

### Revisión sistemática de cuarenta años de análisis de cambio de uso del suelo en México mediante sistemas de información geográfica

Systematic review of forty years of analysis of land-use change in Mexico using geographic information systems

Catalina Fabiola De Alba-Rosano<sup>1</sup>  
Eliane Cecon<sup>2</sup>,  
Raúl Romero-Calcerrada<sup>3</sup>  
Fernando Rosete-Vergés<sup>4</sup>

#### Resumen

México perdió grandes áreas de sus ecosistemas en las últimas décadas. Buena parte están en manos de comunidades rurales, y sus cambios de uso del suelo afectan la biodiversidad, y reducen muchos servicios ecosistémicos vitales. En las últimas cuatro décadas estos procesos fueron analizados por diversas herramientas de análisis espacial, como las tecnologías de información geográfica. El objetivo de este estudio fue sistematizar esta información, considerando los centros de adscripción del primer autor, revistas utilizadas, estado del país, temporalidad del análisis, fuentes de datos, softwares, modelos, métodos, análisis, ecosistemas y unidades territoriales. Se encontraron 196 artículos coincidentes con todos los criterios anteriores, los cuales fueron clasificados y analizados. Los resultados mostraron que las instituciones públicas fueron las que más estudios realizaron a nivel local y nacional, además de vincularse con universidades extranjeras; Michoacán y Estado de México fueron los estados más analizados; las publicaciones estuvieron concentradas en diez revistas indexadas y publicaciones universitarias; la temporalidad del análisis dependió del área de estudio; la fuente de datos más usada fue Landsat, los modelos por regresión, los métodos por matrices y los análisis multicriterio fueron los más habituales; en los últimos diez años aumentaron los estudios y el uso de software libre; el bosque

<sup>1</sup> Estudiante de doctorado. Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Email: [alba.ambiental@gmail.com](mailto:alba.ambiental@gmail.com)

<sup>2</sup> Profesora investigadora, Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Email: [ececon61@gmail.com](mailto:ececon61@gmail.com)

<sup>3</sup> Profesor Titular, Research Group on Technologies for Landscape Analysis and Diagnosis (TADAT). Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales. Universidad Rey Juan Carlos, España. Email: [raul.romero.calcerrada@urjc.es](mailto:raul.romero.calcerrada@urjc.es)

<sup>4</sup> Profesor investigador, Escuela Nacional de Estudios Superiores unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Email: [fernando.rosetev@enesmorelia.unam.mx](mailto:fernando.rosetev@enesmorelia.unam.mx)

Cómo citar: DE ALBA-ROSANO, C., CECCON, E., ROMERO-CALCERRADA, R. & ROSETE-VERGUÉS, F. (2020). Revisión sistemática de cuarenta años de análisis de cambio de uso del suelo en México mediante sistemas de información geográfica. *Revista de Geografía Espacios*, 10(20), p. 139-162. DOI: 10.25074/07197209.20.1740

templado fue el ecosistema más estudiado, la agricultura fue el cambio de uso del suelo más frecuente y la región hidrológica fue la más utilizada como unidad territorial. Esta sistematización servirá como guía para futuros análisis y proyectos sostenibles.

**Palabras clave:** cuenca, ecosistema, *software*, teledetección, territorio.

## Abstract

Mexico lost large areas of his ecosystems in the last decades. Much of it is in the hands of rural communities and their land-use changes affect biodiversity and reduce many vital ecosystem services. In the last four decades, these processes have been analyzed by spatial analysis tools such as geographic information technologies. The objective of this study was to systematize this information, considering the affiliation centers of the first author, journals used, state of the country, the timing of the analysis, data sources, software, models, methods, analysis, ecosystems, and territorial units. 196 articles matching all the criteria were found, which were classified and analyzed. The results showed that public institutions were the ones that carried out the most studies locally and nationally, in addition to being linked to foreign universities; Michoacán and Estado de México were the most analyzed states; The publications were concentrated in ten indexed magazines and university publications; the timing of the analysis depended on the study area; Landsat was the most used data source, regression models, matrix methods and multicriteria analyzes were the most common; studies and the use of free software have increased in the last ten years; Temperate forest was the most studied ecosystem, agriculture was the most presented land-use change, and the hydrological region was the most used as a territorial unit. This systematization will serve as a guide for future analyzes and sustainable projects.

**Keywords:** watershed, ecosystems, software, remote sensing, territory.

## Introducción

Desde finales del siglo XX se comenzaron a realizar estudios para la evaluación de los cambios en los ecosistemas, con el objetivo de evaluar su efecto sobre el bienestar humano (Halffter, 1994; MEA, 2005). Al inicio de los noventa se realizaron varias reuniones mundiales, como la Cumbre de Río en 1992, en la cual se generó la Agenda 21 (UNCED, 1992) para ejercer acciones de seguimiento a la conservación ambiental. A inicios del siglo XXI se decidió realizar un estudio multidisciplinario a nivel mundial con 95 países, lo que generó la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005). Una de las conclusiones importantes de este estudio fue que, en los últimos 40 años, los seres humanos habían transformado los ecosistemas más rápida y extensamente que en ningún otro período. Como consecuencia, en los últimos treinta años, las estrategias relacionadas con los ecosistemas y sus cambios de uso del suelo han sido encaminadas no sólo a la conservación, sino también a diversas acciones de restauración ambiental (Méndez-Toribio et al, 2018).

A la par, a inicios de los ochenta, comenzó el desarrollo de metodologías de teledetección debido al desarrollo tecnológico de la observación espacial para el Análisis del Cambio de Uso del Suelo (ACUS) (Chuvienco, 1995), lo que permitió registrar que las regiones tropicales eran donde se concentraba la mayor transformación (Vitousek et al, 2008). De este modo, se descubrió que en las zonas tropicales de América Latina, la conversión de terrenos boscosos hacia usos agropecuarios fue una de las causas más importantes de los procesos de fragmentación, deforestación, degradación, desertificación, pérdida de biodiversidad y uno de los mayores detonadores de la pobreza (PNUMA, 2011; FAO, 2016).

México, de acuerdo con FAO (2010), entre 2005 y 2010 ha tenido una pérdida neta de bosques y selvas, estimada entre 50 y 250 mil hectáreas (ha) al año (PNUMA, 2011). Además, estos datos pueden estar subvalorados, ya que el estudio de Rosete et al (2014), llevado a cabo con Sistemas de Información Geográfica (SIG), afirma que la cifra real fue de 431,789 ha/año; gran parte de estos bosques y selvas están en manos de comunidades y ejidos. En 2007, estas propiedades sociales cubrieron un área de tierra cercana a 102 millones de ha, lo que equivale al 53.4% del territorio mexicano (INEGI, 2007). Incluso dentro de las Áreas Naturales Protegidas (ANP), el 60% de la tenencia de la tierra cae dentro de estos sistemas de fondo común (OBSINTER, 2007). Por lo tanto, México es escenario de una profunda crisis socioecológica (Luna-Nemecio, 2020), ya que estos cambios de uso y ocupación del suelo, además de afectar la biodiversidad, han reducido muchos servicios ecosistémicos vitales, principalmente de las comunidades rurales (Ceccon, 2015a). Con la finalidad de solucionar esta problemática, un primer gran paso es conocer en detalle cómo se encuentra el panorama de cambio de uso del suelo, para tomar las medidas adecuadas, de tal manera que se puedan restaurar los servicios ecosistémicos perdidos. En un estudio a nivel nacional sobre cambio de coberturas y usos del suelo, Mas, Velázquez & Couturier (2009) concluyeron que los SIG fueron herramientas adecuadas para el ACUS.

Los SIG son un conjunto de herramientas que integran y relacionan diversos componentes que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos que están vinculados a una referencia espacial, que además facilita la incorporación de varios aspectos tanto sociales-culturales como económicos o ambientales, que ayudan a una toma de decisiones más eficiente (Rodríguez et al, 2017). Además, los SIG han tenido una actualización espacial continua, debido a la necesidad de ser aplicados al análisis del cambio climático global (Luna-Nemecio et al, 2020) y la degradación de suelos tanto a nivel mundial como a nivel local (Chuvienco, 2007; Rojas et al, 2019). Por último, estos sistemas han brindado una poderosa herramienta para el análisis cuantitativo de los cambios de uso y cobertura del suelo (Jazouli et al, 2019).

Si bien se han realizado estudios de ACUS para todo México, en la actualidad no existe ningún estudio que haya sistematizado la información generada, a fin de conocer las diversas fuentes de datos, software y metodologías utilizadas en combinación con las herramientas SIG en las últimas cuatro décadas, a partir de diversos estudios de caso en todos los estados del país. Por lo tanto, el objetivo general de este estudio fue conocer los alcances de los análisis de cambio de uso del suelo en México, en las últimas cuatro décadas, en qué lugar y qué instituciones han llevado a cabo estas investigaciones, las publicaciones relacionadas a los ACUS, el periodo de tiempo evaluado o temporalidad del análisis, las fuentes de datos, el software de SIG elegido, los

modelos, métodos y análisis más utilizados, los ecosistemas, así como las ocupaciones y usos de suelo existentes y por último, las unidades territoriales seleccionadas.

Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo servir como una importante base metodológica para quien pretenda iniciar una investigación de cambio de uso del suelo de los ecosistemas y favorecer nuevas investigaciones para aquellos que lo requieran, por su fragilidad, de mayor atención o de los cuales se tiene poca información. Además, se presentan cuáles fueron las instituciones que más han trabajado sobre el ACUS, lo que podría fomentar nuevas redes regionales de apoyo en esta área. La sistematización presentada podría servir para avanzar en los esfuerzos ya realizados en el pasado en determinadas regiones, ahorrando tiempo y costos de inversión en los proyectos de ACUS.

