de la obra es poco alentador. No solamente ha de ser "pasado y presente", sino que debemos seguir construyendo un futuro para esta siempre vieja y nueva disciplina.

El resultado se reflejó en la obra que aquí comentamos. Son doce capítulos, el primero de ellos introductorio sobre el proceso de institucionalización de la geografía en México debido a Pérez Alcántara, Reyes Torres y Gómez Rey (pp. 23-50). A continuación, siguen los capítulos dedicados a cada una de las carreras de Geografía existentes en México, ordenados cronológicamente según su antigüedad: los estudios de Geografía en la Universidad Nacional de México y en la Escuela Nacional de Altos Estudios (1912) –precedentes de la UNAM–, la de la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México (1970), la de la Universidad de Guadalajara (1980), la

[1] El autor de la reseña usa el masculino genérico por razones de economía del lenguaje.

licenciatura en Geografía del Sistema Universidad Abierta y Educación a Distancia (1979 y 1986), la de la Facultad de Ciencias Sociales y Humanidades de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (2002) y, en el mismo año, la de Geografía humana (la única en esta especialidad) de la Universidad Autónoma Metropolitana (unidad Iztapalapa). Tras ella, la de la Universidad Veracruzana (2004), ubicada en la Facultad de Economía; la de la Universidad Autónoma de Guerrero (2008), creada en la Escuela Superior de Ciencias de la Tierra; la licenciatura en Geografía ambiental, también única en su género, en la Universidad Autónoma de Querétaro (2010); la licenciatura en Geografía de la Universidad de Guanajuato (2017). Y, finalmente, las dos más recientes, la de Geografía aplicada, abierta en la Unidad Mérida de la UNAM (2019), y la de Ciencias de la Tierra, en Ciudad Universitaria de la UNAM (2020).

Un mapa de localización de estas licenciaturas (p. 38) nos ofrece una concentración considerable en el centro del país y un extenso desierto académico-geográfico al norte y sur. También, de la lectura se desprende la superioridad de la UNAM sobre las otras universidades públicas de la República en cuanto a recursos disponibles (y presupuesto), a número de estudiantes que ingresan y egresan, a número de profesores contratados, a oferta de materias, y esto se ve con claridad en el caso de los estudios geográficos.[2] En cualquier caso, la historia y la sociología de la ciencia ayudan a explicar ambos aspectos.

En cuanto a lo primero, las preguntas que inmediatamente destacan son: si no hay interés respecto a lo geográfico en otros estados de la República Mexicana, o si esa ausencia es una oportunidad para el desarrollo de nuevas licenciaturas de Geografía. Los estudios de historia de la ciencia han mostrado que, para que se dé el proceso institucionalizador de una disciplina, se requiere de una demanda social que lo incentive. En el caso de la geografía, no siempre se entiende su utilidad, lo que conduce al común e inevitable lamento de los geógrafos,[3] como el que se recoge en el capítulo IV, de Martínez Barragán, Urzúa Soto y Chávez Hernández, de la Universidad de Guadalajara (p. 106 y ss.). En cuanto a lo segundo, el conocido "efecto Mateo", de la sociología de la ciencia, permite entender en cierta manera la superioridad de la UNAM sobre el resto.

A pesar del esfuerzo por conjuntar la estructura de cada uno de los capítulos, la forma de enfocar la propia historia y los datos que cada uno de los autores tenía eran diferentes, por eso su relativa heterogeneidad. En este sentido, hubiera sido bueno un capítulo final que cerrara las exposiciones. Eso no ocurre así y se deja, desafortunadamente, al lector el trabajo de sintetizar aquellos aspectos que permitan la comparación entre unas y otras. Por ejemplo, no se halla siempre una definición de lo que se entiende por geografía, sus objetivos y alcances, ni reflexiones acerca de la oportunidad de abrir tal o cual programa de estudios, ni tampoco se especifica siempre el perfil de ingreso y del de egreso, aspectos todos que ayudarían a entender, en cierta manera, las causas del relativo éxito o fracaso de los distintos programas de licenciatura.

