

## Evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos en la región árida de Mexicali, México

### *Assessment and mapping of ecosystem services in the arid region of Mexicali, Mexico*

Sandra E. Ortiz-Acosta\* y Adriana M. Arias-Vallejo\*\*

Recibido: 27/03/2023. Aceptado: 30/06/2023. Publicado: 01/08/2023.

**Resumen.** Aunque el suministro de los servicios ecosistémicos es crítico para la vida en la Tierra, las actividades humanas y los cambios de uso de suelo han modificado la extensión y composición de diversos ecosistemas del mundo, lo que ha derivado en la pérdida de biodiversidad y de los servicios que proveen. Para entender las capacidades de los ecosistemas de suministrar sus servicios se han desarrollado enfoques de evaluación y mapeo, incluyendo las evaluaciones biofísicas que vinculan valores de los servicios ecosistémicos con datos de coberturas y usos de suelo, lo que permite visualizar en mapas las áreas clave que deben mantenerse para asegurar su provisión futura. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar y mapear la oferta potencial de los servicios ecosistémicos prioritarios en la región árida de Mexicali, Baja California. Para alcanzar este objetivo, se realizó una evaluación biofísica a escala regional a través de una adaptación a la metodología matricial de Burkhard, basada en los usos y coberturas del suelo y la consulta de expertos. Se partió de la selección de coberturas de la carta de usos del suelo y vegetación de la serie VII del INEGI de 2018, las cuales fueron reclasificadas en diez coberturas terrestres que se definieron como proxys de los ecosistemas a evaluar, incluyendo diversos tipos de humedales; se seleccionaron nueve servicios ecosistémicos prioritarios, que

incluyeron cinco servicios de regulación, siendo la regulación del clima local, purificación del agua, regulación de flujos de agua, recarga del acuífero y control de la erosión; dos de abastecimiento, incluidos la provisión de alimentos y pesca; y dos servicios culturales, recreación y turismo y educación ambiental. Estos servicios fueron seleccionados por diez expertos elegidos con base en su experiencia o perfil profesional relacionado con la gestión o manejo de los ecosistemas y recursos naturales del área de estudio, y su pertenencia a diversos sectores. Con las diez coberturas terrestres y los nueve servicios ecosistémicos prioritarios, se construyó la matriz que fue evaluada por los expertos; posteriormente se obtuvo la matriz única, cuyos valores de oferta potencial de servicios ecosistémicos se transfirieron a tres mapas de cada categoría (regulación, abastecimiento y culturales) y uno de la provisión potencial total. Los resultados mostraron que los servicios ecosistémicos culturales son los que presentaron mayor potencial de oferta en la región árida estudiada (de potencial medio-alto a máximo). Se encontró que las coberturas terrestres que constituyen alguna categoría de humedal fueron las que presentaron la mayor capacidad total de oferta potencial de servicios del ecosistema (potencial medio-alto a alto), principalmente de servicios culturales y de regulación; además, el humedal

\* Estudiante del Programa de Doctorado en Planeación y Desarrollo Sustentable, Facultad de Arquitectura y Diseño e Instituto de Investigaciones Sociales, Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Arquitectura y Diseño. Blvd. Benito Juárez s/n, Unidad Universitaria Mexicali, 21280, Baja California, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7126-2220>. Correo-e: [eloisa.ortiz@uabc.edu.mx](mailto:eloisa.ortiz@uabc.edu.mx). Autora de correspondencia.

\*\* Profesora Investigadora de Tiempo Completo y Coordinadora del programa de Maestría y Doctorado en Planeación y Desarrollo Sustentable de Facultad de Arquitectura y Diseño e Instituto de Investigaciones Sociales, Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Arquitectura y Diseño. Blvd. Benito Juárez s/n, Unidad Universitaria, Mexicali, 21280, Baja California, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9137-8671>. Correo-e: [adriana.arias@uabc.edu.mx](mailto:adriana.arias@uabc.edu.mx)

río Hardy es la cobertura que tiene mayor potencial total (3.8) para suministrar servicios ecosistémicos y de las de menor superficie (0.23%). Por otro lado, con base en los mapas de distribución espacial de servicios ecosistémicos se observó que un 80.8% de la superficie estudiada presenta una capacidad de oferta potencial media-baja (1.1-2), la que corresponde a las coberturas de matorral desértico micrófilo y agricultura de riego. Adicionalmente, para compensar y reducir las limitantes de la metodología matricial, se calculó la desviación estándar (DS) y se realizó una revisión comparativa con otros trabajos. Se encontró en la DS que el 96% de las respuestas de los expertos tienen un acuerdo medio y alto, mientras que la comparación de los valores de oferta potencial de este trabajo con los de la literatura mostraron tendencias similares. Estos análisis permitieron confirmar la validez de los datos obtenidos y aplicabilidad del enfoque matricial para la evaluación de potenciales de servicios ecosistémicos en la región de estudio. Por último, se concluyó que la metodología matricial de evaluación y mapeo de los servicios ecosistémicos representa una herramienta que puede aplicarse de manera simple y relativamente rápida cuando se dispone de datos limitados. Además, los resultados de este trabajo permitieron identificar áreas clave con alta capacidad potencial de oferta de servicios ecosistémicos, dentro de las que se encuentran humedales remanentes del río Colorado que, aunque su presencia es crítica en un contexto de zonas áridas, su superficie se ha reducido debido a la alteración en la hidrología del delta del río Colorado en México y a cambios de uso de suelo. En este sentido, la información generada constituye un insumo relevante para los tomadores de decisiones y formuladores de políticas que permita identificar acciones de conservación, manejo y ordenamiento de estos ecosistemas presentes en una región árida y que suministran servicios ecosistémicos prioritarios. De esta manera, el presente trabajo con enfoque matricial contribuye a la gestión y planificación sustentable del territorio.

**Palabras clave:** ecosistemas áridos, matriz de Burkhard, gradiente urbano-rural, coberturas terrestres, humedales Ramsar.

**Abstract.** Although the provision of ecosystem services is critical for life on earth, human activities and land use changes have modified the extent and composition of various ecosystems around the world, resulting in the loss of biodiversity and the services they provide. To understand the capacities of ecosystems to provide their services, assessment and mapping approaches have been developed, including biophysical assessments that link ecosystem service values with land cover and land use data, allowing the visualisation on maps of key areas that need to be maintained to ensure their future provision. Therefore, the objective of this research was to assess and map the potential supply of priority ecosystem services in the arid region of Mexicali, Baja California. To achieve this objective, a regional-scale biophysical assessment was carried out through an adaptation of Burkhard's matrix methodology, based on land use and land cover and expert consultation. The starting point

was the selection of land covers from INEGI's land use and vegetation map series VII (2018), which were reclassified into ten land covers that were defined as proxies for the ecosystems to be assessed, including various types of wetlands; nine priority ecosystem services were selected, which included five regulating services, being local climate regulation, water purification, water flow regulation, aquifer recharge and erosion control; two provisioning services, including food supply and fisheries; and two cultural services, recreation and tourism and environmental education. These services were selected by 10 experts who were chosen based on their experience or professional profile related to the management of ecosystems and natural resources in the study area, and their membership of various sectors. With the ten land covers and the nine priority ecosystem services, the matrix was constructed and evaluated by the experts; subsequently the single matrix was obtained, whose values of potential supply of ecosystem services were transferred to three maps of each category (regulation, provisioning and cultural) and one of the total potential supply. The results showed that cultural ecosystem services had the highest potential supply in the arid region studied (from medium-high to maximum potential). It was found that the land covers that constitute some category of wetland were those that presented the greatest total capacity for the potential supply of ecosystem services (medium-high to high potential), mainly for cultural and regulation services; in addition, the Río Hardy wetland is the cover that has the greatest total potential (3.8) to supply ecosystem services and of those with the smallest surface area (0.23%). On the other hand, based on the maps of spatial distribution of ecosystem services, it was observed that 80.8% of the studied area has a medium-low potential supply capacity (1.1 -2), which corresponds to the coverages of microphilous desert scrub and irrigated agriculture. Additionally, to compensate for and reduce the limitations of the matrix methodology, the standard deviation (SD) was calculated and a comparative review with other works was carried out, finding in the SD that 96% of the experts' answers have a medium and high agreement, while the comparison of the potential supply values of this work with those of the literature showed similar trends. These analyses confirmed the validity of the data obtained and the applicability of the matrix approach for the assessment of ecosystem service potentials in the study region. Finally, it was concluded that the matrix methodology for the assessment and mapping of ecosystem services represents a tool that can be applied simply and relatively quickly when limited data are available. Furthermore, the results of this work allowed the identification of key areas with high potential capacity for ecosystem service provision, including remnant wetlands of the Colorado River, which, although their presence is critical in an arid zone context, their area has been reduced due to altered hydrology of the Colorado River Delta in Mexico and changes in land use. In this sense, the information generated constitutes a relevant input for decision makers and policy makers to identify conservation, management and planning actions for these ecosystems present in an arid region and which provide priority ecosystem services. In this way, the present

work, with a matrix approach, contributes to the sustainable management and planning of the territory.

