

## **Evaluación ambiental integrada de áreas inscritas en el programa federal de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos. Caso de estudio: Ajusco, México**

Recibido: 27 de junio de 2016. Aceptado en versión final: 2 de diciembre de 2016.  
Publicado en línea (versión e-print): 22 de marzo de 2017.

Zenia María Saavedra Díaz\*  
María Perevochtchikova\*\*

**Resumen.** A partir del reconocimiento de la deforestación como un problema mundial se han creado mecanismos de compensación por servicios ecosistémicos (SE) que han recibido un creciente interés de parte de la academia y de los gobiernos durante los últimos años. Sin embargo, se detecta una falta de estudios de sus potenciales efectos, sobre todo desde el enfoque ambiental integrativo y espacial. Por lo tanto en este trabajo se presenta el estudio de caso de la comunidad de San Miguel y Santo Tomás Ajusco, ubicada en la periferia de la Ciudad de México, la cual ha participado en el programa federal de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) desde el año 2004. El enfoque teórico conceptual del trabajo incorpora las nociones de los SE y pasa revista al estado de la cuestión en término de las publicaciones, en particular sobre el tema de la evaluación integrada de los efectos ambientales de los mecanismos de compensación por los SE. La metodología utilizada se basó en la construcción de perfiles longitudinales (a los que se les incorporan capas temáticas de información geográfica), a partir de los cuales se analizó la correspondencia entre el potencial de ofrecimiento de los SE y las zonas inscritas en el programa; también se observó la relación de la deforestación detectada en la zona.

Se desplegó la cartografía de SA con los polígonos de PSAH y se encontró correspondencia entre los sitios inscritos en PSAH y las zonas con mayor potencial de SA (salvo para una superficie de 236.7 hectáreas). Sin embargo, en muchos casos, los valores más altos de SA no corresponden con los recursos hidrológicos, pues están más asociados a otros, lo que ayuda a concluir que el programa PSAH debe considerar otras variables y no restringirse a SA asociados a la hidrología.

Finalmente, se revisaron dos estudios de cuantificación de la cubierta forestal con respecto a los sitios inscritos en el Programa de PSAH y los resultados muestran que se ha mantenido la deforestación y que las áreas deforestadas dentro de las zonas inscritas en el programa son mayores que las que no lo han estado. Aunque se identificaron factores que pudieron contribuir a este proceso, se concluye que un programa como el PSAH, implementado de manera aislada, no tiene la incidencia esperada en la deforestación.

**Palabras clave:** pago por servicios ambientales, evaluación ambiental integrada, perfiles longitudinales, deforestación, Ajusco, México.

\* Bióloga, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal, Medellín 202 Colonia Roma Norte, Delegación Cuauhtémoc, CP 06700, Distrito Federal, tel. 52650780 ext. 12200, correo-e: zsaavedra@paot.org.mx

\*\* Doctora en Geografía, Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales, El Colegio de México A.C., Camino al Ajusco, 20, Pedregal de Santa Teresa, Tlalpan, 10740, Distrito Federal, tel. 54493999, ext. 4065, correo-e: mperevochtchikova@colmex.mx

# Integrated environmental assessment of the areas registered in the federal program of Payment for Hydrological Environmental Services. Case Study: Ajusco, Mexico

**Abstract.** Since the specific problem of deforestation on an international level, they have created compensation mechanisms for ecosystem services, which have recently been increasing interest in the academic and government sectors, however, a lack of information on their potential effects is detected, especially from the aspects of integrative approach and spatial. Therefore, this work presents the case study of the community of San Miguel and Santo Tomas Ajusco, located on the suburbs of México City, because the community has participated in the federal program payments for hydrological environmental services (PHES) since 2004. Based on the construction of longitudinal profiles (which are incorporated thematic geographic information layers) we analyzed if there is correspondence between the potential of ecosystem services and enrolled in the program areas. In addition, the effectiveness of the program regarding deforestation detected in the area was observed. For the profiling, it is noticed the exercise of combining the different layers selected for analysis, forming a two-dimensional model that allows us to appreciate the altitudinal gradient of the area with its biophysical components (vegetation and land use, soil science, geology and landforms highlights) with information environmental Services (ES). This facilitates the analysis of all these variables and has the advantage that it can be adapted to the number of variables we have, since they must only be incorporated to the profile (with pretreatment data).