## Métodos

### *Tipo de estudio*

Se llevó a cabo un análisis documental, el cual consiste en buscar, seleccionar, organizar y analizar un conjunto de materiales escritos para responder a una o varias preguntas sobre un tema (Rodríguez & Luna-Nemecio, 2019). Para este estudio, se inició una búsqueda sistemática sobre todos los trabajos publicados que habían utilizado SIG para el ACUS a lo largo de México en las últimas cuatro décadas.

### *Criterios de selección de documentos*

Se utilizaron buscadores con libre acceso desde el portal de la UNAM que hubieran considerado publicaciones con artículos arbitrados como *Google Scholar*, *Science Direct* y *Scopus*; se seleccionaron palabras claves en inglés y en español con base a los criterios relacionados al ACUS: *land use change*; *GIS*; *Mexico*; *ecosystems*; cambio de uso del suelo; SIG; México y ecosistemas. En la tabla 1 se presentan los términos de la consulta realizada considerando los buscadores, las palabras clave y el número de documentos encontrados, según los términos de consulta utilizados por Cecon, González & Martorell (2015b). De esta búsqueda exhaustiva, se generaron un total de 37,752 artículos relacionados a los términos de consulta.

Tabla 1. Términos de consulta de publicaciones arbitradas para todo México sobre análisis de cambio de uso del suelo

BUSCADOR	PALABRAS CLAVE	NÚMERO DE DOCUMENTOS
Google scholar <sup>1</sup>	Land use change AND GIS AND Mexico AND ecosystems (inglés)	21000
	cambio de uso del suelo, SIG, México, ecosistemas (español)	15900
Science direct <sup>2</sup>	Land use change AND GIS AND Mexico AND ecosystems (inglés)	1314
	cambio de uso del suelo, SIG, México, ecosistemas (español)	17
Scopus <sup>3</sup>	Land use change AND GIS AND Mexico AND ecosystems (inglés)	20

	cambio de uso del suelo, SIG, México, ecosistemas (español)	1
1. Rango de tiempo: 1979-2019. No incluye citas ni patentes, la consulta considera todo el cuerpo del trabajo.		
2. Rango de tiempo encontrado: 1995-2019, considera solo artículos revisados y artículos de investigación, con acceso por Elsevier a través de BIDIUNAM		
3. Rango de tiempo: 1979-2019		

Fuente: Elaboración propia.

### *Selección*

Del total de artículos encontrados, en primera instancia, se eliminaron las redundancias; en segunda instancia, se seleccionaron solamente aquellos estudios que hubieran incluido todos los siguientes criterios: i) haber llevado a cabo un análisis de cambio de uso del suelo; ii) haber contado con un intervalo de análisis entre 1979 y 2019; iii) la zona de estudio se encontraba dentro de la zona marítima y/o terrestre de México; iv) haber especificado la fuente de datos; v) haber descrito el modelo, método y/o análisis; vi) haber detallado los ecosistemas analizados, así como los usos de suelo y vegetación; y por último, vii) haber especificado la unidad territorial. Sólo 196 artículos científicos cumplieron todos los criterios; el dato del centro de adscripción del primer autor y el nombre de la revista también fueron sistematizados.

### *Análisis de datos*

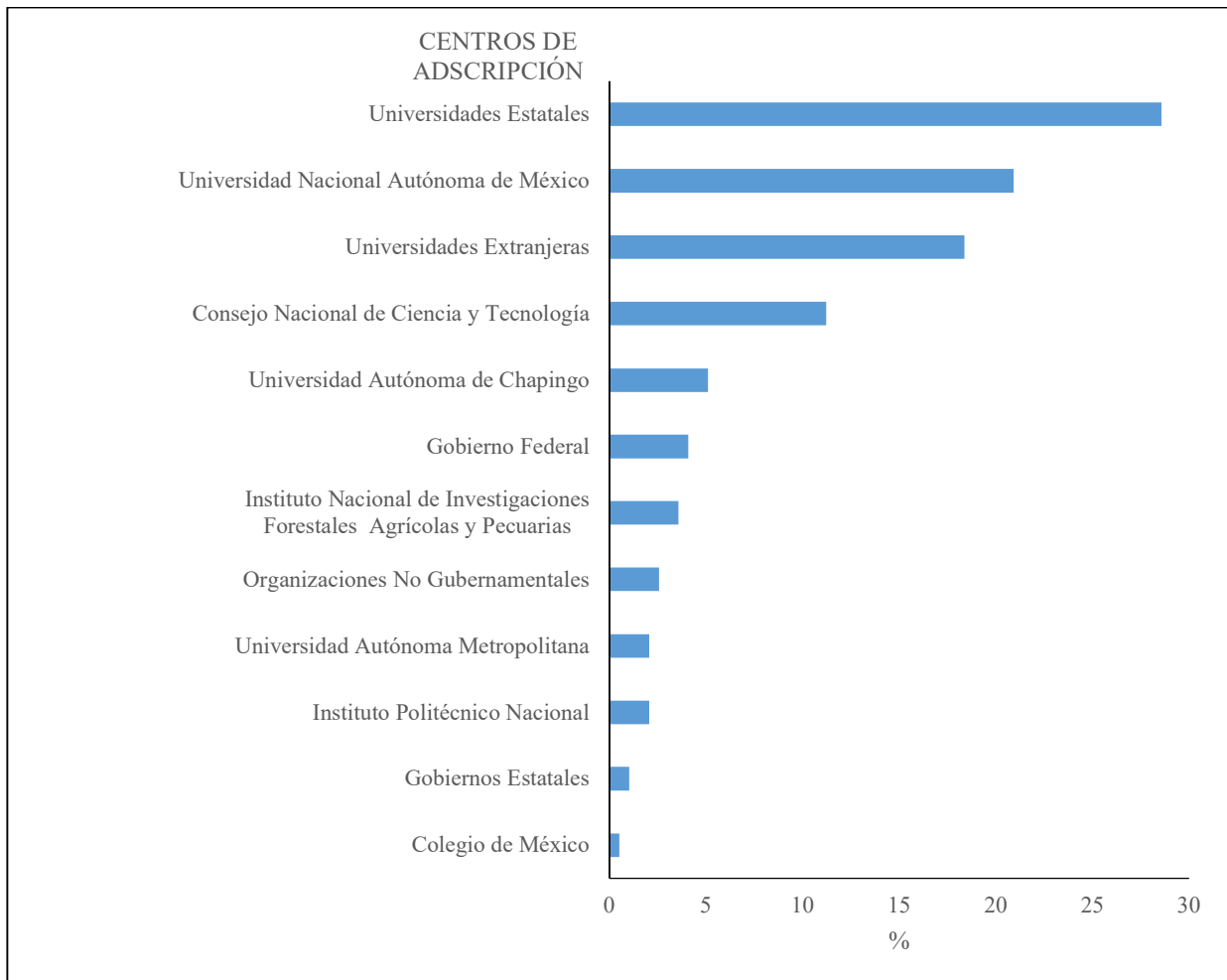
Previo al análisis de los datos, se realizó una simplificación, limpieza y organización de estos. Para el análisis de la tendencia de publicaciones por año se calculó a través de una correlación lineal; para la clasificación de ecosistemas y usos de suelo y vegetación se realizaron consultas en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), así como en la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Finalmente, para la sistematización de todos los criterios se extrajeron los porcentajes de cada variable evaluada y se realizó su representación gráfica.

## **Resultados y discusión**

### *Instituciones que realizan ACUS*

La disparidad en los estudios encontrados a lo largo del país surgió por la mayor capacidad científica de algunos centros de investigación y universidades, así también por el interés a nivel internacional de estudios ambientales (Farley et al, 2012). Es sobresaliente que la mayoría de los análisis fueron realizados por instituciones públicas, como los centros de investigación y facultades adscritas a universidades estatales (28%), los centros de investigación, facultades e institutos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (21%), así como un 11% se encontraron en los institutos de investigación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Sólo 18% de los ACUS fueron realizados por universidades extranjeras y muchos de estos estudios se efectuaron en colaboración con investigadores nacionales (con interés particular en Reservas de la Biósfera y estudios transfronterizos) (Figura 1).

Figura 1. Universidades y centros de adscripción donde se llevaron a cabo los estudios sobre el análisis de cambio de uso del suelo



Fuente: Elaboración propia.