**Keywords:** Arid ecosystems, Burkhard matrix, urban-rural gradient, land cover, Ramsar wetlands.

## INTRODUCCIÓN

La vida humana en la Tierra ha sido posible gracias a la relación sociedad-naturaleza, expresada en los sistemas socio-ecológicos (Balvanera *et al.*, 2011), en la que los ecosistemas, que poseen valores intrínsecos, adquieren un valor instrumental al beneficiar consciente o inconscientemente a las personas, dando lugar a los servicios ecosistémicos (Costanza *et al.*, 2017). En este sentido, los servicios de los ecosistemas son definidos como las características, funciones o procesos ecológicos que directa o indirectamente contribuyen al bienestar humano, es decir, los beneficios que las personas obtienen del funcionamiento de los ecosistemas (Costanza *et al.*, 2017; EM, 2003).

Entre las clasificaciones más utilizadas de los servicios ecosistémicos se encuentra la propuesta por la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EM, 2003), que incluye cuatro categorías: aprovisionamiento o suministro, los cuales son productos obtenidos directamente de los ecosistemas; regulación, que principalmente se obtienen de forma indirecta de los procesos de los ecosistemas; culturales, que se constituyen por los beneficios intangibles obtenidos de la interacción con los ecosistemas, y de soporte o de base, que son aquellos servicios necesarios para la producción de los demás servicios del ecosistema.

Aunque la presencia de los servicios ecosistémicos es crítica para el mantenimiento de la vida en la Tierra y la integridad de los ecosistemas (Mamat, Halik y Rouzi, 2018), las actividades humanas han producido cambios en los paisajes y alterado los ecosistemas (Belay, Melese y Senamaw, 2022; Wang *et al.*, 2022). La urbanización representa un factor que impulsa cambios en el paisaje y en los usos de suelo, como consecuencia de la expansión espacial que se requiere para albergar a las poblaciones en crecimiento, sus medios de subsistencia y estilos de vida (Tian *et al.*, 2020; Manley *et al.*, 2022). Estos

cambios en el uso del suelo impactan de manera significativa en la extensión y composición de bosques, humedales, pastizales, cuerpos de agua y de diversos ecosistemas en el mundo (Polasky *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2022), lo que deriva en una pérdida de biodiversidad y en la alteración de sus funciones y procesos ecológicos, impactando a su vez en los bienes y servicios que los ecosistemas suministran (Chatterjee *et al.*, 2022).

Para entender las capacidades de los ecosistemas de suministrar sus servicios, así como la distribución espacial de estos, se han desarrollado diversos enfoques de evaluación y mapeo, favorecidos con los avances en las técnicas de modelación y de los sistemas de información geográfica (Burkhard *et al.*, 2012). La distribución y valores de los servicios ecosistémicos generalmente se vinculan con datos de coberturas y usos de suelo, por lo que el mapeo de servicios permite visualizar áreas clave que deben mantenerse para asegurar su provisión futura, y representa una poderosa herramienta en la formulación de políticas ambientales de planeación sustentable del territorio (Martínez y Balvanera, 2012; Swetnam *et al.*, 2011).

En este sentido, Martínez y Balvanera (2012) realizaron una revisión exhaustiva de enfoques metodológicos de mapeo, en la que identificaron tres enfoques principales; estos incluyen la valoración monetaria de servicios ecosistémicos y su transferencia a mapas de coberturas terrestres; otro se basa en la valoración y percepción social a través de encuestas de preferencia, que son integradas a datos biofísicos para su transferencia a mapas; mientras que en el último enfoque, las evaluaciones socioecológicas o biofísicas permiten la integración de variables ecológicas medibles y variables sociales para cuantificar y mapear el suministro de servicios ecosistémicos y su distribución espacial.

En términos generales, los mapas de servicios ecosistémicos subyacen conceptual y metodológicamente a alguno de los enfoques mencionados, sin embargo, la selección de un enfoque metodológico dependerá de varias consideraciones, incluyendo el objetivo de estudio, el tipo o categoría de servicios ecosistémicos, la escala espacial de análisis y la disponibilidad de datos (Maes *et al.* 2012; Martínez y Balvanera, 2012).

El presente trabajo utilizó un enfoque de evaluación biofísica a escala regional, a través de la metodología conocida como matriz de expertos o matriz de Burkhard, que permite evaluar y mapear la capacidad de suministro de servicios ecosistémicos mediante una modelación matricial que requiere datos como el tipo de coberturas terrestres y la selección de servicios ecosistémicos relevantes, los cuales son valorados por expertos con base en su experiencia y conocimiento, lo que puede ser complementado con otras fuentes (Burkhard *et al.*, 2009; Jacobs *et al.*, 2015). Esta metodología fue seleccionada por ser apropiada para escalas regionales y puede realizarse en áreas donde la disponibilidad de datos es limitada o con fuentes de información dispersas (Wangai *et al.*, 2018; Hattam *et al.*, 2021); además de que es eficiente y adaptable, generando resultados científicamente sólidos que contribuyen a la investigación transdisciplinaria de servicios ecosistémicos incluyendo en regiones áridas como la del presente trabajo (Jacobs *et al.*, 2015).

El objetivo de este estudio fue evaluar la oferta potencial de los servicios ecosistémicos prioritarios en Mexicali, Baja California, a partir de una adaptación de la metodología de Burkhard basada en los usos y coberturas del suelo y la consulta de expertos, así como analizar la distribución espacial de la oferta potencial de los servicios ecosistémicos prioritarios de regulación, abastecimiento y culturales en Mexicali.

El área de estudio seleccionado se encuentra en un gradiente urbano-rural ubicado dentro del municipio fronterizo de Mexicali, Baja California, que cuenta con una población de 1 049 792 de habitantes y se localiza en una región árida con escasas precipitaciones y temperaturas promedio en verano de 38 a 40 °C, con máximas de 52 °C (INEGI, 2020; Ayuntamiento de Mexicali, 2007). En contraste, el área se encuentra rodeado por diferentes ecosistemas que componen al paisaje, incluidos el desierto, un valle agrícola, ríos, canales, drenes, dunas, cerros y montañas, así como diversos tipos de humedales remanentes pertenecientes al sitio Ramsar 1822 (Márquez y Peters, 2008; Zamora *et al.*, 2005). Este trabajo de investigación pretende contribuir al análisis de los servicios ecosistémicos de las regiones áridas, semiáridas o con algún tipo

de aridez, que en México representan el 63% de su superficie y en las que habitan alrededor del 41% de la población del país (Díaz *et al.*, 2011).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción de la zona de estudio

El presente análisis se realiza dentro del municipio de Mexicali, localizado en la región árida del Desierto Sonorense, al noroeste de México. La superficie de estudio es de 1 913.81 km<sup>2</sup>, la cual abarca un gradiente urbano-rural que incluye la zona urbana de Mexicali, así como localidades ubicadas dentro del valle agrícola del mismo nombre, considerado como una de las zonas agrícolas más importantes de México gracias al uso de agua de riego proveniente del río Colorado (Sosa y Sánchez, 2007; Cortez, 2011). El río Colorado, que es parte de una cuenca binacional entre México y Estados Unidos, es administrado dentro de la Región Hidrológica Río Colorado No. 7, integrada por ocho subcuencas, incluidas la de río Nuevo, Cerro Prieto y río Hardy (Programa Ordenamiento Ecológico Municipio Mexicali, 1999; INEGI, 1984), las cuales se utilizaron para delimitar el área de estudio de la presente investigación (Figura 1).

Por otro lado, el área de estudio se encuentra en la región florística del Desierto Central Sonorense, subregión Desierto Micrófilo, con una cobertura forestal dominada por matorral desértico micrófilo, vegetación de desiertos arenosos y vegetación de humedales remanentes y cuerpos de agua (CONAFOR, 2014; Programa Ordenamiento Ecológico Municipio Mexicali, 1999), los cuales forman parte del hábitat ribereño del Delta del Río Colorado en México (Zamora *et al.*, 2005) (Figura 2).