The profiles helped to identify whether registered in the PHES program areas correspond to the most important areas for the provision of environmental services; however, a complementary work was developed consisting of a map which would bring together the most important areas for the contribution of ES; This was generated by applying the statistical model of Jenks' Natural Breaks " (which allows to discriminate classes by the similarity of values that compose them), in the layers of ES that it

had (potential infiltration, carbon stock in forests, surface runoff and provision of habitat), establishing quantitative 5 for each category. The criterion model allow standardize classes; therefore, quantitative categories were matched to (very low, low, medium, high and very high) qualitative categories. Then the "high" and "very high" categories were selected and merged into a map with software tools Arc. MAP 10.1. denominating as "high priority areas for ecosystem services".

ES mapping was deployed with PHES polygons and correspondence between sites on PHES and areas with greatest potential for ES (except for an area of 236.7 hectares) was found. However, in many cases, the highest values of ES not correspond to water resources, as they are more associated with vegetation and biodiversity (carbon stock in forests and provision of habitat), which helps to conclude that the PHES program should consider other variables and not be restricted to the ES associated with hydrology. Two studies on quantifying forest cover were reviewed in the area (one covers from 1986 to 2010, with a projection to 2030 and the other from 2006 to 2014). The information regarding sites on PHES Program and the result shows that deforestation has remained revised (although the rate decreased in the period 2006-2014) and deforested areas within enrolled in the program areas PHES are greater than those who have not been. Although factors that could contribute to the process are identified, it is concluded that a program like PHES implemented in an isolated manner, has no bearing on the problem of deforestation. Finally, the importance of obtaining the map "high priority areas for ecosystem services", the most environmentally important areas are identified and this helps manage PHES expanding areas and get other resources or protection status in areas with natural ecosystems.

**Key Words:** payment for environmental services, longitudinal profiles, deforestation, Ajusco, GIS, Mexico.

## INTRODUCCIÓN

Los bosques, por su propia multifuncionalidad ecológica, son reconocidos como productores de diversos servicios ecosistémicos (SE) (MEA, 2005), como la provisión de alimentos, materia y agua, y la contribución a la preservación de los ciclos hídrico, eólico y de carbono, entre muchos más (Pagiola *et al.*, 2003; Fisher *t.*, 2009). En relación con el agua, los bosques aportan a los procesos de la infiltración de agua subterránea, la conserva-

ción de su calidad, el control de inundaciones y sedimentación cuenca abajo, entre otros aspectos (Postel y Carpenter, 1997; Chang, 2006), lo que tiene repercusiones directas en el bienestar humano y se refleja en las cuestiones económicas, sociales, culturales y políticas (Brüschweiler *et al.*, 2004).

A pesar de su importancia, los bosques sufren una severa deforestación y degradación a nivel

mundial (FAO, 2012) y México no es la excepción (CONABIO, 2010), lo que lleva a la disminución y pérdida de servicios ecosistémicos (Sanders *et al.*, 2013). Dada esta situación se han creado diferentes instrumentos de política pública que promueven la conservación forestal, como los mecanismos basados en principios de mercado y compensaciones económicas a los proveedores de servicios ecosistémicos (Wunder, 2005). A través del Banco Mundial se han impulsado estos esquemas en muchos países, y en especial en América Latina (Fisher *et al.*, 2009; Balvanera *et al.*, 2012; Perevochtchikova y Oggioni, 2014).

En México el programa de Pago por Servicios Ambientales *del bosque* (PSA) comenzó en 2003 bajo la modalidad de Hidrológicos (PSAH), y sigue activo (Cortina y Saldaña, 2014) bajo la tutela de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), la agencia responsable de los programas forestales federales. A poco más de una década de su puesta en marcha, el programa ha ampliado sus modalidades y ha cambiado su formulación, sus objetivos, así como las reglas de operación y los criterios de elegibilidad de las zonas susceptibles para el pago ([www.conafor.gob.mx](http://www.conafor.gob.mx)). Y ha logrado establecerse en la agenda pública nacional, al aumentar la superficie incorporada, el número de participantes (en su mayoría comunidades y ejidos) y el monto de los apoyos económicos otorgados (CONAFOR, 2015). Incluso, para avanzar en el pago de otros servicios ambientales (SA) en ecosistemas forestales del país, se formalizó en 2004 la modalidad de captura de carbono y aprovechamiento de biodiversidad (Ochoa, 2009). En el primero se trata de financiar la construcción de capacidades en las propias comunidades forestales para que entren a los mercados de venta de carbono capturado; y en el caso de la biodiversidad, las actividades que se promueven son el turismo de naturaleza y cinegético, y también apoyos para su estudio y asesoría (INE, 2007).