*La distribución de las publicaciones sobre ACUS en el territorio*

Se encontró que los estados donde se presentó el mayor porcentaje de estudios fueron aquellos donde existen instituciones de investigación sobre el tema, como el Estado de México (8.7%), que posee la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México con 25

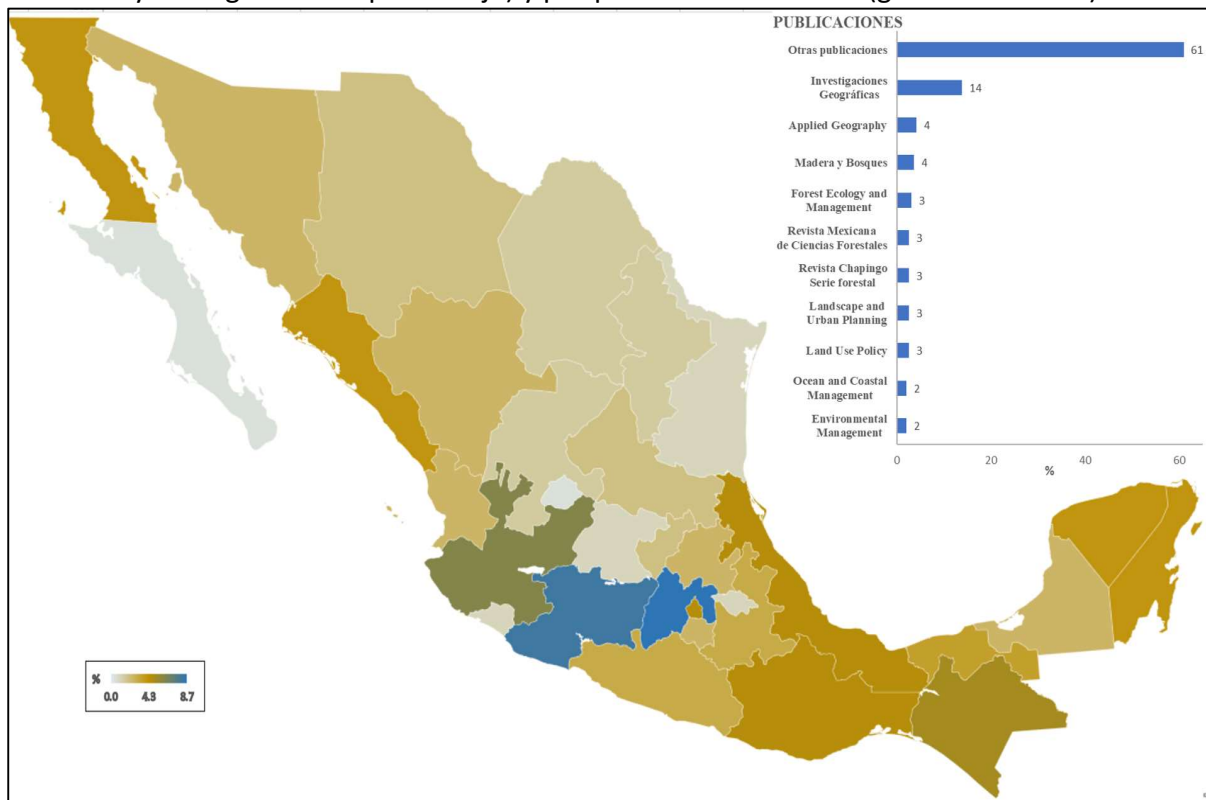
investigadores. Esta institución ha generado información relacionada a la superficie de bosques del estado en confluencia a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCDMX), así como ACUS con fines de especulación inmobiliaria para su conversión a infraestructura urbana (Pérez-Miranda et al, 2011). En segundo lugar, estuvo Michoacán, con 8.2% de las publicaciones del Centro de Investigación en Geografía (CIGA) de la UNAM, la cual cuenta con 44 investigadores que han desarrollado múltiples estudios estatales, regionales y nacionales (Bocco et al, 1999; Gopar-Merino & Velázquez, 2015).

En Jalisco (6.6%) existe el Instituto de Información Estadística y Geográfica (IIEG), el cual desde el 2016 firmó un convenio con el CIGA, para el desarrollo de investigación y capacitación, por lo que se ha logrado mayor detalle en los ACUS de la zona metropolitana de Guadalajara y su relación con el bosque de la primavera, así como en sus zonas costeras (Gallegos et al, 2006; Kolb et al, 2018). El mismo caso se ha dado en otros estados como Oaxaca, Veracruz, Baja California, Quintana Roo, Sinaloa y Yucatán, donde desde hace tres décadas se encontraron publicaciones de ACUS sobre la especulación turística en bosques, selvas, manglares, dunas costeras, arrecifes coralinos, playas e islas (Ibarra-Núñez et al, 2018). En la Ciudad de México (CDMX) se encontraron 5.2% de las publicaciones; en los estados fronterizos del norte, se encontraron sólo estudios binacionales (Farley et al, 2012), esto podría ser debido al Tratado de libre comercio entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC) (T-MEC, 2019) y a la existencia del Acuerdo para la Cooperación Ambiental (ACA) (CEC, 2020).

#### *Publicaciones relacionadas a los artículos sistematizados*

Con relación a las revistas, se encontró mucha diversidad, sin embargo, *Investigaciones Geográficas* aportó el mayor porcentaje de los artículos revisados (14%); otras nueve revistas indexadas contribuyeron con el 25% de los artículos revisados, pero el 61% de artículos restantes fueron publicados en otras revistas nacionales y extranjeras, así como por las propias universidades estatales. Las revistas internacionales con temáticas geográficas, ecológicas, forestales, de conservación y de restauración ambiental mostraron un interés sobre los ACUS realizados en México (Figura 2).

Figura 2. Porcentaje de artículos publicados sobre análisis de cambio de uso del suelo a través de sistemas de información geográfica por cada estado de México (color azul mayor porcentaje y color gris menor porcentaje) y por publicación indexada (grafica de barras)



Fuente: Elaboración propia.

#### *País de adscripción del primer autor y año de publicación*

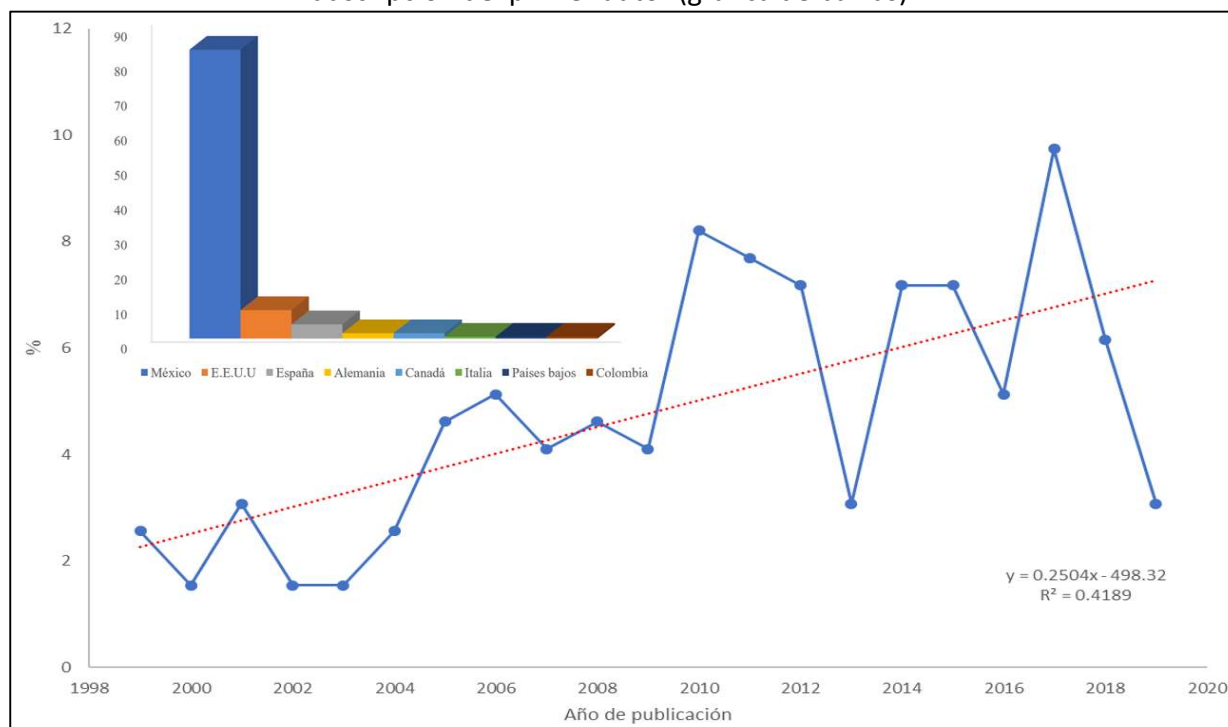
En el 83% de los estudios, el país de adscripción del primer autor fue México. El 8% tuvieron investigadores de instituciones de Estados Unidos de América como primer autor y el 1.5% de Canadá, lo cual podría deberse por la cercanía con México, lo que les vincula tanto a nivel comercial como biogeográfico. Con relación al año de publicación, 36% fueron publicados en el intervalo de 1999 al 2009 y 74% del 2010 al 2019, por lo que se manifiesta un incremento en la investigación sobre ACUS con SIG, debido al desarrollo tecnológico, así como a la accesibilidad a los software de bajo costo, gratuitos o por convenios de acceso (universitarios y/o investigación); otra razón fue que desde 2001, la información satelital de la United States Geological Survey (USGS) y del Visor de visualización global de USGS (GloVis) han estado disponibles para que los usuarios accedan a los datos de detección remota (USGS, 2020).

A partir del 2014, el INEGI ha digitalizado todos los mapas cartográficos, además, generó nueva información satelital, por lo que ha ido mejorando su plataforma, que ahora es de acceso gratuito (INEGI, 2020). Se observó que la tendencia anual de publicaciones tuvo una pendiente positiva por lo que se comprobó que ha existido un incremento en las publicaciones a lo largo de los años, lo que ha mostrado un incremento en el interés sobre este tema, sin embargo, la



correlación ( $R^2$ ) mostró que hay una dispersión muy alta, es decir, que hay una diferencia muy grande entre número de publicaciones entre un año y otro (Figura 3).

Figura 3. Número de publicaciones por año según las bases de datos generadas por *Google Scholar*, *Science direct* y *Scopus* y porcentaje de publicaciones por país con relación a la adscripción del primer autor (gráfica de barras)\*



Fuente: Elaboración propia. \*El año 2019 sólo abarcó información hasta marzo 2019.