### Procedimiento metodológico

La matriz de Burkhard permite evaluar y mapear la oferta potencial de servicios ecosistémicos prioritarios. Esta es una metodología con enfoque matricial que requiere la entrada de datos como los servicios ecosistémicos relevantes (eje de las "x"), y de las coberturas terrestres que suministran tales servicios (eje de las "y"), los cuales son valorados por expertos

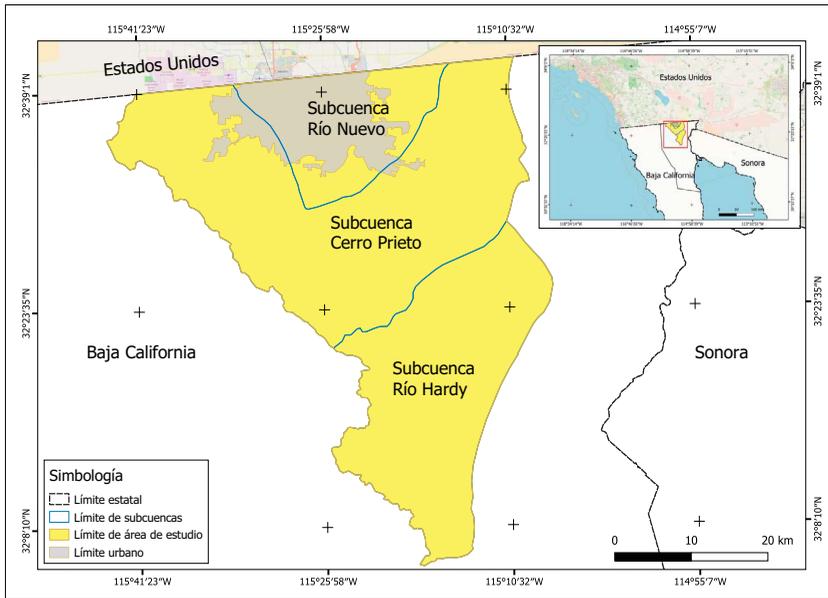


Figura 1. Localización del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

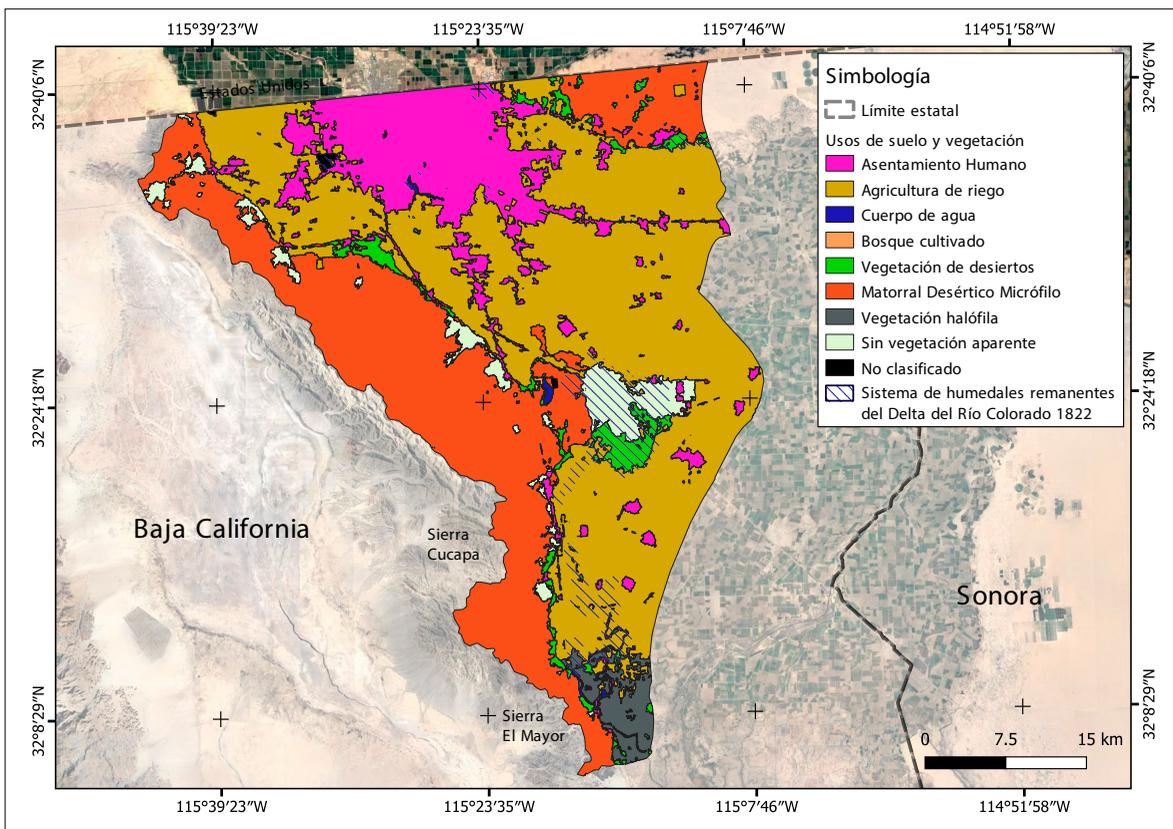


Figura 2. Usos de suelo y vegetación en el área de estudio. Fuente: elaboración propia con base en Carta de usos de suelo y vegetación escala 1:250000 Serie VII del INEGI (2018).

con base en su experiencia y conocimiento en el área de estudio (Burkhard *et al.*, 2009; Wangai *et al.*, 2018; Zhang y Muñoz, 2019). Con base en lo anterior, la presente investigación desarrolló una adaptación metodológica considerando los objetivos y particularidades del área de estudio, tomando como referencia trabajos de diversos autores que utilizan este enfoque (Palma *et al.*, 2019; Wangai *et al.*, 2018; Zhang y Muñoz, 2019; Montoya *et al.*, 2017; Burkhard, Kandziora, Hou y Müller, 2014). La Figura 3 muestra el proceso metodológico de la presente investigación.

### Selección de servicios ecosistémicos prioritarios

La selección de los servicios ecosistémicos por evaluar se realizó en dos etapas: en la primera, se

elaboró un listado de 27 servicios ecosistémicos identificados en la literatura y se definieron con base en la Clasificación Internacional de Servicios Ecosistémicos V5.1 (CICES, por sus siglas en inglés) de Haines y Potschin (2018); en la segunda etapa, se trabajó con los expertos a quienes se les envió un cuestionario en línea con la lista de los 27 servicios preseleccionados, y se les pidió que seleccionaran nueve de estos que con base en su conocimiento y experiencia fueran prioritarios para evaluar su oferta potencial en Mexicali y su valle.

Se determinó que fueran nueve los servicios a elegir, como estrategia para focalizar el ejercicio de evaluación en aquellos que los expertos consideran con mayor nivel de importancia por el bienestar que proporcionan en el área de estudio. Los servi-

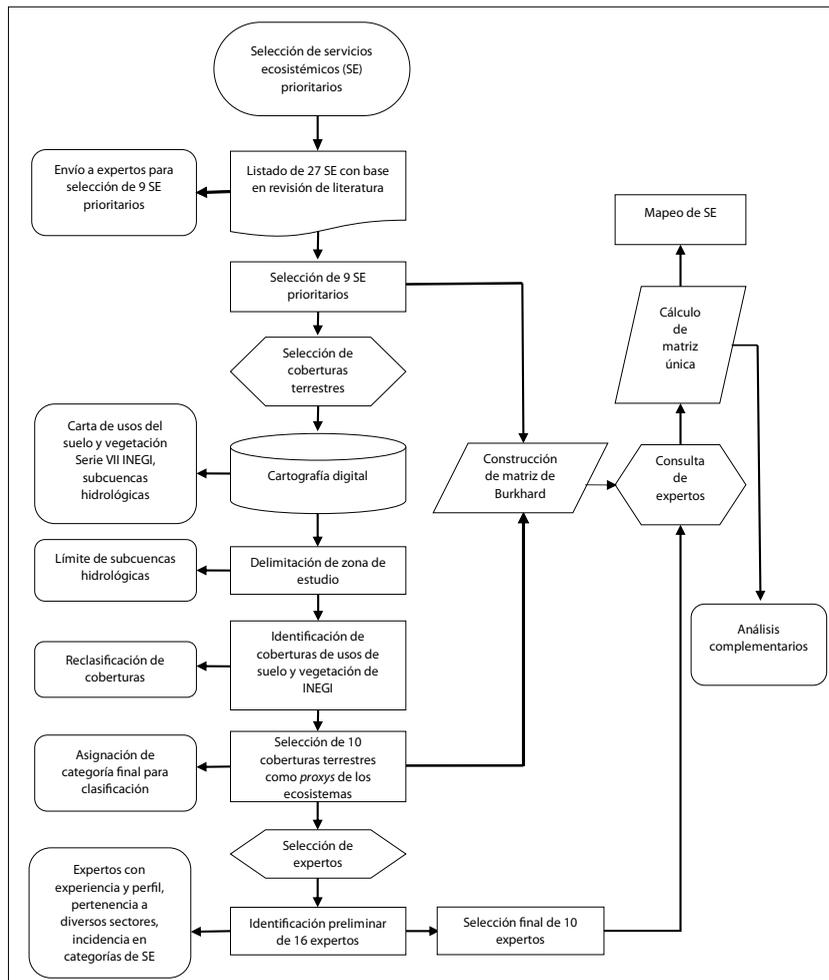


Figura 3. Metodología para evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos. Fuente: elaboración propia.