No obstante, todos los capítulos tienen alguna particularidad que los hace interesantes. A lo dicho sobre el capítulo IV de la carrera de Geografía en la Universidad de Guadalajara, interesa el contexto socioeconómico y político que condujo a la fundación del Sistema Universidad Abierta y Educación a Distancia (SUAyED, UNAM) (capítulo V) o el que llevó a incentivar las ciencias sociales en México, como se expone en el capítulo VI, dedicado a la carrera de Geografía en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. En este mismo capítulo se critican, acertadamente, en mi opinión, conceptos como el de "eficiencia terminal", que cuelgan como espada de Damocles sobre los programas de Geografía poco exitosos o eficientes. En el VII, dedicado a la licenciatura en Geografía humana de la UAM-Iztapalapa, se presenta la evolución de

[2] Cuatro de las licenciaturas en Geografía se imparten en dependencias de la UNAM, a saber, la del Colegio de Geografía (Facultad de Filosofía y Letras), la del Sistema Universidad Abierta y Educación a Distancia (SUAyED), la de Geografía aplicada (Escuela Nacional de Estudios Superior Unidad Mérida y Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, Ciudad Universitaria), y eso sin contar la de geohistoria, en la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia (Michoacán).

[3] Véase Gómez Rey (2012).

estos estudios en el ámbito internacional en los últimos años; en el capítulo X, sobre la Geografía ambiental, desde la licenciatura que sobre el tema se abrió en la Universidad Autónoma de Querétaro, y en el apartado XII, sobre Geografía aplicada, en la Unidad Mérida de la UNAM, entre otras muchas bondades.

A pesar del interés de la obra, y de la iniciativa de Pérez Alcántara, hay que señalar los eternos problemas que tenemos en las ciencias sociales, en general, con el presupuesto para la publicación de productos de gran valor, como este libro, que se ha entregado desafortunadamente en una edición modesta, con mapas y tablas a baja resolución, aspectos que no contribuyen a dar realce al conjunto.

Finalmente, esta obra es recomendable para entender parte de la singladura de la Geografía instituida en México, al menos la que se imparte en la enseñanza superior. En ella encontramos numerosos datos que interesarán a los estudiosos de la historia de la geografía y, como ya se ha dicho, permite entender mejor el proceso de su institucionalización en el ámbito nacional.

Pere Sunyer Martín
Departamento de Sociología
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

REFERENCIAS

Gómez Rey, P. (2012). *Las redes de colaboración en la construcción del campo disciplinario de la geografía en la Universidad Nacional Autónoma de México, 1912-1960*. Geografía para el siglo XXI. Serie Textos Universitarios 8. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/33

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60874 • RESEÑAS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60874
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Alcántara Onofre, S. (2021).
El Paisaje
México: Semillero-Seminario de Cultura Mexicana
104 pp., ISBN 978-607-97908-6-8

Quién escribe este pequeño libro es arquitecto, doctor en diseño y profesor de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, especialista en restauración de monumentos y centros históricos, así como arquitecto del paisaje por la Universidad de los Estudios de Génova. Sus proyectos de reestructuración arquitectónica de antiguos y contemporáneos edificios se han llevado a cabo en distintos estados de México y ciudades de Italia. También asesora y evalúa, dentro del comité científico internacional, las candidaturas a paisajes culturales en la lista de patrimonio mundial de la UNESCO.

En esta obra, tal y como su título anuncia, Alcántara Onofre indaga y reflexiona sobre todo lo que engloba el concepto de paisaje, y para ello echa mano de algunas perspectivas filosóficas y otras de geógrafos y artistas italianos. Comienza por definir el término desde una raíz griega: *thorós*, lo que remite al *espectador*, es decir, a quien contempla para conocer la realidad (p. 89), y desde el punto de vista filosófico, nos dice, el espíritu humano –o la conciencia– no particulariza en aspectos del mundo, de modo que toda naturaleza, incluyendo al ser humano, es una totalidad integrada, y así debe comprenderse.[1] Sin embargo, es la percepción del observador que se vuelve singular y convierte lo que mira en sagrado, mientras que sus formas se llaman paisaje (p. 10).

El paisaje y jardín van juntos, porque el jardín es una expresión estética, una recreación del espíritu, una revelación de la naturaleza. En este sentido, el ejemplo puede ser el valle de México, que hace unos 500 años debió haber sido un paraíso, no porque permaneciera intacto o libre de explotación, sino porque había cierto equilibrio con los 1500 kilómetros cuadrados de agua, lo que daba como resultado una armonía estética y una larga y plena habitabilidad como lo muestra el producto que significó el altépetl.[2]

Alcántara propone descomponer el término de paisaje en algunos de sus aspectos constitutivos, por ejemplo, en su arista como naturaleza y, luego, cuando la propia técnica ha intervenido en aquella. En efecto, el paisaje no solo tiene un significado sagrado o un fin cultural de orígenes históricos, también sus motivos son de carácter práctico y ambiental, esto es, el paisaje es ciencia y trabajo, aunque siempre mediados por el espíritu y la estética. Ejemplos de esto son las cuevas de Yagul o la vista panorámica desde Atzompa, ambos en Oaxaca; el paso de Cortés entre los volcanes, los cultivos de nopales en Milpa Alta y los paisajes de la agricultura en Tzintzuntzan.