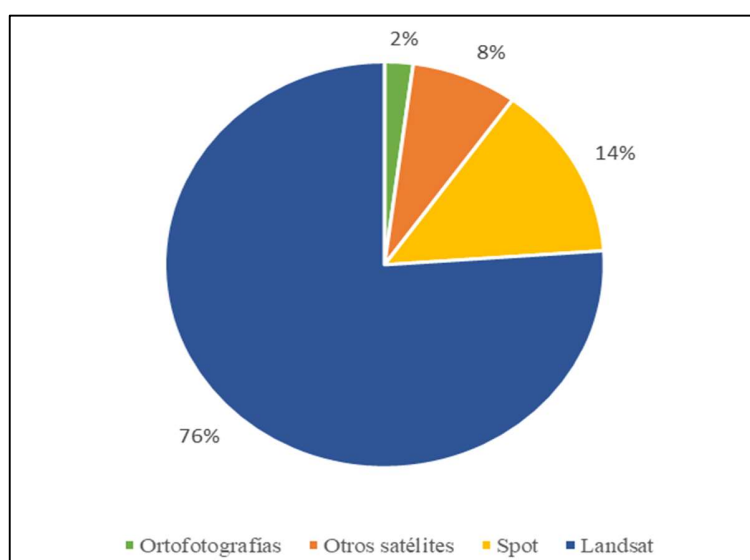
### Las fuentes de datos

A través de la revisión documental, se observó que las imágenes por percepción remota fueron obtenidas a través de diversas fuentes de datos; *Landsat* con sus diversos productos (MSS, 5 TM, 7 ETM+, 8 OLI) fue el más utilizado (76.1%), seguido de *SPOT* (14%) con una amplia gama de satélites utilizados (1987, 4, 5, 7, 2009, 2011); una variedad de satélites como ASTER, Geosy-1, RapidEye, Terra, MODIS, NESDIS, Quikbird e IKONOS los cuales mostraron imágenes en un 7.8% de los estudios. La prevalencia de *Landsat*, se debe a que se desarrolló comercialmente desde hace 40 años, como un proyecto de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio estadounidense (NASA), lo cual revolucionó la forma de ver la cubierta del planeta y se ha utilizado tanto para estudios en grandes superficies (>3,900 Km<sup>2</sup>) como para estudios comparativos (Ariza, 2013); actualmente se puede lograr libre acceso a las imágenes a través de internet por medio de la USGS, por lo que muchos grupos de investigación han elegido esta como una fuente de información permanente, ya que los satélites se están actualizando constantemente. A partir del 2014, a través del programa *Copernicus*, se está desarrollando una línea de investigación con las imágenes satelitales de *Sentinel* para el monitoreo de la expansión urbana, en un programa piloto que incluye las zonas metropolitanas de Guadalajara,

Aguascalientes, León, Ciudad de México y Mérida (CENTROGEO, 2020), sin embargo todavía no se habían generado publicaciones al respecto al momento de este estudio.

El *SPOT* tuvo un uso reducido debido a que las imágenes debían ser solicitadas gratuitamente al INEGI como usuario autorizado y esperar mucho tiempo hasta su entrega, ya que en México se encuentran resguardadas por el gobierno federal, además el acervo ha sido menor comparado con *Landsat* (INEGI, 2020). Por último, la ortofotografía (2.1%) fue fundamental en los inicios de la percepción remota, sin embargo, debido a la dificultad para la obtención de datos, la variación de la escala, la calidad de la imagen y las condiciones climáticas (Botía et al, 2017) ha sido desplazada por el uso de los recursos digitales (Figura 4).

Figura 4. Fuentes de datos más utilizadas para el análisis de cambios de uso de suelo en México durante las últimas cuatro décadas



Fuente: Elaboración propia.

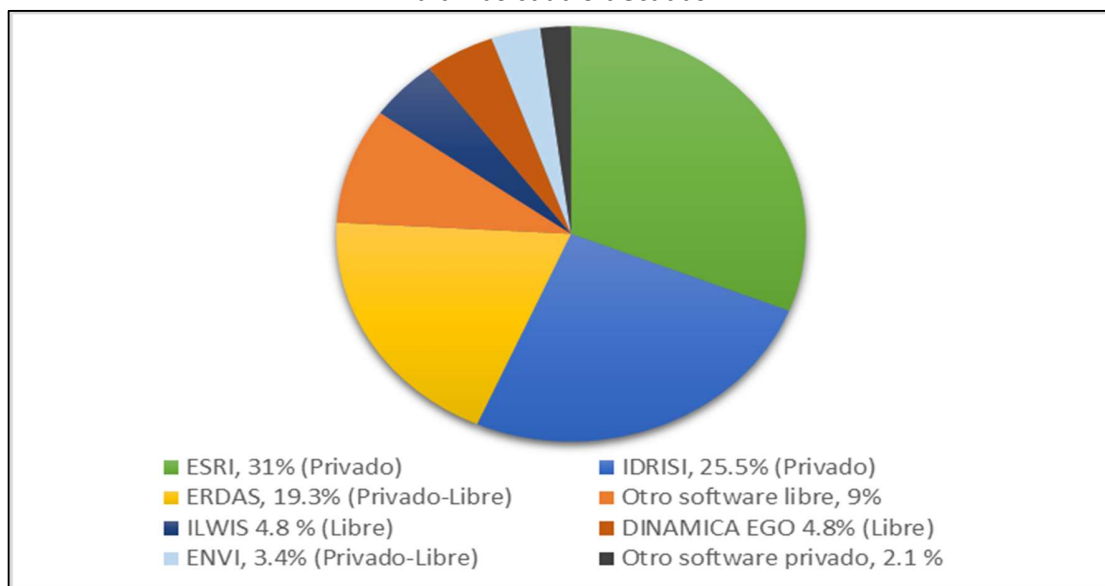
#### *Los softwares utilizados*

En relación con el software utilizado, se encontró que el privado se presentó en el 58.6% de los estudios de caso, este porcentaje se dividió en softwares de SIG como: ESRI (31%) dividido en Arc gis 9.2, Arc gis 9.3, ArcView, Patch Analyst, ArcInfo, ArcMap y GeoHMS; IDRISI (25.5%), clasificado en: Kilimanjaro, Taiga, Andes y Selva; otro software privado fue el relacionado a la teledetección (2.1%) como fueron los programas PCI geomatics y eCognition Professional 5.0. ERDAS con un 19.3% repartido en Erdas, Erdas imagine y Erdas mapper, que inicialmente fue un software privado, pero ahora se puede descargar de forma libre a través de diversos accesos a internet, así como el ENVI (3.4%). El software libre se ocupó en 18.6% de los estudios y se distribuyó en: GvSIG, GRASS, InVEST, Kosmo 2.0, Multispec, QGIS y Spring que suman todos ellos un 9%, ILWIS (4.8%) y Dinámica Ego (4.8%).

Existen grandes diferencias entre los softwares libres y privados. Se sabe que el software llamado privado, comercial o propietario, fue planteado con fines comerciales por empresas que producían SIG con interfaces fáciles de usar en computadoras de escritorio (Sanchez et al, 2016; Waters, 2017); sus desventajas han sido los cursos de aprendizaje costosos, el secreto del código fuente, además, de existir la prohibición a realizar copias o modificaciones (considerado ilegal). En contraste, el software libre ha surgido como una solución para romper la situación de monopolio, para que el mercado y los usuarios recuperen su libertad; algunas de sus ventajas según varios autores, han sido el bajo costo de adquisición y libre uso, la innovación tecnológica, los requisitos de hardware mínimos, etcétera y como desventajas se observa que no existen garantías, algunos programas se han ido estabilizando durante su uso y ha existido menor compatibilidad con el hardware, entre otros (Chakraborty et al, 2015; Leidig & Teeuw, 2015), aunque debido al uso masivo a nivel mundial, los propios usuarios al compartir la información han ido mejorando los protocolos llegando más rápido a la estabilidad.

El software de uso comercial sigue prevaleciendo sobre el software libre en México, lo que tiene un alto costo en el presupuesto federal, estatal y municipal, por lo que se debería tomar el ejemplo de gobiernos de otros países que tienen exitosas políticas de software libre; en la actualidad se ha comenzado a dar educación y capacitación en esta materia en importantes instituciones como en el IGG-UNAM y el CM (Colegio de México, 2019; GITS, 2016) (Figura 5).

Figura 5. Softwares utilizados para el análisis de cambios de uso de suelo en México en las últimas cuatro décadas



Fuente: Elaboración propia.

#### Temporalidad del análisis

Para el criterio de temporalidad del análisis o período de tiempo evaluado, se encontró que el 16.3% de los estudios utilizó un intervalo entre uno y tres años; este intervalo fue elegido para proyectos de producción agrícola, programas comunitarios y de conservación; el 10.2% utilizó un intervalo entre cuatro y nueve años, en el cual se estudiaron los procesos de deforestación y cambios de cobertura en terrenos forestales; el 21% de diez a catorce años en el cual se analizaron

procesos de deforestación, urbanización, afectación a servicios ecosistémicos y análisis por microcuencas hidrográficas; el 26% de 15 a 24 años, período en el que se encontró que las áreas analizadas fueron por subcuencas, divisiones políticas (comunidades o municipios, zonas transfronterizas) y geográficas (sierras, valles, riberas); el 26% con un período entre 25 y 40 años consideró el análisis de reservas de la biósfera, grandes zonas metropolitanas, cuencas hidrográficas, ecosistemas lagunares, humedales, selvas y zonas costeras. El intervalo seleccionado dependió de los procesos específicos que se deseaban conocer como deforestación, erosión, pérdida de servicios ecosistémicos, crecimiento urbano, etcétera.