cios elegidos fueron cinco de regulación, siendo la regulación del clima local, purificación del agua, regulación de flujos de agua, recarga del acuífero y control de la erosión; dos de abastecimiento, incluidos la provisión de alimentos y pesca; y dos servicios culturales, recreación y turismo y educación ambiental.

#### Selección de coberturas terrestres

En el presente trabajo se utilizó como base de clasificación la Carta de usos del suelo y vegetación de la serie VII del INEGI (2018) a escala 1:250 000, en formato vectorial, en la que se identificaron las clases de coberturas de suelo y vegetación o coberturas terrestres (usos de suelo y vegetación) presentes en el área de estudio, las cuales se tomaron como *proxys* de los ecosistemas a evaluar. Se consideró conveniente el uso de la cartografía del INEGI ya que sus unidades de clasificación son adecuadas para los objetivos de este trabajo; además, se encontró que otras investigaciones realizadas en Latinoamérica (Montoya *et al.*, 2017; Palma *et al.*, 2019) basan su análisis en el uso de clasificaciones oficiales nacionales o regionales para evaluar servicios ecosistémicos clave (Burkhard *et al.*, 2009; Burkhard *et al.*, 2012).

Posteriormente a la identificación de las principales coberturas terrestres de la clasificación original

de la serie VII del INEGI (2018), se procedió a establecer criterios para determinar las coberturas finales que fueron evaluadas. Estos criterios consistieron en: a) agrupar coberturas específicas dentro de una misma categoría general; b) algunas coberturas generales se desagregaron y renombraron en coberturas más específicas para su evaluación, y c) algunas coberturas de la clasificación de INEGI se dejaron fuera ya que no eran objetivo del presente estudio. En total se identificaron diez coberturas terrestres que se enlistaron y se describieron de acuerdo con sus principales características. Cabe mencionar que a la mayor parte de las coberturas se les asignó un nombre común o conocido en el área de estudio para facilitar su identificación y reconocimiento por parte de todos los expertos (Tabla 1).

#### Selección de expertos

Los expertos consultados fueron aquellos que contaban con experiencia o perfil profesional en las áreas de restauración ecológica, hidrología, planeación territorial, gestión y manejo del agua, ecoturismo, agroecosistemas y ecosistemas estuarinos, pertenecientes a los sectores academia, organizaciones de la sociedad civil, consultores, empresarial, y gobierno federal, estatal y municipal. Inicialmente se consultó su disponibilidad a un grupo de 16 expertos que cumplieron con los

Tabla 1. Reclasificación de coberturas terrestres (ecosistemas).

ID	Clasificación INEGI serie VII		Clasificación estudio	
	Usos de suelo y vegetación	TIP_INFO	Coberturas terrestres / ecosistemas	Superficie (%)
1	Cuerpo de agua	Complementaria	Bosque de la ciudad*	0.01
2	Cuerpo de agua	Complementaria	Lagunas México-Xochimilco-Campestre	0.06
3	Asentamientos humanos	Complementaria	Asentamientos humanos	14.96
4	Agricultura de riego anual	Agrícola-pecuaria-forestal	Agricultura de riego	46.18
	Agricultura de riego anual y semipermanente	Agrícola-pecuaria-forestal		
	Agricultura de riego permanente	Agrícola-pecuaria-forestal		
5	Matorral desértico micrófilo	Ecológica-florística-fisonómica	Matorral desértico micrófilo	29.37
	Vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico micrófilo	Ecológica-florística-fisonómica		

Tabla 1. Continuación.

ID	Clasificación INEGI serie VII		Clasificación estudio	
	Usos de suelo y vegetación	TIP_INFO	Coberturas terrestres / ecosistemas	Superficie (%)
6	Vegetación de desiertos arenosos	Ecológica-florística-fisonómica	Vegetación de dunas	2.99
	Vegetación secundaria arbustiva de vegetación de desiertos arenosos	Ecológica-florística-fisonómica		
7	Cuerpo de agua	Complementaria	Humedal artificial Las Arenitas	0.07
8	Bosque cultivado	Agrícola-pecuaria-forestal	Bosque de mezquites	0.03
9	Cuerpo de agua	Complementaria	Río Hardy	0.23
10	Vegetación halófila hidrófila	Ecológica-florística-fisonómica	Vegetación de suelos salinos (vegetación del alto estuario)	2.17
	Vegetación halófila xerófila	Ecológica-florística-fisonómica		
	Vegetación secundaria arbustiva de vegetación halófila xerófila	Ecológica-florística-fisonómica		
11	Acuícola, Desprovisto de vegetación, sin vegetación aparente, cuerpo de agua, pastizal cultivado y pastizal inducido	Ecológica-florística-fisonómica / Complementaria	Coberturas no incluidas/descartadas	3.92

\* El bosque de la ciudad se clasifica en la serie VII del INEGI como cuerpo de agua debido a que esta cobertura representa un parque urbano de la ciudad de Mexicali compuesto por un lago, áreas verdes e infraestructura recreativa.

Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2018).

criterios mencionados. Sin embargo, fueron diez expertos los que mostraron su disponibilidad y compromiso para participar en la evaluación de servicios ecosistémicos.

#### *Construcción de matriz de Burkhard y consulta de expertos*

La matriz de evaluación de oferta potencial o matriz de Burkhard se construyó a partir de los nueve servicios ecosistémicos prioritarios y las coberturas terrestres seleccionadas. Se tomó como referencia la definición de Burkhard *et al.* (2012), que establece que la oferta potencial de servicios ecosistémicos de un determinado ecosistema sería “el rendimiento máximo hipotético de los servicios seleccionados” (p. 18).

Para obtener los resultados de la evaluación de oferta potencial de los servicios ecosistémicos me-

dante el llenado de las matrices de evaluación, se procedió a contactar a los expertos de dos maneras; la primera fue a través de la realización de un taller presencial el día 14 de septiembre del 2022, en el que los expertos llenaron de manera individual las matrices, y la segunda fue por vía electrónica, enviando un cuestionario que contenía la matriz e información complementaria. En ambos casos, se les otorgó a todos los expertos la misma información e instrucciones para su correcto llenado.

#### *Cálculo de matriz única de oferta potencial de servicios ecosistémicos*

Una vez obtenidas las matrices evaluadas por los expertos, en las que se asignaron valores de oferta potencial de 0 a 5 basados en la escala propuesta por Burkhard *et al.* (2014) (0, no hay capacidad relevante; 1, capacidad relevante baja; 2, capacidad

relevante; 3, capacidad relevante media; 4, capacidad relevante alta, y 5, capacidad relevante muy alta), se procedió a integrar una matriz única en la que se promediaron los valores asignados a cada entrada. Con base en los resultados de la matriz única se definieron seis rangos tomando como referencia lo reportado por Montoya (2018) y Montoya *et al.* (2017), y se realizó una adaptación para el presente trabajo considerando el contexto climático árido de la región de estudio y que la mayor parte de los ecosistemas o coberturas evaluadas se encuentran influenciadas bajo diversos niveles de impactos y alteraciones humanas (Tabla 2).

Adicionalmente, para determinar la consistencia de los valores de los expertos obtenidos en la matriz única, se realizaron dos análisis complementarios: 1) cálculo de variabilidad de respuestas (desviación estándar), y 2) revisión y comparación de valores de matriz de expertos con los reportados en otros estudios.