A pesar de que estos programas cuentan con diversas evaluaciones (Cortina y Saldaña, 2014), estas no se han realizado de forma sistemática y tampoco se ha llevado a cabo un monitoreo de sus efectos socio-económicos y ambientales (Perevochtchikova, 2014). Esto se explica en parte

por lo costoso y complejo que resulta realizar estudios para cuantificar los SA de un territorio (lo que demanda estudios y trabajo con equipos interdisciplinarios). Otra razón es que los requisitos definidos en las reglas de operación del programa establecen que un sitio que recibe el PSAH debe cumplir con los siguientes aspectos: 1) estar en zonas de recarga de acuíferos (priorizando acuíferos sobreexplotados); 2) ubicarse en zonas de mayor escasez de agua y abastecimiento de zonas urbanas; 3) tener una cubierta forestal de 50% por ha (priorizando bosques de pino, encino, oyamel, mesófilo de montaña, selva baja, selva mediana y pino-encino); 4) estar en zonas con alto riesgo de deforestación y 5) poseer un alto grado de marginación (Muñoz *et al.*, 2006 y CONAFOR, 2012).

Si bien existen trabajos que estudian el programa de PSAH desde las perspectivas social y de manejo comunitario del bosque (Barton Bray *et al.*, 2012; Balderas *et al.*, 2013), económica (Engel *et al.*, 2008; Honey-Roses *et al.*, 2009), o desde el análisis de cambio de uso del suelo y vegetación (Ellis y Porter-Bolland, 2008; Velasco *et al.*, 2014), con base en el uso de Sistemas de Información Geográfica (Chen *et al.*, 2009; Kareiva *et al.*, 2012), hacen falta investigaciones desde el ángulo ambiental integral, que revisen el sentido de la aplicación de los esquemas de pago por servicios ambientales y su relación con la deforestación y la provisión de diversos servicios (Perevochtchikova y Oggioni, 2014; Sims *et al.*, 2014).

En este sentido, este trabajo analiza un caso mexicano y se intenta responder a las siguientes interrogantes: ¿el programa de PSAH se ubica en territorios que poseen alto potencial hídrico y cuáles otros servicios ambientales existen?; ¿cuál es la relación entre la deforestación y el programa del PSAH?; ¿el programa contribuye o no a la disminución de la deforestación? y, ¿cuáles serían los retos del programa de PSAH, para poder considerar las otras potencialidades ambientales y combatir el índice de deforestación? Todo esto bajo la hipótesis de que el diseño actual del PSAH no considera la coexistencia de diferentes servicios ecosistémicos en un territorio dado y solo brinda el apoyo para la modalidad de hidrológicos. Esto no da lugar a un efecto de conservación ambiental integrado, lo que,

por su parte, se refleja en la imposibilidad de contrarrestar de forma más efectiva a la deforestación.

## EVALUACIONES AMBIENTALES DE PSAH: EL ESTADO DE LA CUESTIÓN

Los servicios ecosistémicos, definidos en los años noventa desde el campo de economía, como las condiciones y procesos de los ecosistemas naturales que proveen a la gente y a la sociedad en general (Daily, 1997), aún generan discusiones académicas sobre su alcance (Perevochtchikova, 2014) y clasificación (De Groot *et al.*, 2002; Fisher *et al.*, 2009). Por su complejidad ecosistémica, tienen interrelaciones con aspectos ambientales, sociales, económicos y culturales de la vida humana, lo que ha llevado a agruparlos en cuatro grupos: i) provisión (alimento); ii) regulación (ciclos); iii) cultural (recreación), y iv) de soporte (de los demás servicios) (MEA, 2005). Y también se subdividen, por su relación con el medio, en: i) hidrológicos; ii) de captura de carbono; iii) biodiversidad, y iv) paisaje (Sanders *et al.*, 2013).

El amplio reconocimiento internacional de los SE a nivel político permitió incorporarlos al diseño de esquemas de compensación económica, basados en principios de mercado, donde se supone que existe al menos un usuario que aporta económicamente al proveedor/es de los SE por su conservación y aseguramiento a largo plazo (Pagiola *et al.*, 2003; Wunder, 2005). Cabe resaltar que el proceso de la implementación de estos mecanismos a nivel internacional ha crecido en forma exponencial, especialmente en países en desarrollo, mediante facilidades de crédito que otorga el Banco Mundial. Este fenómeno también ha impulsado un creciente interés académico por su estudio tanto desde el punto de vista social como económico y ambiental (Fisher *et al.*, 2009; Balvanera *et al.*, 2012; Perevochtchikova y Oggioni, 2014).

En el caso específico del esquema de PSAH, la idea se concentra en el otorgamiento de la compensación económica a los dueños de los terrenos ubicados en las partes altas de las cuencas hidrográficas por la preservación de áreas forestales, con el fin de garantizar los servicios hidrológicos a la

población cuenca abajo, como el consumo del agua, la regulación del ciclo hídrico, la captación e infiltración del agua, y la reducción de sedimentos, entre otros (Postel y Carpenter, 1997; Brüscheweiler *et al.*, 2004; Fisher *et al.*, 2009).