La actividad, la defensa, la relación y la forma de vida que suceden en un paisaje tienen que ver con la técnica que se vuelve un arte en sí. La agricultura es la técnica por antonomasia, y con el maíz en Mesoamérica, tenemos el gran ejemplo de "responsabilidad comunal" (p. 29), pero también sucede lo mismo con la papa, la cebolla o el cempoalxóchitl, donde el agricultor se vuelve el agente

1 Los filósofos a los que se apega son George Simmel y Joachim Ritter, ambos comparten la visión del paisaje como una totalidad natural y una unidad divina (p. 9-10).

2 Esta obra contiene múltiples imágenes a color de paisajes culturales, obtenidas por el autor, de mapas de la Mapoteca Manuel Orozco y Berra (Tacubaya) y de restauraciones o patrimonios mundiales de la UNESCO, con lo que ejemplifica los diversos componentes del paisaje.

indispensable que completa y define el paisajismo, es su artífice final, y su buena gestión se nota, se expresa, se contempla. Otros ejemplos son el paisaje de Tequila en Jalisco; las chinampas en Xochimilco; los arrozales en Honghe, o el paisaje cafetalero en Colombia. Son estos ejemplos del arte *téchne,* es decir, al proteger y organizar extensos terrenos se cuida la vida misma. Cuando se recrea la natura entonces hay un jardín y este se vuelve metáfora de la tierra misma, mientras que su capacidad creadora o *poiesis* se convierte en el producto que provoca un sentimiento, un estímulo vital (p. 35).

Tenemos, pues, que el jardín es una escala, un diseño, una metáfora, un artefacto; es, ante todo, una dimensión de la naturaleza como artificio humano (p. 45), aunque adquiera la forma de un parque, una ciudad o un sitio arqueológico. Cualquier voluntad de trabajo sobre el espacio vuelve al paisaje algo artificial –en el buen sentido de la palabra–, es decir, es un artificio con componentes ecosistémicos o, únicamente, arquitectónicos, pero, en cualquier caso, siempre es una unidad por efecto de la convivencia social acaecida en él a lo largo del tiempo (p. 78)

También el paisaje es patrimonio, porque guarda identidad y memoria colectiva, su valor está en la necesidad de preservarlo porque determinado sitio contiene historia, relaciones y un entorno ecológico. El paisaje es, así, un "jardín-monumento" o, lo que es lo mismo, una obra de arte. Y la UNESCO estableció los lineamientos para definir la categoría de pasaje cultural para su comprensión, tratamiento y protección. Cada uno tiene sus relaciones y particularidades que incluyen técnica, métodos, entornos naturales, formas de tratamiento específicas, historia, en fin, combinaciones particulares de "cultura y natura".

Además, el paisaje se vincula a la comunidad, de manera que guarda en sí cierta morfología, ecosistemas y patrones bioculturales, lo que da como resultado cierto equilibrio ambiental, valor ecológico y cultural. Algunos ejemplos al respecto son: el bosque de Tequila y la barranca de Río Grande de Santiago en Jalisco; el paisaje cultural cafetero en Colombia; el paisaje carioca en Rio de Janeiro, junto con el Parque Nacional de Tijuca y demás componentes que dan como resultado una sola unidad; el Central Park en Nueva York, el Oasis Al-Ahsa en Arabia Saudita; el paisaje de las olline del Prosecco di Conegliano e Valdobbiadene, o el Sitio Roberto Burle Marx en Brasil, junto con otros aledaños que lo acompañan. Todos son ejemplos de obras creativas, artísticas, de equilibrio ambiental y paleta vegetal, de preservación y uso sostenible.

Alcántara Onofre introduce el análisis sobre su desarrollo, en otras palabras, el paisaje es evolutivo porque puede cambiar en sus usos y funciones, se vuelve, así, una obra abierta para distintas competencias, pero con la condición de contar con cierta regulación y protección para que puedan ser transmitidos sus valores y garantizar su permanencia. En fin, al mismo tiempo que un paisaje está para innovar, también para perdurar en el tiempo, y ambas acciones permiten la evolución en la forma y la materia del paisaje.