#### *Mapeo de oferta potencial de servicios ecosistémicos*

El mapeo de servicios ecosistémicos se generó con base en los valores de oferta potencial obtenidos en la matriz única, los cuales se trasladaron a un mapa de las coberturas terrestres evaluadas. El mapa de coberturas en formato vector se transformó a formato ráster a través del programa QGIS versión 3.16.6 Hannover. Se generaron mapas ráster de provisión potencial de servicios para cada categoría (regulación, abastecimiento y culturales) y uno de la provisión potencial total, los cuales se reclasificaron para asignarles los rangos de la escala de evaluación potencial.

## RESULTADOS

### **Evaluación de oferta potencial de servicios ecosistémicos**

#### *Matriz única de expertos*

Se generó la matriz única de expertos a partir de los promedios de los valores asignados por los expertos en cada entrada de la matriz, que representan la oferta potencial de servicios ecosistémicos en Mexicali y su valle (Tabla 3). Los resultados se

Tabla 2. Rangos de oferta potencial.

0	0.4	No hay potencial relevante
0.5	1	Potencial bajo
1.1	2	Potencial medio-bajo
2.1	3	Potencial medio-alto
3.1	4	Potencial alto
4.1	5	Potencial máximo

Fuente: elaboración propia.

interpretaron con base en los seis rangos de oferta potencial de la Tabla 2.

De la matriz única de expertos, se encontró que en cuanto al valor total de provisión potencial de servicios ecosistémicos de las coberturas evaluadas, la única que obtuvo un potencial alto fue el río Hardy (3.8); le siguieron aquellas coberturas con potencial medio-alto como las lagunas México-Xochimilco-Campestre (2.4) y el bosque de la ciudad (2.3); por su parte, la mayor parte de coberturas obtuvieron un potencial medio-bajo, entre las que se encuentran la agricultura de riego (2.0), el matorral desértico Micrófilo (1.9), el bosque de mezquites (1.8) y la vegetación de dunas (1.4); mientras que la cobertura de asentamientos humanos obtuvo un potencial bajo (0.7). Por otro lado, se observó que, en las tres coberturas con mayor capacidad de suministro, los servicios ecosistémicos culturales son los que tienen mayor potencial de suministro.

En cuanto al análisis de los resultados por categoría de servicios ecosistémicos, se encontró que en los servicios de regulación las coberturas que tienen mayor capacidad o potencial alto de suministro son el río Hardy (3.9) y el humedal artificial de Las Arenitas (3.4), con potencial alto y máximo en el suministro de servicios de regulación de flujos de agua, purificación del agua y recarga del acuífero. Con respecto a este último servicio, la agricultura de riego es otra cobertura con un potencial máximo de su oferta. El servicio de regulación del clima local es principalmente suministrado por el bosque de la ciudad, el río Hardy, el matorral desértico micrófilo, las lagunas México-Xochimilco-

Tabla 3. Matriz única de evaluación de potenciales de servicios ecosistémicos.

Coberturas de suelo y vegetación (ECOSISTEMAS)	Servicios Ecosistémicos												
	Regulación						Abastecimiento			Culturales			
	Regulación de clima local	Purificación de agua	Regulación de flujos de agua	Recarga del acuífero	Control de erosión	Provisión potencial de servicios de regulación	Provisión de alimentos	Pesca	Provisión potencial de servicios de abastecimiento	Recreación y turismo	Educación ambiental	Provisión potencial de servicios culturales	Total de provisión potencial de servicios ecosistémicos (promedios)
1 Bosque de la ciudad	3.9	1.2	1.8	1.4	1.9	2.0	0.5	0.8	0.7	4.4	3.9	4.2	2.3
2 Lagunas México-Xochimilco-Campestre	3.3	1.7	3.2	2.8	2.0	2.6	1.1	1.3	1.2	3.4	3.4	3.4	2.4
3 Asentamientos humanos	0.4	0.5	0.5	0.1	0.4	0.4	0.5	0.0	0.3	1.5	1.5	1.5	0.7
4 Agricultura de riego	2.0	0.8	2.0	4.1	2.4	2.3	4.8	0.2	2.5	1.0	1.3	1.2	2.0
5 Matorral desértico micrófilo	3.4	1.0	1.5	1.8	3.4	2.2	1.7	0.0	0.9	2.5	2.9	2.7	1.9
6 Vegetación de dunas	2.1	0.7	0.6	1.4	2.6	1.5	1.0	0.0	0.5	2.6	2.1	2.4	1.4
7 Humedal artificial Las Arenitas	2.9	3.8	3.9	3.7	2.5	3.4	0.4	0.2	0.3	1.6	3.3	2.5	2.0
8 Bosque de mezquites (Las Arenitas)	3.2	1.9	1.1	2.0	3.7	2.4	1.4	0.0	0.7	1.5	3.2	2.4	1.8
9 Río Hardy	3.9	3.6	4.7	4.2	3.2	3.9	3.2	3.5	3.4	4.5	4.0	4.3	3.8
10 Vegetación de suelos salinos	1.6	1.9	0.9	0.9	2.6	1.6	1.2	0.9	1.1	2.0	2.7	2.4	1.7

Fuente: elaboración propia basado en Montoya *et al.* (2017) y Montoya (2018).

Campestre y el bosque de mezquite, por lo que estas coberturas tienen en común la presencia de algún tipo de vegetación arbórea o arbustiva, y en algunos casos, su asociación con cuerpos de agua. Por su parte, el servicio de control de la erosión es principalmente suministrado por el bosque de mezquites. La cobertura con menor capacidad de suministro de los servicios de regulación es la de asentamientos humanos.

Respecto a los servicios de abastecimiento, la cobertura con mayor capacidad de suministro es el río Hardy (3.4), principalmente para el servicio de pesca, mientras que en el servicio de provisión de alimentos la cobertura de agricultura de riego es en la que presenta un potencial de suministro máximo. A excepción de estas dos, el resto de las coberturas evaluadas obtuvieron bajo potencial de oferta de los servicios de abastecimiento, además,

el servicio de pesca fue el único servicio en el que más de la mitad de las coberturas mostraron valores de potencial no relevante (0-0.4), en particular en aquellas donde no existen cuerpos de agua que permitan su obtención.

En cuanto a los servicios culturales se identificaron tres coberturas con alto y máximo potencial de oferta tanto del servicio de recreación y turismo como el de educación ambiental, estas coberturas fueron el río Hardy (4.3), el bosque de la ciudad (4.2) y las lagunas México-Xochimilco-Campestre (3.4); de igual manera, el humedal artificial Las Arenitas y el bosque de mezquite fueron evaluados con una capacidad alta de oferta del servicio de educación ambiental. El resto de las coberturas evaluadas presentaron potencial medio bajo y medio alto para el suministro de los servicios culturales en la región de estudio. La categoría de servicios culturales fue la que obtuvo mayores valores de oferta potencial de servicios ecosistémicos en el área de estudio.

#### *Análisis complementarios de consistencia de datos de matriz única*

Para determinar la consistencia de los valores de los expertos obtenidos en la matriz única, se realizaron dos análisis complementarios: 1) el cálculo la variación (desviación estándar) de las respuestas de los expertos, y 2) la revisión comparativa con investigaciones similares de los servicios ecosistémicos y las coberturas evaluadas.

La variación de las respuestas (valores) de los expertos se analizó a través del cálculo de la desviación estándar (DS), la cual se interpreta que a mayor acuerdo entre las respuestas de los expertos el valor de la desviación estándar será menor (Montoya *et al.*, 2017). Se calcularon los valores de desviación estándar para cada combinación o entrada de la matriz (servicio ecosistémico contra cobertura de suelo y vegetación), los cuales fueron analizados con base en tres rangos establecidos para el presente trabajo y tomando como referencia el trabajo de Montoya *et al.* (2017). Estos rangos fueron: variabilidad baja ( $DS < 1$ ), variabilidad media ( $1 > DS < 1.9$ ), y variabilidad alta ( $DS > 1.91$ ). Los resultados de la DS arrojaron que el 95.9% de las respuestas de los expertos tuvieron

un acuerdo medio y alto, mientras que el restante 4% tuvo mayores desacuerdos. Estos porcentajes pueden asociarse a la variabilidad de los perfiles de expertos, tanto profesionales, la profundidad de su conocimiento sobre las coberturas y servicio ecosistémicos evaluados.

Otro análisis complementario fue la revisión comparativa de investigaciones que utilizan el enfoque de evaluación matricial. Se realizó un análisis de correlación entre los valores promedio reportados en las investigaciones revisadas y los valores de la matriz de expertos del presente estudio. En general, se encontraron coeficientes de correlación positivos, y en cuanto a los promedios totales de oferta potencial de servicios ecosistémicos reportadas por los expertos y la literatura se encontraron valores y tendencias similares.