El estudio de este tipo de esquemas ha sido visto desde los distintos campos de conocimiento: i) desde las ciencias sociales, utilizando, entre otras, las teorías de la acción colectiva, de los recursos de uso común y del capital social (Merino, 2005; Barton Bray *et al.*, 2012; Balderas *et al.*, 2013); ii) la economía, con la teoría de juegos, el capital fijo, y con métodos de costo-beneficio y disposición a pagar y recibir (De Groot *et al.*, 2002; Engel *et al.*, 2008; Honey-Roses *et al.*, 2009); iii) ciencias ambientales, desde la perspectiva del capital natural, la teoría de flujos de materia, energía y de agua subterránea (Peñuela, 2009; Vigerstol and Juliann, 2011) y iv) desde diversos enfoques interdisciplinarios (Brüscheweiler *et al.*, 2004; Sims *et al.*, 2014).

Se puede observar que, en la parte ambiental, el estudio de los efectos de PSAH (en la relación “bosque-agua”) ha sido promovido desde los campos de la hidrogeología, con base en la teoría de flujos de agua subterránea, que integra variables subterráneas y superficiales del agua, geología y geomorfología del sitio y vegetación (Morales-Luis *et al.*, 2000; INE, 2005; Manson, 2007; Peñuela 2009; Perevochtchikova y Vázquez, 2012; Peñuela y Carrillo, 2013), y también desde la hidrología superficial, utilizando el balance hídrico como principal herramienta (Jujnovsky *et al.*, 2010, 2012; Caro-Borrero *et al.*, 2015). Además, es importante comentar que el avance tecnológico ha estado presente en el tema como lo atestigua el uso cada vez mayor de los sistemas de información geográfica (SIG) (Troy y Wilson, 2006; Chen *et al.*, 2009; Saavedra *et al.*, 2011; Honey-Roses *et al.*, 2011; Kareiva *et al.*, 2012) y con el desarrollo de la modelación hidrológica aplicada (Vigerstol y Juliann, 2011; Martínez y Balvanera, 2012).

En este sentido, destacan los trabajos que usan como herramienta la técnica de análisis los perfiles topográficos longitudinales para demostrar las interacciones que existen entre los diferentes componentes ambientales ubicados sobre una sección transversal del terreno en una representación bidi-

mensional (García *et al.*, 2004). A partir de ellos se determinan los procesos internos y los cambios en la superficie desde una perspectiva temporal y espacial (Pidwirny y Jone, 2010). De esta forma, los perfiles hidrogeológicos ayudan a entender el complejo proceso de movimiento del agua a través del medio geológico, que tiene repercusiones en las características del suelo, la biodiversidad y la sociedad misma (Freeze y Cherry, 1979; Domenico y Schwartz, 1998; Toth, 2000; Honey-Roses *et al.*, 2011). El uso de estos perfiles ha crecido durante las últimas décadas a escala internacional (Spalvins *et al.*, 2014) y también en México (Manson, 2007; Aceves-Quesada *et al.*, 2007; Carrera-Hernández y Gaskin, 2008; Perevochtchikova y Vázquez, 2012; Peñuela y Carrillo, 2013).

Por otro lado, es importante comentar que la perspectiva espacial del análisis ambiental se ha incorporado en muchas publicaciones, aunque no necesariamente en relación con el programa de PSAH. Sin embargo, tal enfoque se puede encontrar en el trabajo de Van Zijl y Le Roux (2014), donde se determinan las interrelaciones entre las plantaciones y el suelo en la reflexión sobre los SE que proporciona un sitio; en Mahmoud y Alazba (2015), quienes calculan la respuesta hidrológica al cambio de uso del suelo por actividades antropogénicas utilizando SIG, y en Chen *et al.* (2009) que aplican SIG para el mapeo de valor de uso directo de SE a escala nacional para fines administrativos. Por su parte, en México Velasco *et al.* (2014) presentan el panorama de cambio en la cobertura arbolada en varias comunidades indígenas en el estado de Oaxaca (con y sin manejo forestal), mediante un perfil longitudinal y el estudio espacial de deforestación y revegetación a escala regional. También para Oaxaca, Gómez *et al.* (2006) realizan una proyección de cambio de uso del suelo, basado en el uso de SIG; y Ellis y Porter-Bolland (2008) analizan la efectividad del manejo comunitario forestal en áreas protegidas de la parte central de la península de Yucatán, mediante el análisis de cambio de uso del suelo y vegetación. Finalmente, Saavedra *et al.* (2011) utilizan el SIG para identificar las zonas más importantes con respecto a los servicios ambientales así como las más amenazadas.