#### *Métodos, modelos y análisis utilizados en los estudios de caso*

Se identificaron diversos análisis y técnicas espaciales, las cuales no necesariamente operaban dentro de los SIG, pero que coadyuvaron con los mismos para la obtención de resultados sobre los cambios de uso de suelo; estos se encontraron como métodos, modelos y análisis. Con referencia a los métodos, los principales fueron: matrices de confusión o cambio (o de transición); métodos de planeación y planificación, mismos que consideraron a las comunidades y pobladores de las zonas de estudio a través de talleres, encuestas y entrevistas, lo cual ayudó a la precisión de los datos trabajados mediante SIG; el método de interpretación interdependiente desarrollado por la FAO (este considera en su proceso una matriz de cambio) facilitó la coherencia y comparabilidad internacional en las estadísticas, además de aportar definiciones, conceptos y clasificaciones (FAO, 2019); los métodos de cálculo consideraron la bioenergía, la fragmentación, la resiliencia y la biodiversidad.

Los modelos encontrados se clasificaron en: regresión, correlación, prospección (como las cadenas de Markov y autómatas celulares), los cuales ayudaron mucho para la proyección a futuro de las zonas estudiadas y finalmente, los modelos de autor o instituciones (que por su experiencia fueron mejorando los métodos establecidos o en su caso realizaron combinaciones de estos). Los análisis en su mayoría fueron análisis multicriterio, aunque hubo muchos otros como Kruskal-Wallis, componentes principales (PCA), proceso jerárquico analítico (PJA), análisis de fragmentación y conectividad, y análisis multiescala; todos los anteriores ayudaron a organizar y clasificar la información generada con SIG para la toma de decisiones.

#### *Los ecosistemas analizados*

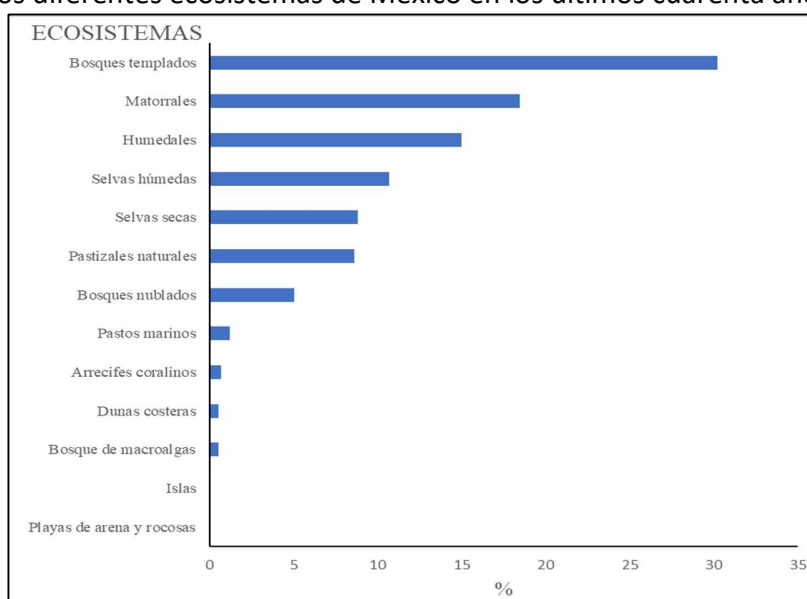
Con relación a los ecosistemas analizados, se tomó la clasificación de los ecosistemas de México de la CONABIO, la cual considera 13 ecosistemas principales (CONABIO, 2020). A pesar de que, a nivel nacional, es mayor el área de matorral (28.8%) que la de bosques (17.4%), según el último inventario forestal realizado para todo México para el período 2009-2014 (CONAFOR, 2018), en esta investigación, el mayor porcentaje de ecosistemas evaluados fueron en el bosque templado (30.2%) y en segundo lugar, el matorral con un 18.5% de los ACUS, posiblemente porque las zonas boscosas tienen una mayor importancia comercial (Tadeo-Noble et al, 2019), ya que en México se producen 7 millones de m<sup>3</sup> de recursos maderables reportados (Haro, 2019). También existe una mayor disponibilidad de recursos hídricos en los ecosistemas de bosque que en el matorral (Del Campo et al, 2019), lo que propicia los cambios de uso de suelo hacia la expansión agrícola y la extensión de infraestructura (Monjardín-Armenta et al, 2017).

El tercer ecosistema más analizado fue el humedal (15%), en el que fueron incluidos manglares, bosques de galería, estuarios y lagunas, marismas, tulares, lagunas costeras, vegetación enraizada, ciénagas, pantanos y la denominada vegetación hidrófila. México es el cuarto país a nivel mundial con presencia de humedales, los cuales se han perdido en un 20% aproximadamente en las últimas dos décadas y han sido clasificados en los sitios Ramsar a nivel internacional (Calderón et al, 2009; Valderrama-Landeros et al, 2017). Solamente 10.7% de los ACUS analizaron la selva húmeda y 8.8% la selva seca, a pesar de la importancia de sus servicios ecosistémicos (Ceballos et al, 2010) y sus altas tasas de deforestación (Hersperger et al, 2016); los pastizales (8.6%) son importantes para evitar la erosión del suelo y ayudan a incrementar las tasas de infiltración de agua (Álvarez-Lopezello et al, 2016), además de ser un área importante para cambios de uso de suelo pecuario.

Otros cinco ecosistemas presentaron un porcentaje igual o menor al 5%, lo que representa un importante vacío en la información sobre dunas costeras, arrecifes, bosques de macroalgas y pastos marinos. No se encontró ningún estudio de ACUS que considerara como tema de investigación principal los ecosistemas de playas de arena y rocosas e islas. A nivel mundial, se sabe que los arrecifes coralinos son grandes bancos de carbono y sirven como barreras para huracanes, pero están siendo dañados por el calentamiento global y la acidificación del mar (SEMARNAT, 2013), también las dunas costeras representan una barrera ante la situación de vulnerabilidad climática costera (Jiménez-Orocio et al, 2015), además de ser el lugar de intercambio biológico entre los ecosistemas costeros y los ecosistemas terrestres.

Se encontró que para los trece ecosistemas naturales se manifiesta una fragmentación y cambio de uso del suelo debido a la demanda de servicios hidrológicos, el saqueo de leña, incendios, tala clandestina, desarrollo de proyectos turísticos, expansión urbana, expansión agrícola, entre otros (Hernández et al, 2016). Se observa la necesidad de generación de proyectos de investigación que consideren objetivos a corto, mediano y largo plazo para los ecosistemas de México donde sea asegurada la prevalencia de los servicios ecosistémicos, a pesar de que pudieran llevarse a cabo cambios de uso de suelo; en la actualidad existen diversos softwares gratuitos de SIG en los que se pueden hacer matrices y redes neuronales para este tipo de prospecciones (Figura 6).

Figura 6. Porcentaje de estudios de caso de análisis de cambios de uso de suelo encontrados en los diferentes ecosistemas de México en los últimos cuarenta años



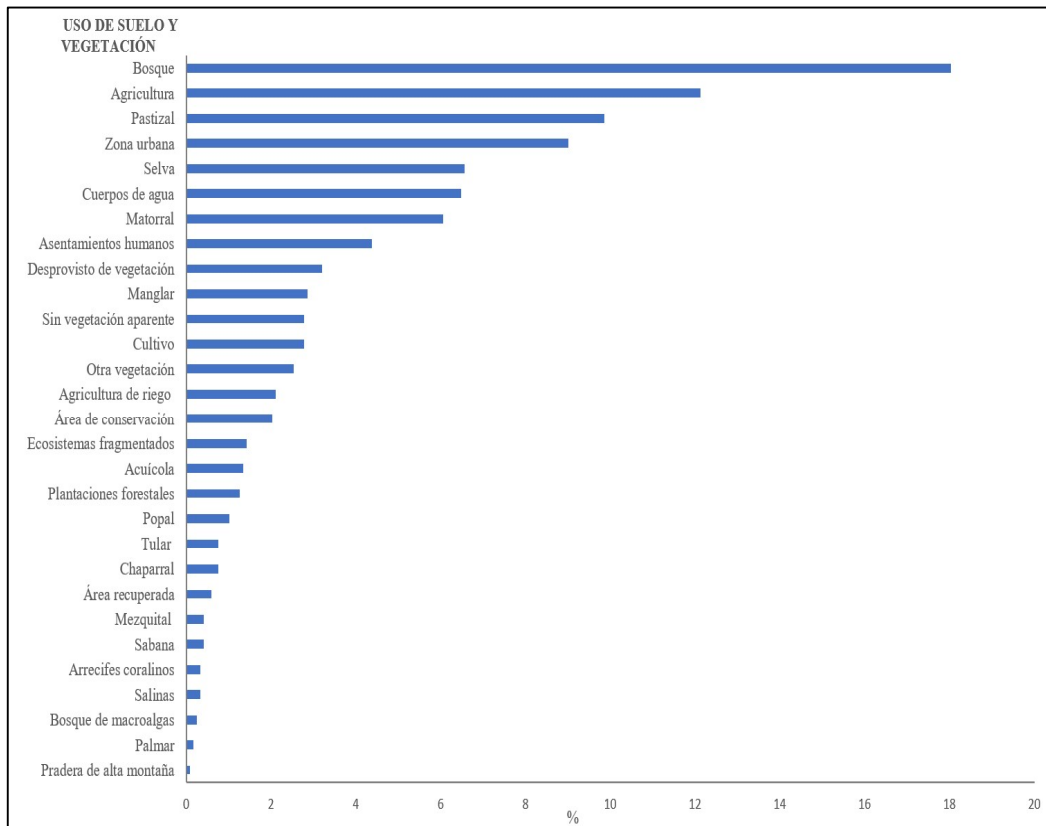
Fuente: Elaboración propia con base en la clasificación de ecosistemas de CONABIO (2020).