#### **Análisis espacial de oferta potencial de servicios ecosistémicos**

Con base en la matriz única de expertos y sus valores, se generaron los mapas de oferta (provisión) potencial de servicios de regulación, oferta potencial de servicios de abastecimiento, oferta potencial de servicios culturales y el mapa de oferta total potencial de servicios ecosistémicos (Figura 4), los cuales muestran la distribución espacial de la oferta potencial de los servicios ecosistémicos seleccionados en la región de estudio.

Al analizar la distribución espacial de los servicios ecosistémicos por categorías, se observa que la oferta potencial de servicios de regulación presenta una mayor superficie con potencial medio-alto a máximo (Figura 4, inciso a). Respecto a la oferta de servicios de abastecimiento se aprecia un mayor contraste entre las áreas que sí suministran este servicio con potencial medio-alto y alto, correspondientes al valle agrícola y al humedal ribereño al sur del área de estudio, y las que no lo proveen, en las zonas de la sierra y en la zona urbana (Figura 4, inciso b). Por su parte, el suministro de los servicios culturales se ofrece con un potencial alto y máximo tanto en la zona urbana como en la zona del valle agrícola, coincidiendo con los diversos humedales (Figura 4, inciso c), además, la superficie de matorral desértico micrófilo presenta un potencial medio-alto de los servicios culturales, lo

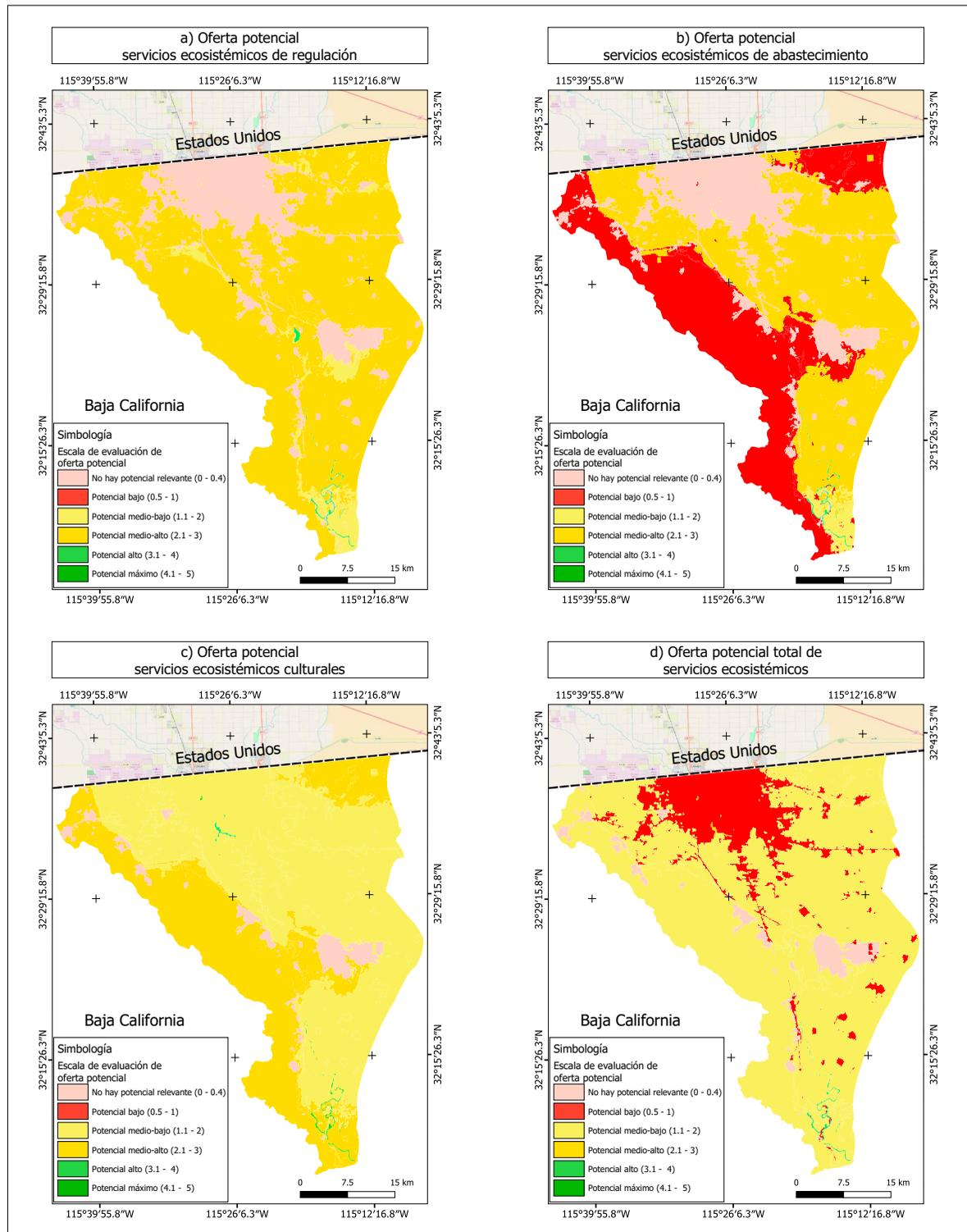


Figura 4. Distribución espacial de la oferta potencial de servicios ecosistémicos de regulación: a), abastecimiento; b) culturales; c) y de la oferta potencial total; d) en el área de estudio. Fuente: elaboración propia.

que resulta interesante ya que, además de ser una cobertura de gran superficie, es una de las que más se asocia con los paisajes desérticos.

En el mapa de oferta potencial total de servicios ecosistémicos (Figura 4, inciso d) se observa que gran parte de la superficie de estudio (80.8%) presenta una oferta potencial media-baja, la cual es suministrada por coberturas como el matorral desértico micrófilo, localizado principalmente al oeste en las sierras, y por la agricultura de riego, ubicada en las partes bajas y planas del valle; en contraste, las coberturas con potenciales medio-alto o máximo representan una mínima superficie (0.30%), las cuales están asociadas a los diversos tipos de humedales. Adicionalmente, se aprecia que las zonas con oferta potencial no relevante o con potencial bajo corresponden con la cobertura de asentamientos humanos.

## DISCUSIÓN

Durante los últimos veinte años ha aumentado la investigación sobre los servicios de los ecosistemas, así como la necesidad de integrar este paradigma en la toma de decisiones y gestión sustentable de la tierra, el agua y de las ciudades, a través del desarrollo de métodos y herramientas de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos (Harrison *et al.*, 2018). En este sentido, los mapas representan una herramienta poderosa para los científicos, formuladores de políticas, ciudadanos y partes interesadas que permiten visualizar de manera intuitiva y simple fenómenos complejos como las interacciones entre diversos servicios ecosistémicos en una variedad de escalas espaciales y temporales (Maes, Crossman y Burkhard, 2016).

En este trabajo se utilizó el método conocido como matriz de expertos o matriz de Burkhard, el cual es un método de evaluación con enfoque biofísico que mediante el uso de datos de coberturas terrestres y el conocimiento de expertos, permitió obtener valores de oferta potencial de servicios ecosistémicos en una matriz, los cuales fueron transferidos a mapas que muestran la distribución espacial de zonas con alto o bajo suministro potencial dentro del área de estudio (Burkhard *et al.*,

2009; Zhang y Muñoz, 2019). Una de las ventajas de este enfoque de mapeo es que puede aplicarse de manera simple y relativamente rápida cuando se dispone de datos limitados o con fuentes de información dispersas, como en el presente estudio; además permitió incorporar datos y conocimiento de las partes interesadas, lo que puede facilitar la interpretación y comprensión entre los usuarios (Maes, Crossman y Burkhard, 2016).

En cuanto a los principales hallazgos de la investigación, se identificó que la categoría de servicios ecosistémicos culturales (recreación y turismo, educación ambiental) es la que presentó mayor potencial de oferta en la región árida estudiada (de potencial medio-alto a máximo). Con respecto a las coberturas terrestres evaluadas, se encontró que aquellas que constituyen alguna categoría de humedal fueron las que presentaron la mayor capacidad total de oferta potencial de servicios del ecosistema (potencial medio-alto a alto), principalmente de servicios culturales y de regulación; a pesar de su importancia, los humedales son las coberturas que ocupan la menor superficie del área de estudio (0.36% del total), la cual se ha reducido debido a la alteración en la hidrología del delta del río Colorado en México, el cambio de uso de suelo y la propagación de especies exóticas, como el pino salado (*Tamarix* spp.) (Schlatter *et al.*, 2017).

