

LA GEOINFORMÁTICA EN EL ANÁLISIS DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Angela P. Cuervo-Robayo^{1,2}
Anuar Iram Martínez Pacheco³
Abisay Ortiz-Haro⁴
Víctor Sánchez-Cordero¹
José Juan Flores^{1*}

- ¹Departamento de Zoología, Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México.
- ² Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Liga Periférico
- ³ Fondo Mundial para la Naturaleza WWF.
- ⁴ Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS), Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- * Autor para correspondencia: jjib.unam.mx

Resumen

La importancia de las cuencas hidrográficas no sólo radica en ser una de las fuentes principales de agua para el consumo humano, sino que cumplen una función ecológica donde habitan diferentes especies de flora y fauna. Asimismo, son consideradas como un espacio territorial donde las comunidades humanas comparten identidades, tradiciones y cultura, convirtiéndose en espacios bio-culturales. Las cuencas hidrográficas se encuentran bajo constante amenaza debido a factores antrópicos, como el cambio de uso de suelo, la degradación de la vegetación natural, la contaminación por actividades agrícolas y la sedimentación, entre otras. Una disciplina que permite, a través de sus diferentes herramientas de análisis generar monitoreos del estado de conservación de las cuencas, es la geoinformática, que contempla el estudio de los recursos naturales y estructura de datos geográficos. Esta disciplina puede ser utilizada para realizar evaluaciones de los impactos antrópicos sobre las cuencas hidrográficas, usando una plataforma de sistemas de información geográfica (SIG). En este capítulo se mencionan varios tipos de análisis y programas que pueden ser utilizados para estimar y evaluar el estado de conservación de las cuencas hidrográficas.

Introducción

La geoinformática es una disciplina emergente que contempla el estudio de los recursos naturales, estructura de datos, almacenaje, manejo, análisis, integración y presentación de información geoespacial (Flores, 2004; Prakash, 2006). Se apoya en métodos y técnicas de la geodesia y el insumo de diversos tipos de datos (geográficos, espaciales, geológicos, biológicos, geofísicos, etcétera), a través de un enfoque integrativo en el análisis, modelado, gestión y almacenaje de éstos (Mankari *et al.*, 2010; Sinha *et al.*, 2010). Esta disciplina es ampliamente usada para el descubrimiento de nuevos conocimientos a través de un enfoque holístico de la información de las ciencias de la tierra, naturales y sociales, respectivamente (Prakash, 2006; Sinha *et al.*, 2010). La geoinformática está ligada a tres herramientas cardinales: los sistemas de información geográficos (SIG),

la teledetección y el sistema de posicionamiento global (GPS). En particular, una de las herramientas más utilizadas en esta disciplina son los sig (Buzai, 1992; Flores, 2004; Prakash, 2006), los cuales trabajan con la sobreposición de información geográfica de diferentes tipos y atributos del paisaje, ya sean imágenes de satélite, ortofotos, cartografía digital, cartografía análoga e información de campo (Buzai, 1992). Los sig tienen una amplia variedad de aplicaciones (Pundt y Brinkkötter-Runde, 2000; Alatorre *et al.*, 2015), desde el análisis de biodiversidad y mapas de distribución (Cirelli y Sánchez-Cordero, 2009; Peterson *et al.*, 2015; Gaughan *et al.*, 2013), caracterizaciones ambientales (Bryce *et al.*, 1999), análisis de tasas de deforestación (Manjula *et al.*, 2011), hasta aplicaciones más complejas, como la visualización de gases de efecto invernadero de manera espacial y temporal (Chahine *et al.*, 2006), así como el manejo de los recursos acuáticos y las cuencas hidrográficas (Lyo, 2003; Javed *et al.*, 2009).

Las cuencas hidrográficas han surgido como un modelo espacial para el estudio y gestión de los recursos hídricos, en particular el análisis de ecosistemas acuáticos, los cuales representan un área de gran interés para la evaluación e integración de procesos ecológicos y de la biodiversidad, así como para el manejo y uso sostenible de los ecosistemas y los servicios ecosistémicos (Cordero, 2008; Cotler *et al.*, 2010). Los sig han jugado un papel esencial en el estudio de las cuencas hidrográficas y en los componentes intrínsecos de éstas. Esta herramienta ha permitido que se plasme, de manera espacial, los atributos físicos, biológicos y socioeconómicos que componen a las cuencas (Cotler *et al.*, 2010; Barriga *et al.*, 2007). A nivel nacional existen trabajos relevantes usando este enfoque teórico-metodológico, dirigidos a la toma de decisiones para el manejo y uso de las cuencas (Cotler, 2007; Cotler *et al.*, 2010; Maass, 2015; semarnat, 2015, 2016).