Para terminar, es de enfatizar que algunos autores y académicos italianos son incluidos en la inspiración general de la obra y fueron ellos la fuente que enriqueció al autor desde distintos ángulos para estudiar el paisaje. Por ejemplo, la filósofa milanesa Laura Boella, quien trata el paisaje en la obra de Simmel, el arquitecto de jardines y paisajes rurales Lionella Scazzosi, o el escultor romano que vino y trabajó en México con distintos artistas plásticos, Alessandro Tagliolini. Finalmente, Massimo Venturi Ferriolo es un profesor de filosofía en distintas universidades de Milán, Salerno, Urbino y Heildeberg, entre otras, y estudia la relación entre el paisaje, la estética y la ética. Insiste en superar la dicotomía entre la cultura y la natura, enseña que el jardín es la metáfora de las relaciones en el espacio, con toda su belleza y su cuidado y como proyecto a futuro. La metáfora completa, nos dice Venturi, puede ser un anfiteatro griego –no romano, que es cerrado– como un lugar estético donde la escena queda abierta para los ojos de todos, donde va uno a aprender y a tener un buen comportamiento.[3]

Raquel Urroz
Colegio de Estudios Latinoamericanos
Facultad de Filosofía y Letras, UNAM

[3] Symposium Natural City, Ideal Spaces Working Group. https://youtu.be/qAKq9uYDUVU?si=dPhwtlJIgrAkW2pg

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60876 • NOTAS Y NOTICIAS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60876
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Neocolonialismo anarco-capitalista[1,2]

Hace dos años, el multimillonario Richard Branson logró una "victoria" trivial sobre el multimillonario Jeff Bezos en la carrera por llegar al límite de sus respectivos egos. Su carrera espacial fue positiva en cuanto a la cobertura mediática, pero había y hay poco en juego además del derecho a presumir. Nadie colonizará Marte en el corto plazo. La realidad es que, mientras los *playboys* super ricos juegan a ser astronautas con recursos tomados de las arcas públicas, una carrera espacial más preocupante se está desarrollando aquí en nuestro modesto planeta. Inspiradas en las ficciones de Ayn Rand y el festival anual Burning Man, los tecno-libertarios románticos de Silicon Valley buscan "escapar"[3] a los Estados-nación existentes. Insatisfechos con los paraísos fiscales, las comunidades cerradas y su desmesurada influencia política, desean ahora "excluirse" del Estado-nación como tal y construir sus propios Estados privados modelados como corporaciones. El Estado-nación soberano, con sus ciudadanos y elecciones, sería reemplazado por un Estado privado proveedor de servicios en el que los consumidores invierten y compran solo los servicios que desean tener.

Es preocupante, también, que los estrategas contemporáneos de este "escape" están interesados no sólo en la forma de fugarse. Prevén, incluso, el surgimiento de una serie de micro países que producirán su propio sistema legal y político y que competirán por ciudadanos, así como las compañías compiten por consumidores, al reducir los "costos de transacción" eligiendo no participar en un sistema estatal y optar por otro. Uno podría pensar estos como, literalmente, "lugares de mercado". Este proyecto político aplica el lenguaje de la elección en el contexto del mercado y la premisa sobre la competencia como forma natural de las relaciones sociales, como forma de gobierno para sí, todo ello enmascarado bajo la antipolítica y la liberación personal. "No discutas. Construye", aconseja el sitio web de la *Startup Societies Foundation*. ¿Y el lugar donde se está abriendo camino? Honduras.

¿Por qué Honduras? En un planeta en el que la mayor parte de la tierra y el agua están bajo alguna forma de control soberano estatal, los *escapistas* se enfrentaron a un dilema: dónde construir sus nuevos países. Tradicionalmente han seguido una de estas dos opciones: alta mar o países en los que parecen tener asegurada una generosa acogida. Los esfuerzos por colonizar alta mar han sido liderados recientemente por el *Seasteading Institute*, financiado inicialmente por el iconoclasta de Silicon Valley Peter Thiel y dirigido por Patri Friedman, nieto del fundamentalista del libre mercado Milton Friedman. Los problemas ingenieriles y legales han limitado las visiones optimistas de *seasteads*[4] privados balanceándose en el océano, por lo que recientemente las miradas se dirigieron a la Polinesia francesa con la esperanza de crear una "zona marítima" -una especie de zona económica especial oceánica- en una laguna tahitiana. La oposición de

[1] Publicado originalmente en: *The Anarchist Review of Books* #4, 2022, p. 15. Se publica en *Investigaciones Geográficas* con el permiso y la cortesía de su autor.