Lo anterior resulta relevante pues los diversos servicios ecosistémicos que proveen los humedales son críticos tanto para la flora y fauna como para las poblaciones locales, además, en un contexto de zonas áridas estos ecosistemas son particularmente vulnerables a los efectos climáticos y a las actividades humanas (Khelifa, Mahdjoub y Samways, 2022). Por lo tanto, el presente estudio contribuye en la visualización de áreas clave de suministro potencial de los servicios ecosistémicos que deben mantenerse para asegurar su provisión futura, entre las que se encuentran este tipo de ecosistemas.

Por otro lado, con base en los mapas de distribución espacial de servicios ecosistémicos se observó que un 80.8% de la superficie estudiada presenta una capacidad de oferta potencial media-baja (1.1-2), la que corresponde a las coberturas

de matorral desértico micrófilo y agricultura de riego. Por su parte, la única cobertura que obtuvo un potencial alto (3.1-4) fue el río Hardy, mismo que representa el 0.23% del total de las coberturas; además, ninguna cobertura mostró un potencial máximo (4.1-5) de oferta potencial total de servicios ecosistémicos.

Si bien el mapeo de servicios ecosistémicos mediante la matriz de expertos resulta un enfoque práctico y útil en áreas donde existe poca disponibilidad de datos, este también puede mostrar limitantes. Entre estas se tiene que el método matricial presenta cierto grado de subjetividad en la evaluación debido al nivel de conocimiento de los expertos acerca de las coberturas terrestres o de los servicios evaluados, lo que puede generar una variación en los valores asignados (Martínez y Balvanera, 2012). Para compensar y reducir estas limitantes, algunos autores han propuesto la implementación de análisis complementarios de validación de datos, como el cálculo de desviación estándar (DS) y la revisión comparativa de resultados con otras investigaciones bajo el mismo enfoque; de igual forma, este método brinda la posibilidad de incorporar otros datos e información espacial relevante que complementa la puntuación asignada al potencial de las coberturas evaluadas (Montoya *et al.*, 2017; Jacobs *et al.*, 2015).

En esta investigación se llevaron a cabo dos análisis complementarios, encontrando en la DS que el 96% de las respuestas de los expertos tienen un acuerdo medio y alto, mientras que la comparación de los valores de oferta potencial de este trabajo con los de la literatura mostraron tendencias similares. Estos análisis permitieron confirmar la validez de los datos obtenidos y aplicabilidad del enfoque matricial para la evaluación de potenciales de servicios ecosistémicos en la región de estudio.

## CONCLUSIONES

La evaluación de los servicios ecosistémicos constituye un aporte al estudio de los sistemas socio-ecológicos, es decir, a las relaciones entre la sociedad y la naturaleza las cuales pueden reflejarse en la estructura de las coberturas terrestres, integradas

por las coberturas vegetales y los usos de suelo. En la presente investigación realizada en Mexicali, Baja California, una región árida compuesta por diversas coberturas que incluyen matorrales, diversos tipos de humedales, vegetación desértica, coberturas agrícolas, asentamientos humanos y bosques urbanos, se implementó la metodología denominada matriz de expertos o de Burkhard para evaluar sus capacidades de oferta potencial de servicios ecosistémicos.

Entre los hallazgos de la investigación se encontró que la mayoría de los servicios del ecosistema seleccionados como prioritarios por los expertos pertenecen a la categoría de regulación (del clima local, purificación de agua, flujos de agua, recarga del acuífero, control de erosión), los cuales están asociados con los sistemas de humedales remanentes del río Colorado. De manera similar, el servicio de abastecimiento de pesca está relacionado con la presencia de estos humedales, que históricamente proveían recursos pesqueros para la alimentación de la comunidad indígena Cucapá, y posteriormente al desarrollo de la pesca comercial y con fines turísticos (Villarreal y Olmos, 2017).

Este contexto hidrológico e histórico de la región coincide a su vez con otro de los resultados que mostró que la categoría que tiene mayor capacidad de oferta potencial es la de servicios culturales (recreación y turismo, educación ambiental). Aunque los humedales ribereños, artificiales y urbanos remanentes han sido degradados y reducidos en su superficie debido a la modificación de la hidrología del río Colorado y a los cambios de uso de suelo (Schlatter *et al.*, 2017), han logrado mantener su potencial ecoturístico y de educación ambiental, el cual ha sido incentivado por diversos actores como académicos, científicos, organizaciones de la sociedad civil y propietarios de ranchos de la región (Zamora *et al.*, 2005). Lo anterior se ha reforzado con la implementación de acciones de restauración ecológica, monitoreo y actividades de educación ambiental por parte de asociaciones civiles de la región (Zamora *et al.*, 2008). No obstante, es necesario el desarrollo de políticas públicas que integren el valor ecológico, histórico y cultural, así como su inclusión en los instrumentos de ordenamiento ecológico del territorio.

En cuanto a los alcances de esta investigación, se mostró que la metodología matricial de evaluación y mapeo de los servicios ecosistémicos representa una herramienta con enfoque sistémico que puede aplicarse de manera simple y relativamente rápida cuando se dispone de datos limitados, la cual permitió alcanzar los objetivos propuestos para identificar la capacidad de oferta potencial de las diversas coberturas terrestres y su distribución espacial. Además, los resultados de este trabajo constituyen un insumo relevante para los tomadores de decisiones y las instituciones encargadas en la planeación y gestión del territorio, pues permite identificar áreas clave con alta capacidad potencial de oferta de servicios ecosistémicos para su conservación y manejo sustentable, así como de las áreas con bajo potencial en las que pueden llevarse a cabo acciones de restauración. Por lo tanto, este enfoque matricial contribuye a la gestión y planificación sustentable del territorio.

Así mismo, se identificó la necesidad de complementar esta metodología con otro tipo de enfoques y datos que permitan estimar de manera precisa los valores de suministro de los servicios ecosistémicos. De igual forma, se recomienda para investigaciones futuras la evaluación de la demanda de los servicios ecosistémicos prioritarios para determinar su correspondencia con las capacidades de oferta de los ecosistemas, así como la sinergia y compensación entre los servicios evaluados.

## CONTRIBUCIONES DE LAS AUTORAS

Sandra E. Ortiz-Acosta. Conceptualización y diseño, curaduría de datos, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, suministro de materiales y herramientas de estudio, utilización de softwares, supervisión, validación, visualización, redacción de borrador original y redacción y edición de versión final del documento.

Adriana M. Arias-Vallejo. Administración del proyecto, supervisión, validación, revisión crítica, aportación de contenido intelectual relevante en borrador original, y revisión de versión final del documento sometido.