#### *Tipos de ocupación, uso de suelo y vegetación encontrados*

Se realizó la clasificación según el mapa de INEGI de uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, (continuo nacional) serie VI (2016) que contabiliza 23 tipos de uso de suelo y vegetación, a los cuales se les añadieron los tipos: áreas de conservación (1.9%), ecosistemas fragmentados (1.4%), plantaciones forestales (1.2%), áreas recuperadas (0.6%), arrecifes coralinos (0.3%) y bosques de macroalgas (0.2%). Se encontró que el bosque (17.2%) es el uso de suelo más presentado en los ACUS, seguido de la agricultura de temporal (11.6%), que mostró haber sido una ocupación de suelo utilizada en todos los ecosistemas; el pastizal (9.4%), tanto natural como inducido ha presentado el tercer lugar en ocupación del suelo, principalmente para uso pecuario, la zona urbana (8.6%) es una de las ocupaciones de suelo que también ha mostrado ser una de las que mayor impacto ambiental genera a cualquier ecosistema con la afectación directa a todos sus servicios ecosistémicos (Ortega et al, 2005; Pérez-Sánchez et al, 2016).

Los usos de suelo menos presentados en los ACUS fueron la sábana, salinas, pradera de alta montaña, palmar, bosque de macroalgas, arrecifes coralinos y mezquital, todos ellos con menos de 0.5%, esto podría deberse a que las áreas ocupadas a nivel nacional son muy pequeñas, o que no hay interés en su estudio. Los proyectos de conservación, recuperación y plantaciones forestales podrían aplicarse a las zonas con ecosistemas fragmentados a través de planes de restauración ambiental (Méndez-Toribio et al, 2018) a nivel local que sean puestos en marcha, por parte de las comunidades a través de un incentivo de pagos por servicios ambientales (Figura 7).

Figura 7. Porcentaje de ocupación, usos de suelo y vegetación encontrados en los estudios de caso de ACUS en México en los últimos cuarenta años



Fuente: Elaboración propia con base en clasificación de la carta de uso del suelo y vegetación de INEGI escala 1:250000, serie VI (2016).

*Selección de la unidad territorial para el análisis de los cambios de uso*

En términos de unidades territoriales utilizadas en los estudios de ACUS, predominaron las regiones hidrológicas (lagunas, ríos, cuencas, subcuencas y microcuencas) en casi una cuarta parte de los estudios de caso (23%), esta selección podría deberse a que el manejo desde una visión de cuenca hidrográfica facilita la interrelación entre los factores ambientales y los factores sociales (Jujnovsky et al, 2017). En segunda instancia, se encontró que las áreas de conservación regidas y protegidas desde un marco legal e institucional fueron seleccionadas para una quinta parte de los estudios (21%), debido a su importancia ambiental tanto nacional como mundial (UNESCO, 2018); dentro de estas se encontraron: Reservas de la Biósfera, ANP (son 182 a nivel nacional) (Maza & De la Maza, 2005), Áreas Prioritarias para la Conservación (APC), corredores biológicos y parques nacionales; en estos ACUS, se observó que a pesar de la naturaleza legal de protección de estas áreas, hubo un proceso de deforestación, quema, fragmentación y cambio de uso del suelo, que se relacionó a áreas agrícolas, pastizal inducido y asentamientos humanos.

En tercer lugar, la delimitación geográfica como sierras, bahías, zonas costeras, penínsulas y valles, fueron analizados en el 16% de los casos, lo cual podría deberse a una facilidad para

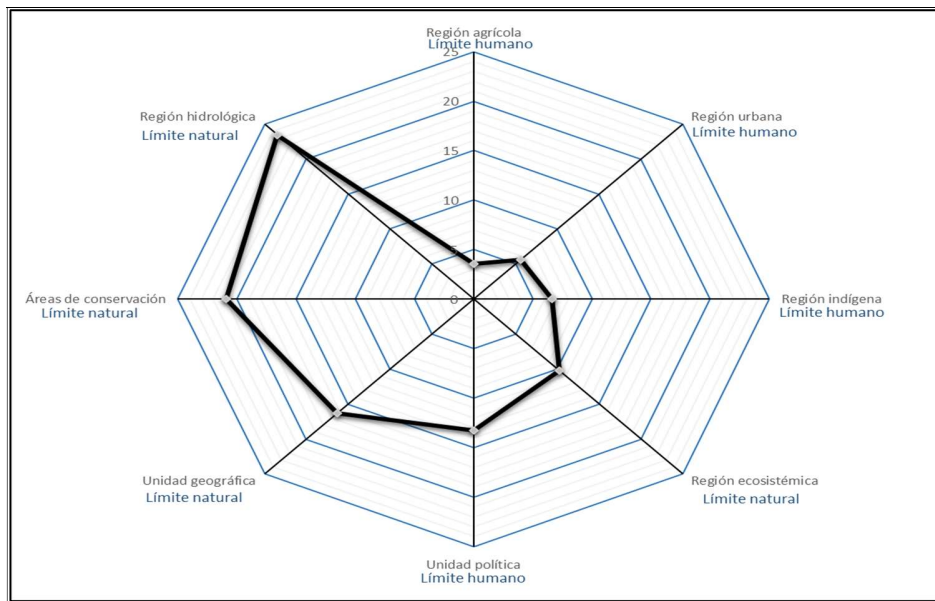
comprender el entorno biofísico. En esta unidad territorial, los cambios de uso del suelo se dieron hacia agricultura, bosques fragmentados, pastizales y áreas turísticas. En el 13% de los casos se consideró la delimitación política como importancia de análisis, ya fuera por estado del país o municipio; este tipo de selección pudo deberse a intereses para la toma de decisiones relacionadas a políticas de desarrollo. Como caso especial, resultó la selección por región ecosistémica (10%), ya que aunque las zonas no estaban declaradas legalmente para su protección, se sabía que en la región existían ecosistemas de gran importancia ambiental por los servicios ecosistémicos relacionados, como bosques, selvas, manglares, ciénagas, arrecifes coralinos y dunas costeras, una gran parte de las zonas estaban siendo amenazadas por un creciente cambio de uso del suelo a zonas turísticas y zonas urbanas primordialmente.

En un 6.6% se consideraron las comunidades indígenas como regiones de importancia para el ACUS y se observó que estos estudios se localizaban en diversas regiones de México: desde las comunidades Pimas en Sonora, pasando por comunidades mazahuas del centro del país, hasta las comunidades mayas de Yucatán y Campeche. La relevancia de esta selección se deriva de la necesidad de fortalecer el uso sostenible de los recursos naturales. De hecho, en México, según Alcorn & Toledo (1995), el término "comunidad" se utiliza para referirse a las prácticas comunitarias y las identidades culturales principalmente relacionadas con los pueblos indígenas que, incluso mucho antes de la llegada de los españoles, desarrollaron ciertos arreglos institucionales para obtener beneficios colectivos y mantener prácticas de producción.

Es imperante comprender el comportamiento de los cambios de uso de suelo para poder establecer lineamientos adecuados para los Ordenamientos Territoriales, de tal forma que los ACUS podrían ser una herramienta legal de apoyo a los mismos, ofreciendo una fortaleza jurídica a la preservación ambiental. Se observó a través de los estudios realizados, que los límites naturales (hidrológicos, áreas de conservación, unidades geográficas y regiones ecosistémicas) fueron una preocupación relevante con respecto a los límites humanos. Esto indica que los cambios de ocupación del suelo se asocian a esas priorizaciones naturales (71%) por encima de las priorizaciones humanas (29%). El agua y la biodiversidad fueron las máximas preocupaciones manifestadas, las cuales forman parte de los servicios ecosistémicos de cualquier unidad territorial (Figura 8).



Figura 8. Criterios de selección de zonas de estudio para el análisis de los cambios de uso de suelo en México en los últimos cuarenta años



Fuente: Elaboración propia.

## Conclusiones

A través de esta sistematización se logró plantear una base metodológica para decidir los criterios que deberán considerarse en futuras investigaciones sobre análisis de cambios de uso de suelo existentes en México.

Se encontró que más de las dos terceras partes de la investigación sobre ACUS se está llevando a cabo en instituciones públicas, además de otros proyectos vinculantes con universidades internacionales y organizaciones no gubernamentales, lo cual es relevante para la preservación de los reservorios biológicos y de germoplasma mundiales existentes en México. Estas investigaciones estuvieron concentradas en la zona centro del país, tanto por su crecimiento urbano, como por el cambio de ocupación del suelo a zonas agrícolas y pecuarias; en las zonas costeras el interés fue debido a la presión de la especulación turística y su impacto ambiental y en la frontera norte los ACUS fueron binacionales debidos al ACA. Se deberían fortalecer los proyectos de las instituciones públicas estatales y la publicación de sus investigaciones, para que exista un conocimiento íntegro de todo el territorio mexicano, ya que se observó un interés creciente de las publicaciones internacionales sobre los ACUS realizados en México.

A través del análisis anual de publicaciones, se descubrió que la tendencia sobre ACUS vinculados a SIG en los últimos diez años fue creciente, en gran medida debido a la liberación de imágenes satelitales aunado al incremento en el acceso a software libre, lo que ha facilitado la divulgación científica, ya que en décadas anteriores estas investigaciones habían sido limitadas a una cuestión presupuestal.