Los ecosistemas acuáticos que conforman las cuencas albergan una alta biodiversidad (Lira *et al.*, 2015). Sin embargo, al ser uno de los recursos naturales con una alta demanda por su elevado valor social y económico, tienden a ser más vulnerables. En la Actualidad, la mayoría de estos ecosistemas se encuentran en algún estado de degradación, siendo uno de los ecosistemas más amenazados en México, por lo que las herramientas para su monitoreo y evaluación son de gran importancia. El uso de los sig para el estudio de las cuencas hidrográficas contempla una jerarquía en su análisis, el cual comienza con la delimitación y caracterización de la cuenca o cuencas a estudiar y requiere de datos geomorfológicos, topográficos e hidrológicos (Cotler

et al., 2010; Geraldi *et al.*, 2010). Asimismo, el segundo nivel de esta jerarquía contempla un análisis más detallado, que incluye variables ambientales, sociales y económicas. Ejemplos de esto son la aplicación de métodos eco-hidráulicos y holísticos en la determinación del caudal ecológico (Diez y Burbano, 2006; Poff *et al.*, 2010), que permiten la evaluación de la biodiversidad acuática y terrestre, y los efectos de la antropización y del cambio climático en ésta (Cirelli y Sánchez-Cordero, 2009; Dominguez-Dominguez *et al.*, 2006; Abell *et al.*, 2008; Kolb, 2013). En este capítulo se describen algunos análisis que derivan de la interacción entre diferentes componentes del SIG en ecosistemas acuáticos.

Metodologías

Definición de las cuencas hidrográficas

Las cuencas hidrográficas conforman el espacio territorial mínimo que se delimita naturalmente por un parteaguas, cuyos escurrimientos confluyen en un río principal y desembocan en el mar, en un lago interior (Sánchez *et al.* 2003; Aguilar, 2007; Cotler *et al.*, 2010). Dentro de la cuenca se encuentra una interrelación entre el componente hidrológico, clima y terreno, lo que genera una alta diversidad de ecosistemas acuáticos, desde pequeños arroyos hasta grandes lagos y lagunas estuarinas, los cuales convergen en toda la extensión de la cuenca. El término “cuenca hidrográfica” es definido como la unidad que permite la gestión de la misma, es decir, que involucra la dimensión física, ambiental, social y política (Cotler *et al.*, 2010; Aguilar, 2007). La delimitación de una cuenca no sólo ayudará al estudio del ciclo hidrológico dentro de un espacio geográfico, sino que contribuye al manejo y gestión del recurso hídrico.

Las cuencas se dividen, naturalmente, en tres unidades hidrográficas: cuencas, subcuencas y microcuencas, las cuales varían en área desde unas pocas hasta miles de hectáreas de extensión (figura 1) (Vásquez *et al.*, 2016). Una de las características principales de las subcuencas es que las conforman un conjunto de microcuencas, las cuales drenan en un solo cauce. Esta división se genera a partir del grado de ramificaciones de los cursos de agua de un río (Vásquez *et al.*, 2016). Dependiendo del objetivo y el alcance del análisis, es que se decidirá qué parte de esta subdivisión es la que se quiere estudiar (figura 1). De igual manera, en el estudio de las cuencas es imprescindible la zonificación de éstas, las cuales están estrechamente relacionadas con la

ubicación altitudinal (Faustino y Jiménez, 2000), donde cada zona posee atributos y un papel funcional dentro de toda la cuenca. Las subdivisiones de la cuenca están dadas por su relación con el cauce principal de la misma y del área que abarcan (Vásquez *et al.*, 2016). Esta clasificación es importante, ya que la hidrología de las cuencas está influida por diversas características físicas (área, pendiente, elevación, etcétera) (Cotler *et al.* 2010; Vásquez *et al.*, 2016). La complejidad antes descrita genera micro-hábitats que están disponibles para una gran cantidad de organismos (Poff, 1997).