[2] Traducción del inglés por Gerónimo Barrera de la Torre.

[3] [N. de T.] El autor utiliza la palabra en inglés *exit*, o salida, pero para esta traducción se utiliza "escape" cuyo significado se acerca más al original en inglés.

[4] Refiere a la creación de viviendas permanentes en el océano por fuera de las aguas territoriales de los Estados-nación.

los isleños a la colonización por parte de *bro tech*[5] puso fin abruptamente al proyecto en 2018, pero los *seasteaders* son, a falta de una palabra mejor, resilientes y continúan buscando sitios que colonizar

Algunos *seasteaders* desembarcaron en estas tierras con la esperanza de aprovechar las oportunidades que surgían en Honduras. Allí, después del golpe de Estado militar en 2009, las posibilidades de ciudades privadas y autónomas parecían prometedoras. El nuevo régimen vio con buenos ojos tales proyectos y apremió cambios en la constitución para permitir la creación de tales ciudades en territorio hondureño. Promovidas como "zonas económicas especiales", estas ciudades disfrutarían de una autonomía cuasi soberana en tierras cedidas por el Estado a inversionistas internacionales. Una gran cantidad de capitalistas aventureros (una mezcla de conservadores estadounidenses y en su mayoría hombres blancos, libertarios y tecnólogos a la moda) pronto descendieron, compitiendo por establecer el primer mojón. A pesar de su clamor bienpensante por la "libertad", ninguno de estos inversionistas se resistió a hacer negocios con el régimen corrupto e ilegal del entonces presidente Juan Orlando Hernández. Todo lo contrario. En 2015, *The Seasteading Institute* invitó a Hernández a un evento en San Francisco titulado "Disrupting Democracy" ("Perturbar la democracia"). No se trataba sólo de un caso de falta de entendimiento. Los libertarios alardean sobre la libertad, pero tienen una larga historia de negocios con regímenes autoritarios. El propio Milton Friedman fue asesor y defensor del dictador chileno Augusto Pinochet. Peter Thiel, uno de los primeros patrocinadores financieros del *seasteading*, declaró que "la democracia y la libertad" no eran compatibles, una máxima que ahora ha sido retomada con creciente entusiasmo por varios partidarios de Donald Trump y las legislaturas en los Estados Unidos que intentan anular los derechos básicos de voto. Los libertarios que profesan este *escapismo* pueden hacerse pasar por amantes de la libertad con la intención de experimentar otras formas de gobierno y encontrar una manera más agradable de estar en el mundo, pero a juzgar por las personas con quien eligen hacer negocios, todo parece un tanto superficial. De todos modos, en Honduras varios de estos planes iban y venían con poco éxito. El ejemplo más claro en el que los libertarios estuvieron próximos a construir su ciudad privada libre sujeta a pocos o ningún artículo de la constitución hondureña fue en la isla de Roatán. El proyecto, Roatán Próspera (RP), está respaldado por un grupo heterogéneo de conservadores, tecnólogos libertarios, partidarios del Brexit y capitalistas de riesgo en su mayoría hombres blancos. Su futuro parecía prometedor en 2020, pero con la victoria electoral de Xiomara Castro en noviembre de 2021, la tendencia cambió en contra de los *escapistas* y el futuro del proyecto RP es incierto. Eso no ha impedido que los constructores de RP y sus filiales presenten una demanda contra el gobierno de Honduras ante el Centro Internacional de Arreglo de Diferencias Relativas a Inversiones (ICSID, por sus siglas en inglés). Piden hasta 10 775 millones de dólares en posibles indemnizaciones

La oposición de Castro a estos proyectos es compartida por muchos de sus compatriotas. Es fácil entender por qué. A pesar del entusiasmo con el que estos proyectos se venden como garantes de la libertad, el desarrollo y la descentralización, llenos de promesas sobre mayor seguridad y bienestar, tales experimentos tienen poco que ofrecer a la mayoría de los hondureños, razón por la cual no votaron por ellos. Una vez instaladas, las ciudades privadas libres serían inmunes a la voluntad popular, convirtiéndolas en espacios permanentes y extraterritoriales en tierras hondureñas. Mientras tanto, los hondureños seguían huyendo de la violencia, que no hizo más que empeorar tras el golpe de Estado de 2009. Como transposición sombríamente irónica, los migrantes terminan como "extraterritoriales" en otros lugares, en espacios donde no se les proporciona un estatus legal, mientras que en su país de origen del que se vieron obligados a huir, un grupo de inversores y colonos extranjeros crean un espacio extraterritorial que les otorga un amplio estatus legal autónomo.