Para la selección de la temporalidad de análisis, es necesario conocer con exactitud el marco biofísico de la zona de estudio y definir los procesos que se desean conocer. Los métodos,

modelos y análisis combinados entre sí, pueden explicar los factores detrás de los patrones espaciales, y vinculados a la coordinación de encuestas y/o entrevistas con la población de muestreo, se lograría un enriquecimiento del proceso de obtención de datos para el análisis de cambios de uso de suelo ocurridos.

Se encontró que existen suficientes estudios de ACUS sobre los bosques del país, sin embargo, las tasas de deforestación siguen en aumento; los ACUS sobre matorral y ecosistemas marinos son escasos; la pérdida de ecosistemas naturales es creciente. Los cambios de ocupación hacia zonas agrícolas, pastizales inducidos y zonas urbanas son los que mayor presencia tuvieron en todo el territorio mexicano; estos cambios podrían llevarse a cabo de forma sustentable a través de la utilización de modelación, como las cadenas de Markov y los autómatas celulares en conjunción con la planeación participativa comunitaria.

Los límites naturales como criterio de selección por unidad territorial, fue un factor primordial que enriqueció el entendimiento de la relación de las actividades humanas y los servicios ecosistémicos. La apropiación de proyectos sostenibles por parte de las comunidades contribuiría a su protección y restauración ambiental, así como al crecimiento económico de las mismas.

En México la investigación en análisis de cambios de uso de suelo mediante SIG que se ha producido en los últimos cuarenta años ha sido relevante para comenzar a generar programas de ordenamiento ecológico del territorio y podría convertirse en una herramienta legal de apoyo aunado a los estudios de conservación y restauración. Sin embargo, es imperante la creación de grupos de trabajo y redes a nivel nacional e internacional que mantengan actualizada la información de las diversas zonas del país, considerando como factor vinculante las regiones hidrológicas y la biodiversidad, de tal manera que sea involucrada a la sociedad en estos proyectos de desarrollo sostenible para lograr la disminución de la pobreza, la protección y la restauración de ecosistemas.

## Bibliografía

ALCORN, J.B. & TOLEDO, V.M. (1995). The Role of Tenurial Shells in Ecological Sustainability: Property Rights and Natural Resource Management in Mexico. Reinventing the Commons, the Fifth Biennial Conference of the International Association for the Study of Common Property. Norway.

ÁLVAREZ-LOPEZTELLO, J., RIVAS-MANZANO, I. V., AGUILERA-GÓMEZ, L.I. & GONZÁLEZ-LEDESMA, M. (2016). Diversidad y estructura de un pastizal en El Cerrillo, Piedras Blancas, Estado de México, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3), p. 980-989. DOI: 10.1016/j.rmb.2016.06.006.

ARIZA, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)*. IGAC-CIAF. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/324656141\\_Descripcion\\_y\\_Correccion\\_de\\_Productos\\_Landsat\\_8\\_LDCM\\_Landsat\\_Data\\_Continuity\\_Mission\\_Version\\_10](https://www.researchgate.net/publication/324656141_Descripcion_y_Correccion_de_Productos_Landsat_8_LDCM_Landsat_Data_Continuity_Mission_Version_10) (Fecha de consulta 9 de diciembre de 2020).

- BOCCO, G., MENDOZA, M.E., VELÁZQUEZ, A. & TORRES, A. (1999). La regionalización geomorfológica como una alternativa de regionalización ecológica en México. El caso de Michoacán de Ocampo. *Investigaciones Geográficas*, 40, p. 7-12. DOI 10.14350/rig.59091
- BOTÍA, M.G., DÍAZ, A.R., MORALES, A.P. & MARTÍN, M.S. (2017). Cambios evolutivos del paisaje mediante análisis de cartografía y ortofotografía histórica. Una metodología para su integración. En M.A. López Arandia & A. Gallia (Ed.). *Itinerarios de Investigación Histórica y Geográfica*. Cáceres: Universidad de Extremadura, 360-371.
- CALDERÓN, C., ABURTO, O. & EZCURRA, E. (2009). El valor de los manglares. *Biodiversitas*, 82, p. 1-6.
- CEBALLOS, G., MARTÍNEZ, L., GARCÍA, A., ESPINOZA, E., BEZAURY-CREEL, J. & DIRZO, R. (2010). *Diversidad, amenazas y áreas prioritarias para la conservación de las Selvas Secas del Pacífico de México*. México D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- CEC (2020). Cierre de las negociaciones en torno a un nuevo Acuerdo de Cooperación Ambiental (ACA). Comunicación para la cooperación ambiental. Disponible en <http://www.cec.org/es/acerca-de-la-cca/consejo> (Fecha de consulta 1 de julio del 2020).
- CECCON, E. (2015a). *Restauración en bosques tropicales : Fundamentos ecológicos, prácticos y sociales*. México D.F.: Ediciones Díaz de Santos.
- CECCON, E., GONZÁLEZ, E.J. & MARTORELL, C. (2015b). Is Direct Seeding a Biologically Viable Strategy for Restoring Forest Ecosystems? Evidences from a Meta-analysis. *Land Degradation and Development*, 27, p. 511-520. DOI: 10.1002/ldr.2421.
- CENTROGEO (2020). Generación de datos para el monitoreo de procesos territoriales con imágenes de satélite del programa Copernicus. Disponible en <https://cutt.ly/6gnjaw2> (Fecha de consulta 15 octubre de 2020).
- CHAKRABORTY, D., SARKAR, D., AGARWAL, S., DUTTA, D. & SHARMA, J.R. (2015). Web based GIS application using open source software for sharing geospatial data. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 4(1), p. 1224-1228. DOI: 10.23953/cloud.ijarsg.109.
- CHUVIECO, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Ediciones RIALP.
- CHUVIECO, E. (2007). Mirar desde el espacio o mirar hacia otro lado: Tendencias en teledetección y su situación en la geografía Española. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 50, p. 75-85.
- COLEGIO DE MÉXICO (2019). Talleres para humanistas y científicos sociales. COLMEX. Disponible en <https://tallerescdyh.colmex.mx/> (Fecha de consulta 4 de febrero de 2020).
- CONABIO (2020). Ecosistemas de México. Disponible en <https://cutt.ly/7y7yAGy> (Fecha de consulta 4 de febrero de 2020).

- CONAFOR (2018). Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2009 - 2014. Disponible en <https://snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/ResultadosHistóricosINFyS/2009-2014/Informe de resultados/Informe inventario 2009 - 2014.pdf> (Fecha de consulta 5 de febrero de 2020).
- DEL CAMPO, A. D., GONZÁLEZ-SANCHIS, M. ILSTEDT, U., BARGUÉS-TOBELLA, A. & FERRAZ, S. (2019). Bosques y sistemas agrosilvopastorales de tierras secas: el agua como eje central. *Unasylva: Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales*, 70(251), p. 29-38.
- FAO (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010*. Disponible en <http://www.fao.org/3/i1757s/i1757s00.htm> (Fecha de consulta 9 de diciembre de 2020).
- FAO (2016). *El estado de los bosques del mundo. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra*. Disponible en <http://www.fao.org/publications/sofo/2016/es/> (Fecha de consulta 9 de diciembre de 2020).
- FAO (2019). *Reglas, clasificaciones y normas. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Disponible en <http://www.fao.org/statistics/standards/es/> (Fecha de consulta 1 de noviembre de 2020).
- FARLEY, K.A., OJEDA-REVAH, L., ATKINSON, E.E. & EATON-GONZÁLEZ, B.R. (2012). Changes in land use, land tenure, and landscape fragmentation in the Tijuana River Watershed following reform of the ejido sector. *Land Use Policy*, 29(1), p. 187-197. DOI 10.1016/j.landusepol.2011.06.006.
- GALLEGOS RODRÍGUEZ, A., ABUNDIO, E., CARVAJAL, S., ARÉCHIGA, J. & ALONSO, J. (2006). Variación en la tipología del cambio de uso del suelo en el área de protección de flora y fauna "La Primavera" para el periodo 1980-2002. *Scientia-CUCBA*, 8, p. 171-179.
- GITS (2016). Diplomado en Sistemas de Información Geográfica con software libre y de código abierto. Disponible en <https://www.gits.igg.unam.mx/portal/> (Fecha de consulta 15 de marzo de 2018).
- HALFFTER, G. (1994). ¿Qué es la biodiversidad? *Butlletí de la Institució Catalana d'Història Natural*, 62, p. 5-14.
- HARO, L.F. (2019). Potencial forestal en México. El Sol de México. Disponible en <https://www.elsoldemexico.com.mx/analisis/potencial-forestal-en-mexico-3896773.html> (Fecha de consulta 5 de febrero de 2020).
- HERNÁNDEZ MELCHOR, G.I., ROSADO RUÍZ, O., SÁNCHEZ SOL, Á. & HERNÁNDEZ VALDEZ, J.I. (2016). Cambios de uso del suelo en manglares de la costa de Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14, p. 2757-2767.
- HERSPERGER, A., BÜRGI, M., CORONA, R., GALICIA, L. & PALACIO-PRIETO, J.L. (2016). Local