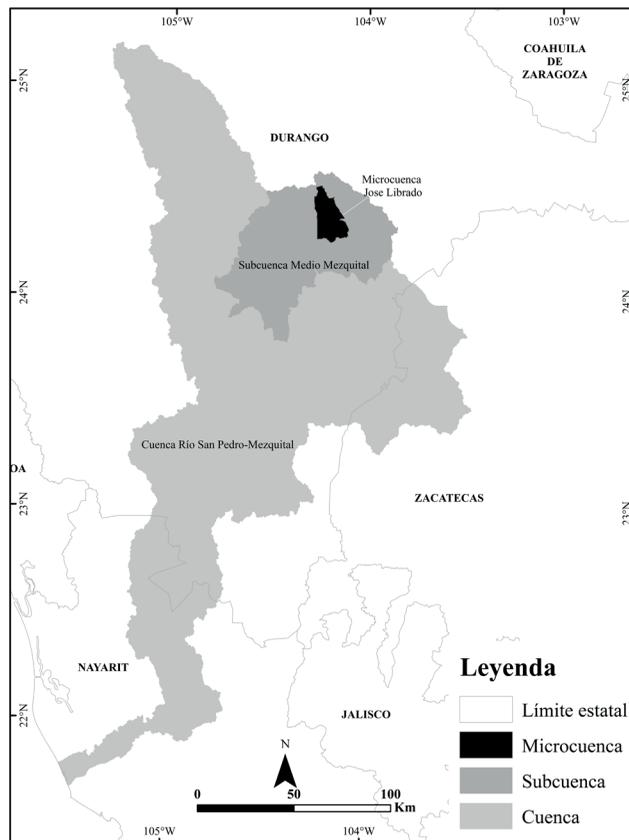


Figura 1. Uso de los SIG para representar las diferentes subdivisiones que presenta una cuenca hidrográfica.

La geoinformática, como herramienta para el estudio de los ecosistemas acuáticos, permite realizar análisis espaciales a nivel de cuencas hidrográficas y a un mayor nivel de detalle, como es el caso de los lagos y ríos, con la finalidad de estudiar las interacciones entre el paisaje circundante y el hábitat local (Cotler *et al.*, 2010; Javed *et al.*, 2009). Asimismo, permite clasificar y monitorear los mecanismos que influyen en las distribución y abundancia de las comunidades acuáticas y terrestres (Cirelli y Sánchez-Cordero, 2009). También son de gran utilidad en la evaluación del estado ambiental de estos ecosistemas, ya que los componentes químicos, biológicos y microbiológicos pueden ser analizados de manera espacial y ver su comportamiento con relación a otros factores ambientales con el potencial para condicionar cambios importantes al interior de las cuencas hidrográficas a escala local y regional (Vásquez *et al.*, 2016). Las cuencas, si bien en su mayoría se desarrollan en un contexto hídrico, no se pueden aislar de los demás componentes, como los suelos, la vegetación y las actividades antropogénicas. Por lo tanto, este escenario complejo tiene que ser abordado, necesariamente, desde un enfoque holístico, para darle un marco de análisis formal. Por ejemplo, factores relacionados con la calidad y cantidad de agua, los cambios de uso de suelo (espacio-temporal) la cobertura vegetal, la alteración de la zona riparia, la geomorfología de la cuenca, la deforestación, las fuentes de contaminación puntual, la expansión de zonas urbanas, entre otros (Cotler *et al.*, 2010; Mora *et al.*, 2016). La bondad de estas herramientas reside en el poder de análisis de una gran cantidad de información de manera espacio-temporal. Esto nos permite visualizar diversas relaciones entre los componentes inmersos de una cuenca como, por ejemplo, observar algún tipo de relación entre la deforestación y la pérdida de fauna terrestre, o también visualizar atributos del paisaje y su relación con pérdida o conservación de la biodiversidad. Si bien estas herramientas nos permiten una visualización de las relaciones que ocupen al estudio, siempre deben ser acompañadas de su respectivo análisis estadístico que permita la validez objetiva de dicha relación. Es particular, estas herramientas son de gran ayuda ante los inminentes efectos del cambio climático que ya enfrentan los recursos acuáticos (Vörösmarty *et al.*, 2010; Bates *et al.*, 2008).

Caracterización del caudal ecológico

De acuerdo con el “10 Simposio Internacional del Río y Conferencia de Flujos Ambientales” realizado en 2007, el Caudal Ecológico (CE) se entiende como la calidad,