Vale la pena señalar que no es solo Honduras el país que tiene que sufrir estos experimentos

[5] [N. del T.] Con "*Bro tech*", el autor señala la conjunción masculinista y clasista de un sector centrado profesionalmente en las tecnologías digitales.

libertarios. Están en todas partes. En 2012, un grupo de libertarios estadounidenses y un aliado chileno formaron *Galt's Gulch* Chile (GCC). El nombre proviene de un refugio capitalista (Galt's Gulch) mencionado en el libro *Atlas Shrugged*[6] de la novelista neoliberal Ayn Rand. Los fundadores de GCC compraron casi 5000 hectáreas en el Valle de Casablanca con la idea de crear su propio refugio libertario. El proyecto pronto implosionó y uno de los principales fundadores, Jeff Berwick, se dirigió a México, donde creó con algunos compatriotas estadounidenses lo que se consideraría la reunión anual anarcocapitalista más grande del mundo: Anarcopulco. En alta mar, en las islas del Pacífico y el Caribe, también hay una variedad de proyectos libertarios similares, financiados por criptomonedas como Bitcoin y ansiosos por colonizar terrenos supuestamente baldíos para construir sus países privados. Vanuatu, Tahití, Guatemala, El Salvador, Puerto Rico... la lista no termina.

Los modelos de ciudad y campo privados y libres deben preocuparnos. Son el siguiente paso lógico en la privatización de la gobernanza a través del mecanismo de la propiedad. Las ciudades privadas planeadas para Honduras no serán libres, en el sentido de que uno podría simplemente elegir participar con los pies, pero no con la billetera. Conllevan un costo monetario real de inversión o compra. No estarían abiertos a todos y no hay derecho a que uno simplemente se una. La inmigración estaría restringida (tanto como la libertad de movimiento) y la riqueza sería un determinante básico de la membresía, tanto que incluso los defensores de la idea admiten que tales ciudades se parecerían menos a ciudades o países y más a "clubes". Una vez que los argumentos de venta, las declaraciones de visión, los graznidos por la libertad y las citas de Ayn Rand, han sido debidamente digeridos, nos quedamos con una verdad descarada: "la ciudad privada libre" es solo otro nombre para un club de campo expansivo, privado y exclusivo en el país de otras personas. La literatura promocional que elogia el *escapismo* libertario a menudo se lee menos como innovación en la gobernanza y más como una cobertura ideológica para una práctica bastante rudimentaria y antigua -el acaparamiento de tierras y agua-, aunque envuelta en el lenguaje de moda de la disrupción y la descentralización. El resultado de estas nuevas formas de *escapismo* territorial no producirá un mundo sin fronteras de abundancia empresarial, sino un mundo de fronteras fortificadas, exceso de privilegios y escasez colectiva

Por repugnantes que sean, las fantasías galácticas de Richard Branson, Jeff Bezos y Elon Musk son una distracción. La carrera espacial que debería atraer nuestra atención es la que se desarrolla ahora mismo en nuestro planeta, en lugares que generaciones de colonizadores e imperialistas, especuladores y estafadores, siempre han procurado para lograr la compra territorial de sus sueños privados: América Central y el Caribe, las islas del Pacífico y alta mar.

Raymond B. Craib
Departament of History
Cornell University

[6] *La rebelión de Atlas.* Existen versiones en español de esta novela, por ejemplo, una reciente en la editorial Ariel de 2022.

Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60877 • NOTAS Y NOTICIAS
Núm. 113 • Abril • 2024 • e60877
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

International Conference:
Water Security for a Sustainable Future
Torre de Ingeniería, UNAM
Coyoacán, Ciudad Universitaria
04510, Ciudad de México
18-20 de octubre 2023

Desde la caída del Muro de Berlín en 1989, el mundo ha atestiguado el resurgimiento de amenazas y riesgos globales como el terrorismo, el crimen organizado, el tráfico ilegal de estupefacientes, personas y mercancías, entre otros, propiciándose así un terreno fértil para que la inseguridad y la vulnerabilidad social sean parte de nuestro cotidiano. Aunado a ello, los efectos de las políticas estructurales y de ajuste presupuestal comandadas por la lógica del mercado, dieron como resultado el abandono sistemático del Estado respecto a sus obligaciones sociales, gracias a la redistribución y concentración de la riqueza. En consecuencia, la incertidumbre e inseguridad han alcanzado lo ambiental, acrecentándose la demanda de un acceso equitativo y eficiente al agua bajo un panorama de escasez.