De esta revisión se confirma la utilidad del uso de las herramientas espaciales para el estudio de los SE, y la falta evidente de estudios ambientales integrales que reflexionen acerca de la ubicación de las zonas receptoras de PSAH y las potencialidades ambientales del terreno, en términos de ofrecimiento de diversos SE y la incidencia (o no) de los programas sobre la deforestación. Por lo anterior, a continuación se explora esta problemática forestal para el caso de una comunidad mexicana que ha participado en el programa federal de PSAH durante casi una década (2004-2012).

## MÉTODO

### Zona de estudio

La comunidad de San Miguel y Santo Tomás Ajusco se ubica al suroeste del Distrito Federal (DF), ahora la Ciudad de México<sup>1</sup> (Figura 1). Geográficamente, corresponde con el parteaguas de la Cuenca de México (una formación hidrográfica cerrada), que cuenta con un clima semi-frío, sub-húmedo, y verano fresco. Estas condiciones climatológicas y orográficas favorecen la existencia de una gran diversidad de flora y fauna que proporcionan múltiples SE a escala regional, como la preservación de la biodiversidad, el mantenimiento del ciclo hídrico, resaltando la captación de agua para la recarga de flujos de agua subterránea, la captura y almacén de carbono, las actividades recreativas en un entorno natural, entre otras (PAOT-SMA, 2012). Por otro lado, es importante comentar que la Ciudad de México es una entidad dinámica, en constante crecimiento y expansión, que presenta serios problemas ambientales de contaminación, pérdida de ecosistemas y erosión de suelo, etc. (Aguilar y Santos, 2011).

La comunidad cuenta con 7 619.2 ha reconocidas por la Reforma Agraria Nacional, con un 45% del territorio conformado por bosque (de pino, encino, oyamel). Cabe mencionar que al calcular la superficie de dicho polígono en el SIG la superficie

<sup>1</sup> Se localiza en las coordenadas extremas Norte: X=475932.38, Y=2128443.33 y Sur: X=470626.56, Y=2115458.02 (Proyección UTM, Datum WGS84).