cantidad y régimen de flujo de agua requerido para mantener las especies, funciones, procesos y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos que proporcionan bienes y servicios a la sociedad. Mediante el CE, se pretenden establecer límites de extracción que respeten la renovación del recurso, para mantener un ecosistema funcional y sano, o que permita mantener un flujo adecuado para la supervivencia de algunas especies (García y González, 2004). El CE que se determine debe permitir también el desarrollo social de la cuenca (González *et al.*, 2009). En la actualidad existen diferentes metodologías para evaluar el CE, estos métodos suelen agruparse en tres tipologías básicas: hidrológicos, hidráulicos, eco-hidráulicos (simulación de hábitat) y como un complemento, los métodos holísticos (Diez y Burbano, 2006). En este último método se identifica un régimen de flujo destinado a alcanzar determinados objetivos ecológicos, geomorfológicos, de calidad de agua, sociales, entre otros, para establecer escenarios de manejo integrado de las cuencas (Tharme, 2003). Este último método es considerado el más complejo, dado que se trabaja desde un enfoque multidisciplinario, en el cual la información espacial del socio-ecosistema es de gran relevancia en el estudio del CE. Mediante la aplicación de los SIG, se puede emplear una herramienta para delimitar las cuencas y subcuencas, además de realizar correlaciones entre las variables del entorno de varios segmentos de un río (ancho del cauce, profundidad, etcétera) y la red hidrográfica superficial, obteniendo mapas de asociación entre estas variables y los principales escurrimientos de la cuenca (González y Martínez, 2010). Este proceso dentro de la interfaz de los SIG implica las relaciones topológicas entre las diferentes variables consideradas, tanto edafológicas (tipos de suelo); fisiográficas (modelo digital de elevación); hidrológicas (caudales mínimos, máximos y extraordinarios); climáticas (temperatura, precipitación, humedad, etcétera), así como también, variables socioeconómicas (uso de suelo, concesiones para extracción de agua, etcétera) (González y Martínez, 2010; Rodríguez-Gallego *et al.*, 2011; Wei *et al.*, 2018).

Herramienta de evaluación de suelos y agua

En las últimas décadas las herramientas de modelado hidrológico han avanzado notablemente. Tal es el caso del modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), el cual es un modelo continuo a escala de cuenca, diseñado para hacer aproximaciones de los impactos del manejo del agua, sedimentos, y los rendimientos agroquímicos (pes-

ticidas o fertilizantes) en grandes cuencas, con diferentes manejos y a lo largo de amplios periodos (Dile *et al.*, 2016). Paralelamente al desarrollo de SWAT, los SIG y sus herramientas permiten procesar la información necesaria para el modelado hidrológico. Algunos de los grandes componentes de esta herramienta son: el modelo digital de elevación (DEM), uso de suelo, cobertura vegetal, clima, hidrología, propiedades del suelo, crecimiento de vegetación, nutrientes, pesticidas, bacterias y patógenos, y gestión de tierras (Alatorre *et al.*, 2015; Olaya, 2014). Este modelo HA ganado gran aceptación ante la comunidad científica, no sólo por las diversas utilidades que se le pueden dar para la evaluación de las cuencas, sino por la creación de herramientas que hacen posible el análisis a través de una integración con los sig. Tal es el caso de AVSWAT (ArcView-swat), que es una herramienta de interfaz diseñada para generar las entradas del modelo a partir de capas de datos en ArcView, para posteriormente trabajar en SWAT (Gassman *et al.*, 2007; Baker y Miller, 2013). SWAT es de gran ayuda en la evaluación del recurso hídrico y los problemas derivados de la antropización a diferentes escalas, tales como las fuentes de contaminación no puntuales, análisis de la efectividad de prácticas de conservación, gestión integral del agua, cambio climático, entre otros (Baker y Miller, 2013).

A razón de esto, en las últimas décadas se han desarrollado nuevas herramientas para el estudio eco-hidrológico de las cuencas. A continuación, se señalan algunos de los análisis más importantes (tabla 1).

Geografía de la biodiversidad acuática continental

Los cuerpos dulceacuícolas del mundo a pesar de ocupar una pequeña porción de la superficie terrestre son considerados *hotspots* de biodiversidad, por lo que el conocimiento de los patrones biogeográficos de las especies que los habitan es clave para conservar y manejar de manera sostenible este recurso (Domisch *et al.*, 2015). Los modelos de nicho ecológico (MNE) son una de las aproximaciones conceptuales más utilizadas para estimar y analizar los patrones geográficos de la biodiversidad. Dichos modelos se basan en la relación entre registros de ocurrencia de las especies y un conjunto de variables ambientales en formato espaciado por cuadrículas o comúnmente conocidos como *raster*, lo cual ha demostrado ser efectivo para delimitar el nicho ecológico y distribución potencial de las especies (Peterson *et al.*, 2011).