En este contexto, se justifica el surgimiento de la Seguridad Hídrica como principio rector para el diseño y la ejecución de políticas públicas modernizadoras del sector agua, con el que se pretende revertir la inseguridad y el acceso desigual a este recurso con calidad y cantidad suficientes. Aunque polisémico, la definición de mayor consenso ha sido la de ONU-Agua (2013), que la describe como "la capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenible; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas en un clima de paz y estabilidad política" (ONU-Agua, 2013). En México, la Seguridad Hídrica se ha consolidado adoptando dicho concepto y ya constituye una política de Estado, verificable tanto en el propio *Programa Hídrico Nacional 2018-2024*, también con la puesta en marcha en 2018 del Centro Regional de Seguridad Hídrica (CERSHI), bajo los auspicios de la UNESCO, con sede en la UNAM y, la creación en 2020, del programa de doctorado en Seguridad Hídrica que oferta el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

El CERSHI, la UNAM y la Cátedra UNESCO para la Seguridad Hídrica Sostenible de la Universidad Internacional de Florida (FIU), convocaron a la Conferencia Internacional "Seguridad Hídrica para un futuro sustentable", celebrada en la Torre de Ingeniería de la UNAM, en Ciudad Universitaria, Ciudad de México, del 18 al 20 de octubre de 2023. Esta conferencia tuvo como objetivo identificar y discutir los principales retos que enfrentan los Estados y sus sociedades, para lograr en conjunto una gestión sustentable del agua, bajo el contexto que la Seguridad Hídrica en el presente siglo, así como el respeto a la pluridiversidad social, el reconocimiento y la inclusión de género, hasta el peligro en el sector hídrico frente a los crímenes cibernéticos que atentan el funcionamiento de las instituciones que administran y gestionan el agua.

La conferencia se desarrolló en cinco sesiones plenarias, i) Seguridad Hídrica: perspectivas locales y regionales; ii) Salud humana y ambiental frente al cambio climático; iii) Economía ambiental del agua: la fusión de los sistemas financieros y ambientales, iv) Análisis de modelos de eventos compuestos para la reducción de desastres y v) Edu-

cación y el desarrollo de capacidades para ciudades y comunidades sostenibles. También se incluyeron dos sesiones especiales: "Ciberseguridad: el nuevo desafío informático para el sector hídrico" y "Expandiendo la equidad de género y la diversidad cultural en los planes de seguridad hídrica". Cada día inició con conferencias magistrales de los representantes del gobierno mexicano y del gobierno argentino para posicionar la perspectiva pública de cada país respecto a los retos que enfrenta la construcción efectiva de la Seguridad Hídrica.

Del público, se registró la presencia nutrida de académicos, integrantes de la Red del Agua, UNAM, estudiantes de posgrado, tomadores de decisión del Poder Legislativo federal y funcionarios del sector hídrico del gobierno federal. En cambio, un número reducido de estudiantes de licenciaturas de ingeniería, economía, geografía y urbanismo, también atendieron la conferencia. Vale la pena destacar que, en la sesión de inauguración, el presidente de la Comisión de Recursos Hidráulicos y de Agua Potable del H. Congreso de la Unión, aseguró que la conferencia pondría en la mesa dimensiones estratégicas para una gestión más equitativa del agua, las cuales serían consideradas dentro del planteamiento de la propuesta de expedición de una Ley General de Agua, uno de los principales proyectos de la actual legislatura federal, número LXV.

Si bien esta conferencia de relevancia internacional es merecedora de extensos comentarios, me enfocaré en particular en dos temas de interés para los profesionales de la geografía dedicados al estudio de los problemas y conflictos por el agua. El primero refiere a la discusión que tuvo lugar en la Sesión 1. "Seguridad Hídrica: perspectivas locales y regionales", en la que se presentaron dos funcionarios públicos y un consultor del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). La mesa se propuso discutir los avances para la Seguridad Hídrica cobijados por la política internacional de cooperación científica de los Estados Unidos en materia de agua subterránea, la caracterización socioespacial de las Organizaciones Comunitarias de Servicios de Agua y Saneamiento (OCSAS) en el estado de Morelos y las áreas de oportunidad que el BID ha detectado para el financiamiento de la Seguridad Hídrica en América Latina.