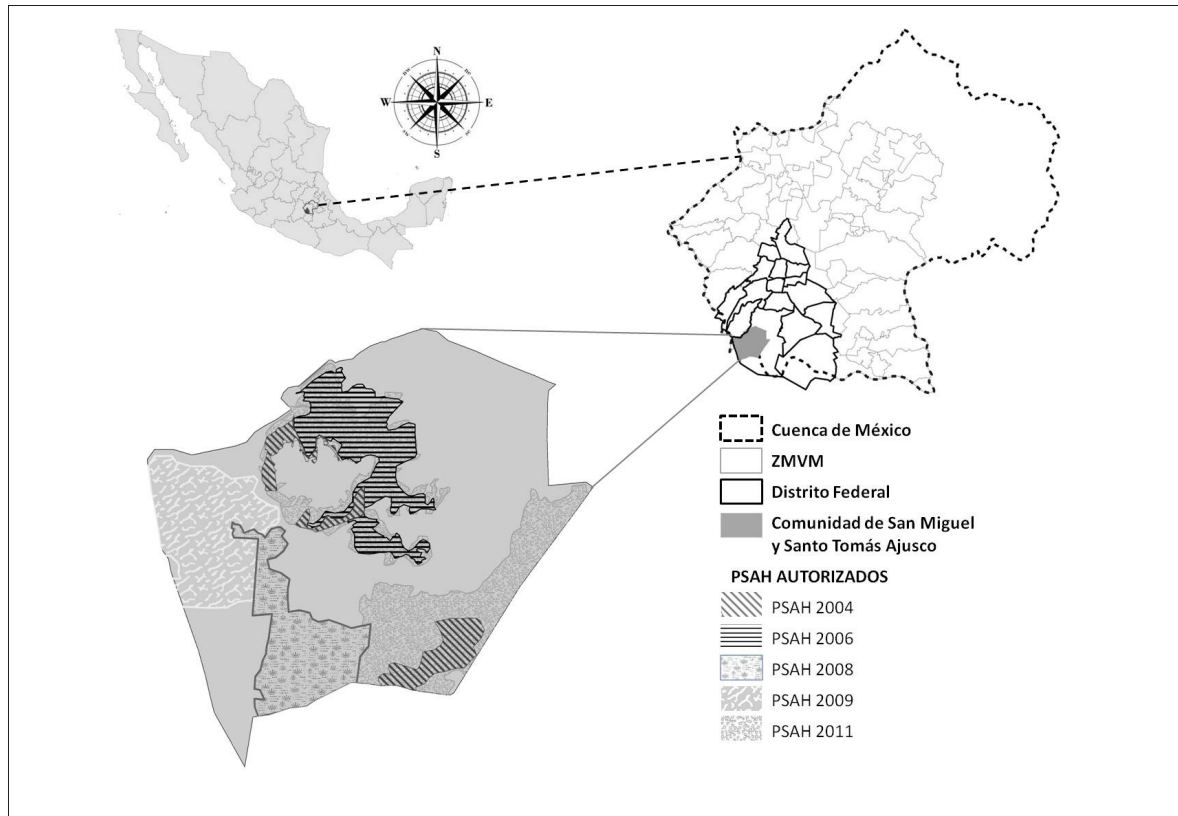


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio y de las áreas con polígonos de PSAH autorizados. Location study area and PHES (Fuente: elaboración propia, con base en PAOT-SMA, 2012; CONAFOR, 2015). (Source: PAOT-SMA, 2012, CONAFOR, 2015).

obtenida es de 10 018.34 hectáreas. La zona se ubica a una altitud de 2 850-3 940 msnm, con temperatura promedio anual de 5-12 °C y precipitación promedio anual de 1 086 mm (Perevochtchikova *et al.*, 2015). La Asamblea General (el órgano de máxima autoridad comunitaria) tiene registrados 604 comuneros, con una población total de 29 781 habitantes. La comunidad se incorporó en 2004 al programa federal de PSA en modalidad de servicios hidrológicos, acumulando un total de cerca de 5 000 ha, con un monto económico equivalente a \$360 pesos por ha al año y contratos firmados por 5 años (Sandoval y Gutiérrez, 2012). Adicionalmente, en el año 2012 la comunidad inscribió 220 hectáreas en el mecanismo de Fondos Concurrentes, cofinanciado por la CONAFOR e Ingenieros Civiles Asociados (ICA), con el monto más alto del país (equivalente a \$1 600 pesos por ha al año), del cual ha recibido

dos pagos, con su posterior discontinuidad por la supuesta bancarrota del ICA.

### Fuentes de información

A partir de la revisión bibliográfica, y en particular de los trabajos de INE (2005), Peñuela (2009), Perevochtchikova y Vázquez (2012) y Peñuela and Carrillo (2013), realizados para México y para la zona central del país, se decidió aplicar la técnica basada en la construcción de perfiles longitudinales para el estudio de caso. Primero se revisaron las fuentes de información que se refieren a la cartografía disponible y se hizo una selección de acuerdo con la calidad de los datos, la temática y la fecha de elaboración (Cuadro 1).

Las capas temáticas fueron obtenidas en su mayoría del Sistema de Información Geográfica

Cuadro 1. Capas seleccionadas (Fuente: elaboración propia). Information layers

FUENTE	COBERTURA	FECHA-PERÍODO	OBSERVACIONES
Reforma Agraria Nacional (RAN)	Comunidad San Miguel y Santo Tomás Ajusco		Límites aproximados del núcleo agrario, toda vez que hay una zona en litigio con otra comunidad.
Instituto Nacional de Geografía (INEGI)	Modelo de elevación digital del terreno (MED)	2010	Generado a nivel nacional a partir de un vuelo LIDAR con una resolución de 10 m por pixel
Atlas Geográfico del Suelo de Conservación del Distrito Federal; Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal y Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA-PAOT)	Geomorfología	2008-2010	Actualizaciones de la cartografía de INEGI, aumentando la escala con trabajo de campo.
	Edafología		
	Geología		
	*Uso de suelo y vegetación		
	*Escurrimiento superficial	2008-2010	Modelación realizada por parte de la SMA a partir de datos bibliográficos y registros en campo derivados de la actualización del PGOEDF.
	**Almacenamiento de Carbono	2010	Estudios a partir de muestreos en campo y procesamientos de información con apoyo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y el Centro de Investigaciones en Geografía y Geomática A. C. Ing. Jorge L. Tamayo (CentroGEO). La aptitud de infiltración se midió con infiltrómetros en campo. El almacén de carbono se cuantificó para la masa foliar de los árboles. El índice de cubierta forestal es la estimación de las masas forestales arbóreas densas para un periodo comprendido entre 1986 y 2010. El mapa de Provisión de Hábitat muestra las zonas donde la masa forestal se mantuvo constante en ese periodo. Se obtuvo la tendencia de cambio a veinte años, estimando la tasa de pérdida de cobertura forestal y proyectando este comportamiento considerando condiciones normales.
	** Aptitud de Infiltración	2010	
	** Índice de Cubierta Forestal (arbórea)	1986 a 2010	
	**Provisión de hábitat	1986 a 2010	
	**Estimación del cambio de cubierta forestal	2010 al 2030	
	*Áreas prioritarias para la conservación de los ecosistemas y la biodiversidad	2009	Generado a partir de los mapas de: Vegetación (reclasificando con valores mayores a los ecosistemas no perturbados), Biodiversidad y fragilidad ecológica (obtenido con la fragilidad de la vegetación, erosión total y vulnerabilidad del acuífero, considerando las zonas de mayor altitud, cobertura forestal y precipitación)
	Zonas prioritarias por altos servicios ecosistémicos	2016	Elaboración propia a partir de seleccionar los valores más altos de las capas de información de almacén de carbono, aptitud de infiltración, escurrimiento superficial y provisión de hábitat.