Tabla 1. Tipos de análisis a nivel de cuenca hidrográfica, usando SIG

Análisis	Objetivo	Fuente de información	Herramienta	Resultado esperado
Cambios de uso del suelo	<p>*Determinar los sitios de mayor dinámica de cambio positivo/negativo</p> <p>*Tasas de cambio (Velocidad de pérdida o recuperación).</p>	Imágenes de satélite, ortofotos.	Erdas Imagine, Envi, Idrisi, Multispec, Arcgis.	<p>*Sitios de cambio de vegetación natural por algún uso.</p> <p>*Identificación de zonas deforestadas.</p> <p>*Crecimiento de mancha urbana.</p> <p>*Alteraciones en vegetación de galería y zonas riparias.</p>
Morfología de la cuenca	*El objetivo es analizar los rasgos geomorfológicos de la cuenca que pueden estar asociados al funcionamiento de la escurriencia dentro de la cuenca.	Modelo digital de elevación, curvas de nivel.	Arcgis, Hidrosheds, HEC-RAS, HEC-HMS Idrisi, Grass, Qgis, GVsíq.	*Determinación de las geoformas, longitud de cauce, cuantificación de rasgos de la superficie, escurrimientos, área, forma, pendiente, elevación, características de red de drenaje y cauce principal.
Caudal ecológico	Determinación del caudal ecológico para el buen funcionamiento hidrológico de la cuenca.	Estaciones hidrométricas, Estudio holístico. Trabajo de campo multidisciplinario.	Qgis, GVsíq, Arcgis (<i>Hydrosheds</i>)	*Hábitat único por su diversidad y funcionamiento, que mantienen su estructura natural e integridad ecológica asociada a los servicios ecosistémicos aportados y que están intactos. La zona de captación se conserva.

Potencial de pérdida de suelos	Modelación de áreas de mayor pérdida y/o acumulación de sedimentos.	Modelo digital de elevación, Tipo de suelos y sus características (Profundidad, textura, porosidad), potencial de lluvia, escurrimientos, prácticas de protección de suelos. Registro de los caudales.	AVSWAT AGWA, Model builder, Invest.	*Sitios de mayor pérdida de suelo y/o acumulación de sedimentos que alteran el equilibrio ecológico de los ambientes acuáticos (Manglar, vegetación riparia, humedales).
Estudio de la biodiversidad	Modelar la distribución potencial de la biodiversidad.	Variables ambientales. Sistema Nacional de información sobre Biodiversidad de la Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad (SNIB).	ModestR. Maxent. Zonation. ConsNet	*Evaluación y priorización del estado de conservación de las especies.

Los MNE han sido utilizados en menor medida en los análisis de la biota acuática, donde los datos de ocurrencia de las especies, así como la información espacial de parámetros ambientales (*e. g.* profundidad, pH, nutrientes y oxígeno) de alta calidad son escasos (Iguchi *et al.*, 2004; Cirelli y Sánchez-Cordero, 2009). No obstante, en el caso de las variables ambientales, el clima y la topografía han sido utilizadas con éxito como subrogados de dimensiones específicas del agua (Domínguez-Domínguez *et al.*, 2006). Por lo que existen propuestas globales a resolución de 1 km² que permi-

ten realizar evaluaciones de la biodiversidad a un nivel geográfico mayor (*e.g.* país, continente), y por lo tanto generar evaluaciones comparables e incluyentes. Es el caso de las superficies raster generadas por Domisch *et al.* (2015), las cuales representan parámetros de clima, topografía, coberturas de suelo y de vegetación. Esta información ambiental puede ser consultada y procesada a través de sig. Asimismo, existen plataformas informáticas como ModestR (García-Roselló *et al.*, 2014), la cual reúne tanto información taxonómica y ambiental de la fauna y flora de agua dulce y puede ser una herramienta útil para el estudio de patrones macroecológicos (Pelayo-Villamil *et al.*, 2015).

Recientemente, en el caso de evaluaciones regionales, la estrategia para mejorar o fortalecer la información ambiental de la zona requiere de procesos de interpolación de datos tomados en campo que describen características fisicoquímicas de ríos u otros cuerpos agua (Cirelli y Sánchez-Cordero, 2009; Domisch *et al.*, 2015; Leathwick *et al.* 2005; Luna-Arangúe, 2015). Sin embargo, este tipo de información es costosa, ya que requiere de un muestreo sistemático y en algunos casos en zonas de difícil acceso. Para el tema de registros de presencia de especies, existen iniciativas globales de repositorios que reúnen y albergan localidades de especies que se encuentran depositadas en colecciones científicas nacionales e internacionales. La Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad (GBIF, por sus siglas en inglés) es el mayor repositorio de registros de ocurrencia, y está conformado por una red de nodos nacionales que se encargan de organizar, depurar y validar la información de cada país. En el caso de México el nodo de GBIF es la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), quien coordina el Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) <http://www.snib.mx/index.html>, y que hasta la fecha en lo que respecta a los registros existentes y disponibles para peces e invertebrados en el caso de peces e invertebrados dulceacuícolas representa tan sólo el 0.1% del total de los datos de biodiversidad almacenados en él. Esto denota un campo aún inexplorado, pero con mucho potencial para el estudio de la biodiversidad.