La ponencia del funcionario del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), reveló la importancia que aún tiene la cooperación científica en el aprovechamiento del agua. A través de un caso de éxito reciente en Kenia, el ponente explicó el proceso técnico de cooperación para evaluar científicamente las fuentes de abastecimiento de agua subterránea a través de la percepción remota y su impacto en la planificación y la elaboración de un modelo de gestión sustentable del agua. Si bien fue una presentación técnica, permitió confirmar la tesis planteada por Boccaletti (2022), quien afirma en su obra que uno de los ejes de la intervención estadounidense en los países subdesarrollados ha sido a través de la inserción del modelo territorial de manejo de cuenca desde la Guerra Fría, gracias al Cuerpo de Ingenieros del U.S. Army. Así, en pleno siglo XXI, la alta dependencia tecnológica y la falta de esquemas coordinados para el manejo sustentable del agua subterránea en países pobres, ahora son objeto de la política de cooperación internacional del USGS.

En contraste, el proyecto del IMTA, liderado por una geógrafa mexicana, Alejandra Peña García, para caracterizar socio-espacialmente las OCSAS en Morelos, fue criticado negativamente por quienes soslayan la producción de evidencias para la política pública y los retos que impone el acceso equitativo al agua en los espacios rurales mexicanos. Fue evidente que para quienes han estado involucrados históricamente en el desarrollo de los proyectos hidráulicos nacionales de enorme envergadura, garantizar el derecho humano al agua en las ruralidades es un asunto menor al significar mínimas ganancias si se compara con la producción de los trasvases. Si bien el BID destacó que en América Latina existen aproximadamente 145 000 OCSAS, las cuales producen agua potable para más de 70 millones de habitantes de nuestra región, es evidente que la inversión se concentra en los espacios urbanos.

Por otra parte, la sesión sobre la ciberseguridad abordó un tema novedoso por las implicaciones que tiene para la seguridad nacional. La ponente, titular de la Cátedra UNESCO para la Seguridad Hídrica Sostenible de la FIU, afirmó que los ataques cibernéticos a los sistemas informáticos de

dominio público y privado del agua pueden tener consecuencias insospechadas, como la venta de bases de datos con información de concesionarios de agua, información de contratistas, pudiendo afectar el manejo a distancia de infraestructura hidráulica (sistema de presas, control de inundaciones, potabilización y tratamiento de aguas residuales). Esta prudente sesión coincidió con lo sucedido en 2023 en México, cuando la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) fue objeto de cuatro ataques cibernéticos a sus sistemas informáticos, paralizando así su funcionamiento y poniendo en jaque procedimientos administrativos y, al mismo tiempo, que la información sensible se desplazó hacía desconocidos dentro del entramado de un espacio cibernético, del cual la geografía no se interesa aún por estudiar. De este tamaño es la inseguridad y vulnerabilidad de las instituciones que administran el agua en México.

A manera de reflexión final, para algunos la Seguridad Hídrica, como política de Estado, le estaría restituyendo el histórico dominio y ejercicio del poder sobre los flujos del agua a la ingeniería hidráulica estatal, disminuido precisamente por efecto de las políticas de ajuste estructural. Mientras que, para otros, la justicia hídrica (Boelens *et al*., 2011), como categoría analítica, evidenciaría con mayor precisión temas como la dimensión de la desigualdad socioespacial y territorial en la concentración de derechos de agua, el soslayado reconocimiento a la autonomía de gestión comunitaria con base en los principios de usos y costumbres originarias, entre otros. Estos temas deberían examinarlos especialistas del campo de la geografía política del agua, de la geografía ambiental y del ordenamiento territorial, pues son la expresión de la complejidad donde entra la relación sociedad-agua.

Gonzalo Hatch Kuri
Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra
Universidad Nacional Autónoma de M*éxico*

REFERENCIAS

Boccaletti, G. (2022). *Agua: una biografía* (Margarita Estapé, trad.). Ático de los Libros.

Boelens, R. A., Cremers, L., y Zwarteveen, M. Z. (Eds.) (2011). *Justicia Hídrica: acumulación, conflicto y acción socia*l. Serie Agua y sociedad: Sección justicia hídrica. Instituto de Estudios Peruanos, Fondo Editorial Pontificia Universidad Católica de Perú.

Organización de las Naciones Unidas-AGUA (2013). *Water Security & the Global Water Agenda*. A UN-Water Analytical Brief, United Nations University.