	**Índice de cubierta forestal	2006 a 2014	A partir del procesamiento y análisis de imágenes satelitales (Spot), se obtuvo un mapa por cada año analizado, de la presencia de cubierta forestal.
Comisión Nacional Forestal	Proyectos autorizados de PSAH	2004-2011	En la zona de interés hay superficies autorizadas para los años 2004, 2006, 2008, 2009 y 2011.
PAOT y Google Earth	Imágenes satelitales	Mosaico de imágenes Quick Bird (2007-2008) georreferenciadas y ortorectificadas. Imágenes de diferentes satélites y años consultadas a partir del visualizador Google Earth como apoyo visual.	
*Estudios elaborados por la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA), como parte de los trabajos de actualización del Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal.			
**Estudios generados por la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México Distrito Federal (PAOT) a partir de contratos con especialistas del INIFAP y CentroGEO.			

de la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México (SIG-PAOT), así como del *Atlas Geográfico del Suelo de Conservación del Distrito Federal* (PAOT-SMA, 2012), dado que cuentan con metadatos estandarizadas.

### Etapas de estudio

Para definir las etapas de estudio se consideraron los trabajos internacionales de García *et al.* (2004), Freeze y Cherry (1979), Domenico y Schwartz (1998), Toth (2000), Spalvins *et al.* (2014), así como, para el caso de México, de Manson (2007), Carrera-Hernández y Gaskin (2008), Perevochtchikova y Vázquez (2012), Peñuela y Carrillo (2013). A partir ellos se definieron tres pasos metodológicos: 1) construcción de perfiles; 2) agregación de coberturas (capas de información cartográfica) y análisis integrado, y 3) proyección de deforestación.

*Construcción de perfiles.* En esta fase se trazaron dos perfiles longitudinales con diferentes orientaciones, considerando como punto de intersección el punto de mayor altitud de la zona; los perfiles se generaron de poniente a oriente (perfil A-A') y de norte a sur (perfil B-B') (Figura 2), porque, de esta manera, se observó (al hacer varias pruebas de despliegue de capas en el SIG) que representaban la mayoría de las topoformas y usos de suelo presentes en la zona de estudio. Para obtener gráficamente los perfiles se utilizaron el modelo de elevación digital y el módulo 3D Analyst (herramientas Interpolate line y Profile Graph) del software Arc Map 10.1.

*Agregación de coberturas (capas de información cartográfica) y análisis integrado.* En esta etapa se procedió a generar una imagen que permitiera visualizar los perfiles longitudinales junto con la información de capas temáticas preseleccionadas de la Tabla 1. Se consideraron específicamente las siguientes variables: los sitios autorizados de PSAH; uso del suelo y vegetación; geomorfología; edafología y geología; servicios ambientales de almacén de carbono; potencial de infiltración; escurrimiento superficial y provisión de hábitat (que considera la vegetación forestal constante en superficie y densidad durante un periodo de 20 años, lo que implica la posibilidad de mayor biodiversidad nativa). Para el despliegue de las coberturas se creó un proyecto en el software Arc Map 10.1, estandarizando las capas en Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM), con datum WGS84. En todos los casos las capas se recortaron al tamaño del polígono de la Comunidad de San Miguel y Santo Tomás Ajusco, recalculando las superficies; en donde fue necesario se hizo la conversión de *raster* a *shapefile*, previo al análisis.