Los MNE se estiman a través de correlaciones entre localidades de colecta de especies y variables ambientales, usando algoritmos de cómputo. Existen métodos sencillos y complejos, como el caso de Bioclim (Nix y Bussy, 1986) y Maxent (Phillips y Dudík, 2008), respectivamente. Ambos han demostrado ser útiles para definir los parámetros ambientales que delimitan el nicho de las especies (Peterson *et al.*, 2011) y aunque Maxent es uno de los que estadísticamente presenta un mejor desempeño

en comparación a Bioclim (Elith *et al.*, 2006), se recomienda utilizar más de un algoritmo de mne bajo todas las consideraciones conceptuales y técnicas que se han desarrollado en los últimos años (Peterson *et al.*, 2011; Qiao *et al.*, 2015).

Las *áreas para la conservación y restauración* de la biodiversidad acuática se pueden definir a través de métodos de priorización que utilizan las distribuciones potenciales u observadas de las especies, bajo un enfoque de selección de espacio territorial basado en la complementariedad (Cirelli y Sánchez-Cordero, 2009; Lethomäki y Moilanen, 2013). El objetivo es encontrar un grupo óptimo de espacios territoriales que en conjunto sean tan valiosas como sea posible teniendo en cuenta las diferencias, similitudes y conectividad entre los sitios seleccionados; éstas pueden incluir áreas prioritarias de conservación y restauración (Moilanen *et al.*, 2008; Cirelli y Sánchez-Cordero, 2009). Uno de los algoritmos de priorización actualmente más utilizados es el programa ZONATION, el cual tiene como objetivo maximizar la retención de la riqueza ponderada por el área de distribución de las especies (Lethomäki y Moilanen, 2013). En el caso de la planeación sistemática para la conservación de los cuerpos de agua (Moilanen *et al.*, 2008) recomiendan los siguientes pasos: 1. Obtener datos de presencias de especies y variables ambientales en formato geoespacial que describa la calidad de la zona de estudio; 2. Si la información de presencia de las especies es incompleta, estimar la distribución potencial de las especies; 3. Definir las cuencas utilizadas como unidades de planeación y describir la jerarquía del flujo a través de las cuencas; 4. Asignar pesos que representen la importancia de las especies con base en rasgos intrínsecos y funcionales; 5. Realizar escenarios de priorización con las funciones de la herramienta ZONATION y, 6. evaluar las áreas identificadas o aquellas que deban ser eliminadas a través de un análisis de costo (Cabeza y Moilanen, 2006).

Literatura citada

- Abell, R. *et al.* (2008). Freshwater Ecoregions of the World: A New Map of Biogeographic Units for Freshwater Biodiversity Conservation. *BioScience*, 58, 5.
- Aguilar, U. I. (2007). *Las cuencas y la gestión del riesgo a los desastres naturales en Guatemala*. Guatemala: FAO.
- Alatorre, C. L. C., Torres, E. M. O., Rojas, L. H. V., Bravo, C. L. P., Wiebe, C. L. Q., Sandoval, F. G. y López, E. G. (2015). *Geoinformática aplicada a procesos geoambientales en el contexto local y regional: teledetección y problemas de información geográfica*. México: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Baker, T. J. y Miller, N. S. (2013). Using the Soil and Water Assessment Tool (swat) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *Journal of Hydrology*, 486, 100-111.
- Barriga, M., Campos, J. J., Corrales, M. O. y Prins, C. (2007). *Gobernanza ambiental, adaptativa y colaborativa en bosques modelo, cuencas hidrográficas y corredores biológicos. Diez experiencias en cinco países latinoamericanos*. Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE.
- Bates, B., Kundzewicz, Z. y Wu, S. (2008). *Climate change and water*. Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat.
- Bryce, S. A., Omernik, M. J. y Larsen, P. D. (1999). Ecoregions: A geographic framework to guide risk characterization and ecosystem management. *Environmental Practice*, 1, 141-155.
- Buzai, G. D. (1992). Geoinformática: Teoría y aplicación. *Anales de la Sociedad Argentina de Estudios Geográficos*, 19, 11-17.
- Cabeza M. y Moilanen, A. (2006). Replacement cost: a useful measure of site value for conservation planning. *Biological Conservation*, 132, 336-342.
- Chahine, M. T. *et al.* (2006). AIRS: Improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87, 911-926.
- Cirelli, V. y Sánchez-Cordero, V. (2009). Selection of restoration and conservation areas using species ecological niche modeling: A case study of the Neotropical river otter *Lontra longicaudis annectens* in central Mexico. En Columbus, A. y Kuznetsov, L. (Eds.), *Endangered Species: New Research* (pp. 279-298). New Haven: Nova Science Publishers, Inc.