- deforestation patterns and their driving forces of tropical dry forest in two municipalities in Southern Oaxaca, Mexico (1985-2006). *Investigaciones Geográficas*, 91, p. 86-104. DOI: 10.14350/rig.50918.
- IBARRA-NÚÑEZ, E., GÁMEZ, A.E. & ORTEGA-RUBIO, A. (2018). Impacto territorial del turismo en Zonas Prioritarias para la Conservación y Ecosistemas Prioritarios de Baja California Sur, México. *Sociedad y Ambiente*, 17, p. 33-58. DOI:10.31840/sya.v0i17.1839.
- INEGI (2007). Censo Ejidal México. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/programas/cae/2007/> (Fecha de consulta 23 de agosto de 2019).
- INEGI (2020). Bases de datos INEGI. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/default.html>. (Fecha de consulta 8 de octubre de 2020).
- JAZOULI, A. EL, BARAKAT, A., KHELLOUK, R., RAIS, J. & BAGHDADI, M. EL. (2019). Remote sensing and GIS techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the Oum Er Rbia River (Morocco). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 13, p. 361-374. DOI: 10.1016/j.rsase.2018.12.004.
- JIMÉNEZ-OROCIO, O., ESPEJEL, I. & MARTÍNEZ, M.L. (2015). La investigación científica sobre dunas costeras de México: origen, evolución y retos. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86(2), p. 486-507. DOI 10.1016/j.rmb.2015.04.022.
- JUJNOVSKY, J., RAMOS, A., CARO-BORRERO, Á., MAZARI-HIRIART, M. MAASS, M., & ALMEIDA-LEÑERO, L. (2017). Water assessment in a peri-urban watershed in Mexico City: A focus on an ecosystem services approach. *Ecosystem Services*, vol. 24, pp. 91-100. DOI:10.1016/j.ecoser.2017.02.005.
- KOLB, M., GERRITSEN, P.R.W., GARDUÑO, G., LAZOS CHAVERO, E., QUIJAS, S., BALVANERA, P., ÁLVAREZ, N. & SOLÍS, J. (2018). Land Use and Cover Change Modeling as an Integration Framework: A Mixed Methods Approach for the Southern Coast of Jalisco (Western Mexico). En E.F. Camacho Olmedo, M. Paegelow, & J.F. Mas (Ed.). *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Cham: Springer, 241-268.
- LEIDIG, M. & TEEUW, R. (2015). Free software: A review, in the context of disaster management. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 42, p. 49-56. DOI 10.1016/j.jag.2015.05.012.
- LUNA-NEMECIO, J., BOLONGARO, A. & TORRES, V. (2020). La crisis hídrica en la región de la Subcuenca del Río Cautla por los efectos del cambio climático. *Revista de Geografía Espacios*, 9(18), p. 70-89. DOI: 10.25074/07197209.18.1229.
- LUNA-NEMECIO, J. (2020). *Para pensar el desarrollo social sostenible: múltiples enfoques, un mismo objetivo*. Mount Dora (USA)/Quito (Ecuador): Kresearch/Religación. DOI: <https://doi.org/10.35766/dss20>.

- MAS, J.-F., VELÁZQUEZ, A. & COUTURIER, S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación Ambiental*, 1(1), p. 23-39.
- MAZA, R. & DE LA MAZA, J. (2005). *Historia de las áreas naturales protegidas de México. Documento de trabajo/Programa Agua, Medio Ambiente y Sociedad*. México D.F.: COLMEX/UNAM.
- MEA (2005). (MEA) *Millenium Ecosystem Assesment.Ecosystem and human well-being: Urban systems*. Washington, D.C.: Island Press.
- MÉNDEZ-TORIBIO, M., MARTÍNEZ-GARZA, C., CECCON, E. & GUARIGUATA, M.R. (2018). *La restauración de ecosistemas terrestres en México Estado actual, necesidades y oportunidades*. Ciudad de México: CIFOR. DOI: 10.17528/cifor/006853.
- MONJARDÍN-ARMENTA, S.A., PACHECO-ANGULO, C.E., PLATA-ROCHA, W., & CORRALES-BARRAZA, G. (2017). La deforestación y sus factores causales en el estado de Sinaloa, México. *Madera y Bosques*, 23(1), p. 7-22. DOI: 10.21829/myb.2017.2311482.
- OBSINTER (2007). *Base de datos geográfica, núcleos agrarios en ArcGIS + 1, archivo de metadatos Excel*. 2007. México D.F.: Colmex-Sedesol-Consulcorp, con base en RAN-INEGI (al 31 de diciembre de 2004) Observatorio de Instituciones Territoriales.
- ORTEGA CASTELLANOS, C.A., VILLAVICENCIO, R., GALLEGOS RODRÍGUEZ, A. & SANTIAGO PÉREZ, A.L. (2005). Análisis de la fragmentación forestal del área de protección de flora y fauna "Sierra de Quila" en el estado de Jalisco, utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). En *Avances en la investigación Científica en el CUCBA. XVI Semana de la Investigación Científica*, 542-546.
- PÉREZ-MIRANDA, R., VALDEZ-LAZALDE, J.R., MORENO-SÁNCHEZ, F., GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, A. & VALDEZ-HERNÁNDEZ, J.I. (2011). Predicción espacial de cambios del uso de suelo en Texcoco, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(5), p. 59-72.
- PÉREZ-SÁNCHEZ, E., PALOMEQUE-DE LA CRUZ, M.Á., ESCALONA-MAURICE, M.J., RUIZ-ACOSTA, S. del C., SÁNCHEZ-MARTÍNEZ, A.J. & GALINDO-ALCÁNTARA, A. (2016). Analysis of land use change in an urban ecosystem in the drainage area of the Grijalva river, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(1), p. 105-120. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2016.03.018.
- PNUMA (2011). *Hacia una economía verde: Guía para el desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza*. Disponible en [http://www.unep.org/greeneconomy/Portals/88/documents/ger/GER\\_synthesis\\_sp.pdf](http://www.unep.org/greeneconomy/Portals/88/documents/ger/GER_synthesis_sp.pdf) (Fecha de consulta 30 de marzo de 2020).
- RODRÍGUEZ GÁMEZ, M., VÁZQUEZ PÉREZ, A. & SALTOS ARAUZ, W.M. (2017). La ordenación territorial y las fuentes renovables de energía. *Memorias Y Boletines de la Universidad del Azuay*, 1(XVI), p. 287-292.

- RODRÍGUEZ, O. & LUNA-NEMECIO, J. (2019). Educación musical para el desarrollo sostenible: una revisión documental. *Revista da Abem. Associação Brasileira de Edição Musical*, 27(43), p. 132-149.
- ROJAS, C., MUNIZAGA, J., ROJAS, O., MARTÍNEZ, C. & PINO, J. (2019). Urban development versus wetland loss in a coastal Latin American city: Lessons for sustainable land use planning. *Land Use Policy*, 80, p. 47-56. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.09.036.
- ROSETE-VERGÉS, F., PÉREZ-DAMIÁN, J.L., VILLALOBOS-DELGADO, M., NAVARRO-SALAS, E.N., SALINAS-CHÁVEZ, E. & REMOND-NOA, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Maderas y Bosques*, 20(1), p. 21-35. DOI:10.21829/myb.2014.201173.
- SANCHEZ, R., LOPEZ, V. & ECKSTEIN, G. (2016). Identifying and characterizing transboundary aquifers along the Mexico-US border: An initial assessment. *Journal of Hydrology*, 535, p. 101-119. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.01.070.
- SEMARNAT (2013). Manejo de ecosistemas de dunas costeras, criterios ecológicos y estrategias. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en <https://www.ileanaespejel.com/uploads/1/1/3/3/11330338/cd001496.pdf> (Fecha de consulta 9 de diciembre de 2020).
- T-MEC (2019). T-MEC. Gobierno de México. Disponible en <https://www.gob.mx/t-mec/acciones-y-programas/textos-finales-del-tratado-entre-mexico-estados-unidos-y-canada-t-mec-202730?state=published> (Fecha de consulta 23 de marzo de 2019).
- TADEO-NOBLE, A.E., VALDEZ-HERNÁNDEZ, J.I., BELTRÁN-RODRÍGUEZ, L. & GARCÍA-MOYA, E. (2019). Efecto del aprovechamiento forestal sobre la estructura y diversidad arbórea en selvas tropicales de Quintana Roo, México. *Bosque (Valdivia)*, 40(2), p. 129-140. DOI 10.4067/S0717-92002019000200129.
- UNCED (1992). Earth Summit'92. The UN Conference on Environment and Development - Agenda 21. *Reproduction*. DOI 10.1007/s11671-008-9208-3.
- UNESCO (2018). Reservas de Biosfera en América Latina y el Caribe. Disponible en <https://cutt.ly/CgnlswO> (Fecha de consulta 23 de junio de 2020).
- USGS (2020). Glovis. Disponible en: <https://glovis.usgs.gov/> (Fecha de consulta 15 de febrero de 2020).
- VALDERRAMA-LANDEROS, L.H., RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, M.T., TROCHE-SOUZA, C., VELÁZQUEZ-SALAZAR, S., VILLEDA-CHÁVEZ, E., ALCÁNTARA-MAYA, J.A. & RESSL, R. (2017). *Manglares de México: actualización y exploración de los datos del sistema de monitoreo 1970/1980–2015*. Ciudad de México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- VITOUSEK, P.M., MOONEY, H.A., LUBCHENCO, J. & MELILLO, J.M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277(5325), p. 494-499. DOI: 10.1126/science.277.5325.494

WATERS, N. (2017). GIS: History. In D. Richardson, N. Castree, M.F. Goodchild, A. Kobayashi, W. Liu & R.A. Marston (Eds). *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*. DOI:10.1002/9781118786352.wbieg0841.

Recibido: 3 de julio de 2020

Aceptado: 28 de octubre de 2020