## REFERENCIAS

- Ayuntamiento de Mexicali. (2007). El Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Mexicali 2025. <https://www.mexicali.gob.mx/24/pdf/AdministracionUrbana/pduc2025.pdf>
- Balvanera, P., Castillo, A., Lazos, E., Caballero, K., Quijas S., Flores A., ... y Sarukhán, J. (2011). Marcos conceptuales interdisciplinarios para el estudio de los servicios ecosistémicos en América Latina. En P. Littera, E. Jobbágy y J. Paruelo (Eds.), *Valoración de Servicios Ecosistémicos, Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial* (pp. 39-67). INTA. <http://inta.gob.ar/documentos/valoracion-de-servicios-ecosistemicos.-conceptos-herramientas-y-aplicaciones-para-el-ordenamiento-territorial/>
- Belay, T., Melese, T. y Senamaw, A. (2022). Impacts of land use and land cover change on ecosystem service values in the Afroalpine area of Guna Mountain, Northwest Ethiopia. *Heliyon*, 8, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12246>
- Burkhard, B., Kandziora, M., Hou, Y. y Müller, F. (2014). Ecosystem Service Potentials, Flows and Demands-Concepts for Spatial Localisation, Indication and Quantification. *Landscape Online*, 34,1-32. <https://doi.org/10.3097/LO.201434>
- Burkhard, B., Kroll, F., Müller, F. y Windhorst, W. (2009). Landscapes 'Capacities to Provide Ecosystem Services – a Concept for Land-Cover Based Assessments. *Landscape online*, 15, 1-22. <https://doi.org/10.3097/LO.200915>
- Burkhard, B., Kroll, F., Nedkov, S. y Müller, F. (2012). Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 21, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.019>
- Chatterjee, S., Dutta, S., Dutta, I. y Das, A. (2022). Ecosystem services change in response to land use land cover dynamics in Paschim Bardhaman District of West Bengal, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100793>
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2014). Inventario Estatal Forestal y de Suelos, Baja California 2014. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional Forestal. México.
- Cortez, L. A. (2011). Gestión y manejo del agua: el papel de los usuarios agrícolas del Valle de Mexicali. *Revista Problemas del Desarrollo*, 167(42), 71-95. <https://is.gd/2P8RCK> [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0301-70362011000400004&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0301-70362011000400004&lng=es&nrm=iso)
- 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? *Ecosystem Services*, 28, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>
- Díaz, P. G., Sánchez, C. I., Guajardo, P. R. A., Del Ángel, P. A. L., Ruíz, C. A., Medina-G., G. e Ibarra, C. D. (2011). Mapeo del índice de aridez y su distribución poblacional en México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17, 267-275. <https://is.gd/Tkgx8L>
- Evaluación de Ecosistemas del Milenio (EM). (2003). Ecosistemas y Bienestar Humano: Marco para la Evaluación. World Resources Institute. <https://millenniumassessment.org/documents/document.3.aspx.pdf>
- Folch, R. y Bru, J. (2017). El recorrido histórico del concepto de paisaje y de territorio. En R. Folch y J. Bru (Coord.), *Ambiente, territorio y paisaje* (pp. 65-99). Editorial Barcino.
- Haines, Y. R. y Potschin, M. (2018). Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1: Guidance on the Application of the Revised Structure. Nottingham, UK. Fabis Consulting Ltd. Recuperado de <https://cices.eu/>
- Harrison, P. A., Dunford, R., Barton, N. D., Kelemen, E., Martín, L. B., Norton, L., ... y Zulian, G. (2018). Selecting methods for ecosystem service assessment: A decision tree approach. *Ecosystem Services*, 29, 481-498. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.016>
- Hattam, C., Broszeit, S., Langmead, O., Praptiwi, R. A., Ching, L. V., Creencia, L. A., ... y Austen, M. (2021). A matrix approach to tropical marine ecosystem service assessments in South east Asia. *Ecosystem Services*, 51, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101346>
- INEGI. (1984). Hidrología. Síntesis geográfica de Baja California. Secretaría de Programación y Presupuesto Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220778/702825220778\\_3.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220778/702825220778_3.pdf)
- INEGI. (2018). Conjunto Nacional de Información de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250000 (Serie VII). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>
- INEGI. (2020). Panorama sociodemográfico de Baja California, Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825197735.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197735.pdf)
- Jacobs, J., Burkhard, B., Van Daele, T., Staes, J. y Schneiders, A. (2015). 'The Matrix Reloaded': A review of expert knowledge use for mapping ecosystem services. *Ecological Modelling*, 295, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.08.024>
- Khelifa, R., Mahdjoub, H. y Samways, M. J. (2022). Combined climatic and anthropogenic stress threaten resilience of important wetland sites in an arid region. *Science of the Total Environment*, 806, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150806>
- Maes, J., Crossman, D. N. y Burkhard, B. (2016). Mapping ecosystem services. En P. Potschin, R. Haines-Young, R. Fish y R. K. Turner (Eds.), *Routledge Handbook of Ecosystem Services* (pp. 188-204). Routledge.
- Maes, J., Egoh, B., Willemens, L., Liqueste, C., Vihervaara, P., Schägner, P. J., ... y Bidoglio, G. (2012). Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. *Ecosystem Services*, 1(1), 31-39. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.06.004>
- Mamat, A., Halik, Ü. y Rouzi, A. (2018). Variations of Ecosystem Service Value in Response to Land-Use Change in the Kashgar Region, Northwest China. *Sustainability*, 10(1:200), 1-18. <https://doi.org/10.3390/su10010200>
- Manley, E., Ogneva-Himmelberger, Y., Ruelle, M., Hanumantha, R., Mazari-Hiriart, M. y Downs, T. J. (2022). Land-cover change and urban growth in the Mexico-Lerma-Cutzamala Hydrological Region, 1993-2018. *Applied Geography*, 147, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102785>
- Márquez H. R., y Peters R., E. M. (2008). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR) - Versión 2006 - 2008, 1-22. <https://rsis.ramsar.org/es/rs/1822>
- Martínez H., M. J. y Balvanera, P. (2012). Methods for mapping ecosystem service supply: a review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 8(1-2), 17-25. <https://doi.org/10.1080/21513732.2012.663792>
- Montoya, T. C., de la Barrera, F., Salazar, A., Inostroza L. (2017). Monitoring the effects of land cover change on the supply of ecosystem services in an urban region: A study of Santiago-Valparaíso, Chile. *PLoS ONE*, 12(11), 1-22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188117>
- Montoya, T. C. M. (2018). Dinámicas y contrastes entre procesos de periurbanización y servicios ecosistémicos. Análisis multiescalar para comprender la sustentabilidad del paisaje en la región urbana Santiago-Valparaíso. Tesis doctoral) Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Historia, Geografía y Ciencia Política, Instituto de Geografía. Santiago, Chile.
- Palma, H. D. B., de la Barrera, F. y Pineda, L. R. (2019). Evaluación de los servicios ecosistémicos provistos por

- una microcuenca periurbana de Querétaro (México). *Investigaciones Geográficas*, 57, 63-74. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2019.53581>
- Programa de Ordenamiento Ecológico de Mexicali. (1999). XVI Ayuntamiento Constitucional de Mexicali, B.C. Periódico Oficial del Estado de Baja California.
- Polasky, S., Nelson, E., Pennington, D. y Johnson, K. A. (2011). The Impact of Land-Use Change on Ecosystem Services, Biodiversity and Returns to Landowners: A Case Study in the State of Minnesota. *Environmental and Resource Economics*, 48, 219-242. <https://doi.org/10.1007/s10640-010-9407-0>
- Schlatter, K. J., Grabau, M., Shafroth, P. y Zamora, A. F. (2017). Integrating active restoration with environmental flows to improve native riparian tree establishment in the Colorado River Delta. *Ecological Engineering*, 106, 661-674. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.015>
- Sosa, G. J. F. y Sánchez, L. E. (2007). Estudio de los efectos socio-económicos en el Valle de Mexicali. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 11(21), 359-374. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14102103>
- Swetnam, R. D., Fisher, D., Mbilinyi, P. B., Munishi, T. K.T., Willcock, S., Ricketts, T., ... y Lewis, L. S. (2011). Mapping socio-economic scenarios of land cover change: A GIS method to enable ecosystem service modelling. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 563-574. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.007>
- Tian, Y., Zhou, D. y Jiang, G. (2020). Conflict or Coordination? Multiscale assessment of the spatio-temporal coupling relationship between urbanization and ecosystem services: The case of the Jingjinji Region, China. *Ecological Indicators*, 117, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106543>
- Villarreal, R. J. y Olmos, A. M. (2017). Ecodegradation and indigenous livelihoods: a case study in northwest México. *Sociedad y Ambiente*, 5(13), 5-34. <https://www.scielo.org.mx/pdf/sya/n13/2007-6576-sya-13-5.pdf>
- Wang, P., Li, R., Liu, D. y Wu, Y. (2022). Dynamic characteristics and responses of ecosystem services under land use/land cover change scenarios in the Huangshui River Basin, China. *Ecological Indicators*, 144, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109539>
- Wangai, P. W., Burkhard, B. y Müller, F. (2018). Quantifying and mapping land use changes and regulating ecosystem service potentials in a data-scarce peri-urban region in Kenya. *Ecosystems and people*, 15(1), 11-32. <https://doi.org/10.1080/21513732.2018.1529708>
- Zamora, A. F., Hinojosa H. O., Santiago, E., Brott, E. y Culp, P. (2008). Collaboration in México: renewed hope for the Colorado River Delta. *Nevada Law Journal*, 8(871), 871-889. <https://scholars.law.unlv.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1122&context=nlj>
- Zamora, A. F., Pitt, J., Cornelius, S., Glenn, E., Hinojosa H. O., Moreno, M., García, J., Nagler, P., de la Garza, M. y Parra, I. (2005). Prioridades de Conservación en el Delta del Río Colorado, México y Estados Unidos. Sonoran Institute, Environmental Defense, University of Arizona, Pronatura Noroeste Dirección de Conservación Sonora, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, World Wildlife Fund-Programa Golfo de California e Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT. <https://sonoraninstitute.org/files/ConservationPrioritiesESP.pdf>
- Zhang, S. y Muñoz, R. F. (2019). Assessing and mapping ecosystem services to support urban green infrastructure: The case of Barcelona, Spain. *Cities*, 92, 59-70. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.03.016>