- Cordero, C. D. (2008). Esquema de pagos por servicios ambientales para la conservación de cuencas hidrográficas en el Ecuador. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 17, 56-66.
- Cotler, H. (2007). *El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. 2a. ed. México: SEMARNAT.
- Cotler, H., Garrido, A., Bunge, V. y Cuevas, M. L. (2010). Las cuencas hidrográficas de México: Priorización y toma de decisiones. En Cotler, H. (Ed.), *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización* (pp. 210-215). México: Instituto Nacional de Ecología-Fundación Gonzalo Río Arronte I. A. P.
- Diez, H. J. M. y Burbano, L. B. (2006). Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas. *Revista Ingeniería e Investigación*, 26, 58-68.
- Dile, Y. T., Daggupati, P., George, C., Srinivasan, R. y Arnold, J. (2016). Introducing a new open source gis user interface for the swat model. *Environmental Modelling & Software*, 85, 129-138.
- Domínguez-Domínguez, O., Martínez-Meyer, E., Zambrano, L. y Pérez-Ponce, G. (2006). Using ecological-niche modeling as a conservation tool for freshwater species: live-bearing fishes in central Mexico. *Conservation Biology*, 20, 1730-1739.
- Domisch, S., Amatulli, G. y Jetz, W. (2015). Near-global freshwater-specific environmental variables for biodiversity analyses in 1 km resolution. *Scientific Data*, 2, 150073.
- Elith, J., Graham, H. C., Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A. J., Hijmans, R., Huettmann, F. y Loiselle, A. B. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129-151.
- Faustino, J. y Jiménez, F. (2000). *Manejo de cuencas hidrográficas*. Costa Rica. Flores, R. E. J. (2004). Informática e investigación geográfica. Situación actual y perspectiva. *Revista Forestal Latinoamericana*, 36, 59-81.
- García de Jalón, D. y González del Tánago, M. (2004). *El concepto de caudal ecológico y criterios para su aplicación en los ríos españoles*. Madrid: Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela de Ingenieros De Montes, Universidad Politécnica de Madrid.
- García-Roselló, Emilio et al. (2014). Using ModestR to download, import and clean species distribution records. *Methods in Ecology and Evolution*, 57, 708-713.

- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H. y Arnold, G. J. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50, 1211-1250.
- Gaughan, A. E., Stevens, R. F., Linard, C., Jia, P. y Tatem, A. J. (2013). High resolution population distribution maps for Southeast Asia in 2010 and 2015. *PLoS ONE*, 8.
- Geraldi, A. M., Piccolo, M. C. y Perillo, G. E. (2010). Delimitación y estudio de cuencas hidrográficas con modelos hidrológicos. *Investigaciones Geográficas*, 52, 215-225.
- González, M. I. D., Lanza, E. G. de la y Sánchez, N. R. (2009). *Memoria del Taller: Propuesta de caudal ecológico en la cuenca Copalita-Zimatán-Huatulco. Manejo del agua en cuencas hidrográficas: desarrollo de nuevos modelos en México*. México: Alianza Fundación Gonzalo Río Arronte-wwf.
- Iguchi, K. I., Matsuura, K., McNyset, K. M., Peterson, A. T., Scachetti-Pereira, R., Powers, K. A. y Yodo, T. (2004). Predicting invasions of North American basses in Japan using native range data and a genetic algorithm. *Transactions of the American Fisheries Society*, 133, 845-854.
- Javed, A., Khanday, Y. M. y Ahmed, R. (2009). Prioritization of Sub-watersheds based on morphometric and land use analysis using remote sensing and gis techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 37, 261-274.
- Kolb, M. (2013). *Dinámica del uso del suelo y cambio climático en la planeación sistemática para la conservación: un caso de estudio en la cuenca Grijalva-Usumacinta*. Tesis doctoral en Geografía.
- Leathwick, J. R., Rowe, D., Richardson, J., Elith, J. y Hastie, T. (2005). Using multivariate adaptive regression splines to predict the distributions of New Zealand's freshwater diadromous fish. *Freshwater Biology*, 50, 2034-2052.
- Lehtomäki, J. y Moilanen, A. (2013). Methods and workflow for spatial conservation prioritization using Zonation. *Environmental Modelling & Software*, 47, 128-137.
- Lira, Aguilar, A., Aguilar, V., Alracón, J., Kolb, M., Urquiza-Hass, T., González-Ramírez, L., Tobón, W. y Koleff, P. (2015). Conservation planning for freshwater ecosystems in Mexico. *Biological Conservation*, 192, 357-366.
- Luna-Aranguré, C. A. (2015). Distribución de la nutria neotropical (*Lontra longicaudis annectens*) en la cuenca hidrológica Río Huicicila, Nayarit. México: Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lyo, J. G. (2003). *GIS for water resources and watershed management*. Nueva York: Taylor & Francis.

- Maass, M. J. M. (2015). *El manejo de cuencas desde un enfoque socioecosistémico. Cuencas de México*, 41 pp.
- Manjula, K. R., Jyothi, S., Kumar, A. S. A. y Kumar, V. S. V. (2011). Construction of spatial dataset from remote sensing using gis for deforestation study. *International Journal of Computer Applications*, 31, 10.
- Mankari, M. P., Kodge, G. B., Kulkarni, J. M. y Nagargoje, U. A. (2010). *Geoscience Research*, 1, 2-6.
- Moilanen, A., Leathwick J. y Elith, J. (2008). A method for spatial freshwater conservation prioritization. *Freshwater Biology*, 53, 577-592
- Mora, P. L., Bonifaz, R. y López-Martínez, R. (2016). Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 68, 377-394.
- Nix, H. A. y Busby, J. (1986). Bioclim, a bioclimatic analysis and prediction system. *Annual report csiro*. Canberra: Csiro Division of Water and Land Resources.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*.
- Pelayo-Villamil, P., Guisande, C., Vari, P. R., Manjarrés-Hernández, A., García-Roselló, E., González-Dacosta J. y Jiménez, F. L. (2015). Global diversity patterns of freshwater fishes-potential victims of their own success. *Diversity and Distributions*, 21, 345-356.
- Peterson, A. T. et al. (2011). Ecological niches and geographic distributions. (MPB-49) Princeton University Press.
- Peterson, A. T., Navarro-Singüenza, A. G., Martínez-Meyer, E., Cuervo-Robayo, A. P., Berlanga H. y Soberón, J. (2015). Twentieth century turnover of Mexican endemic avifaunas: Landscape change versus climate drivers. *Sciences Advances*.
- Phillips, S. J. y M. Dudík (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161-175.
- Poff, N. L. (1997). Landscape filters and species traits: towards mechanistic understanding and prediction in stream ecology. *Journal of the North American Benthological Society*, 16, 391-409.
- Poff, N. L. et al. (2010). The ecological limits of hydrologic alteration (eloha): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, 55, 147-170.
- Porporato, A., Daly, E. y Rodriguez-Iturbe, I. (2004). Soil water balance and ecosystem response to climate change. *The American Naturalist*, 164, 625-632.

- Prakash, A. (2006). Introducing Geoinformatics for Earth System Science Education. *Journal of Geoscience Education*, 54, 555-560.
- Pundt, H. y Brinkkötter-Runde (2000). Visualization of spatial data for field-based gis. *Computers & Geosciences*, 26, 51-56.
- Qiao, H., Soberón, J. y Peterson T. A. (2015). No silver bullets in correlative ecological niche modelling: insights from testing among many potential algorithms for niche estimation. *Methods in Ecology and Evolution*, 6, 1126-1136.
- Rodríguez-Gallego, L., Chreties, C., Crisci, M., Fernández, M., Colombo, N., Lanzilotta, B., Saravia, M., Neme, C., Sabaj, V. y Dconde, D. (2011). *Fortalecimiento del concepto de Caudales Ambientales como Herramienta para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*. Uruguay: Vida Silvestre Uruguay.
- Sánchez, V. A. S., García, M. R. N. y Palma, A. T. (2003). *La cuenca hidrográfica: unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales*. México: SEMARNAT.
- SEMARNAT/ Conagua (2015). *Atlas del agua en México 2015*. México.
- SEMARNAT/ Conagua (2016). *Atlas del agua en México 2016*. México.
- Sinha, A. K., Malik, Z., Rezgui, A., Barnes, G. C., Lin, K., Heiken, G., Thomas, A. W., Gundersen, L. C., Raskin, R. Jackson, I. Fox, P., McGuinness, D., Seber, D. y Zimmerman, H. (2010). Geoinformatics: transforming data to knowledge for geosciences. *GSA Today*, 20, 4-10.
- Vásquez, V. A., Mejía, M. A., Faustino, J. M., Terán, R. A., Vásquez, I. R., Díaz, R., Vásquez, R. C., Castro, A. A., Tapia, M. M. y Alcántara, R. J. (2016). *Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J. y Lammers, R. B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289, 284-288
- Wei, X., Li, Q., Zhang, M., Giles-Hansen, K., Liu, W., Fan, H., Wang, Y., Zhou, G., Piao, S. y Liu, S. (2018). Vegetation cover-another dominant factor in determining global water resources in forested regions. *Global Change Biology*, 24(2), 786-795.