Posteriormente, para enriquecer el análisis, se decidió elaborar el mapa de zonas prioritarias por altos servicios ecosistémicos, considerando las variables de: i) almacén de carbono; ii) aptitud de infiltración; iii) escurrimiento superficial, y iv) provisión de hábitat. El proceso se realizó usando las herramientas de análisis espacial. Se hizo la clasificación de cada capa de información, a partir de la aplicación del método de rotura natural de



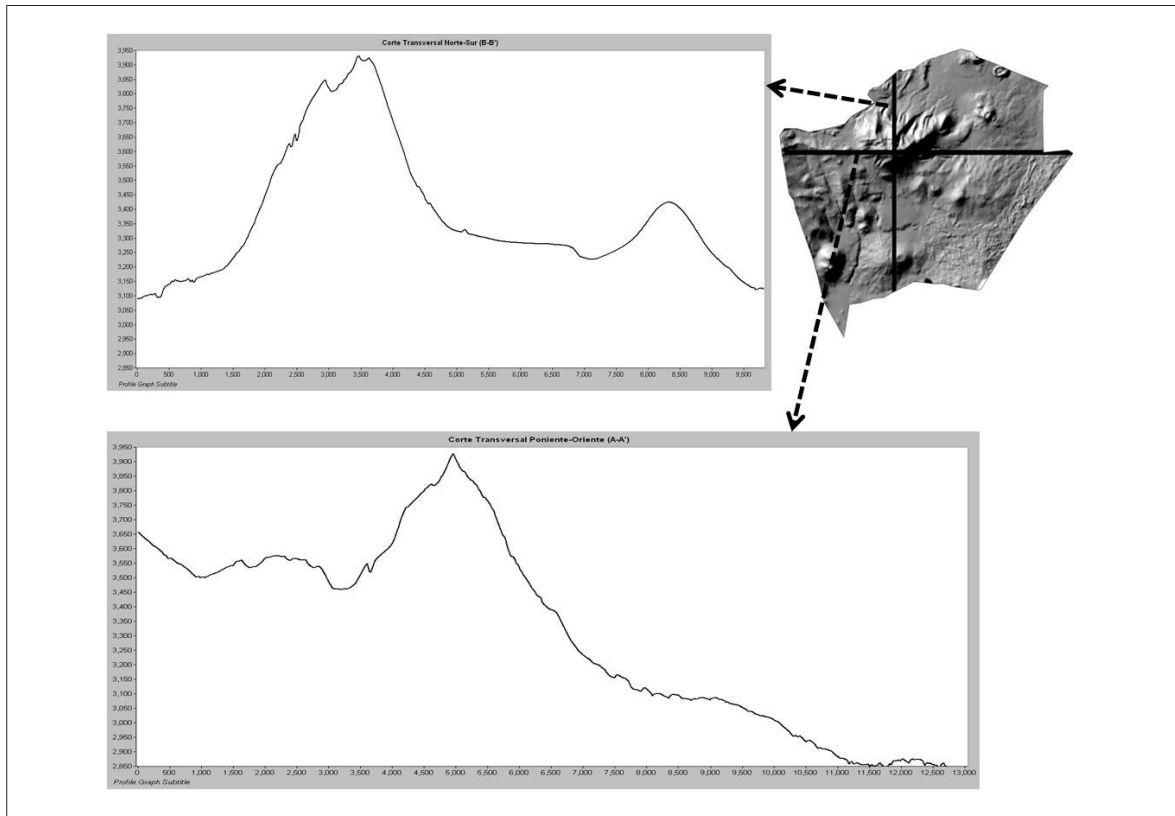


Figura 2. Perfiles longitudinales trazados sobre la zona de estudio. Longitudinal profiles in the study area.

(Fuente: elaboración propia).

Jenks (conocido como modelo estadístico "Natural Breaks"), el cual permite discriminar una clase de otra en función de la semejanza de los valores que las componen. El producto obtenido garantiza que se puedan homologar las diferentes capas, mediante categorías cualitativas (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto), y así identificar las zonas que cuentan con mayores servicios ambientales para priorizar su atención.

Al usar la herramienta "unión" se obtuvo una sola capa que incluyó las categorías "muy altos" de las cuatro temáticas mencionadas. A partir del análisis por filtros y "query", se identificó que la zona de estudio no presenta ningún sitio que cuente con los valores de categoría "muy alto" de las cuatro variables acumuladas, por lo que se procedió con la generación de un nuevo archivo uniendo las categorías de "alto" y "muy alto" de las cuatro capas.

Cabe mencionar que en este análisis no se revisó que las zonas cumplieran con los criterios que se mencionó que establecen las reglas de operación del programa, ya que no se cuenta con dichas bases de información y se supone que CONAFOR los autorizó porque cumplieran con ellos.

*Proyección de deforestación.* En la última etapa se realizó un análisis de la deforestación histórica, para comparar las zonas inscritas al PSAH con respecto a la pérdida de la cubierta boscosa. Este análisis se llevó a cabo de manera cuantitativa desplegando individualmente las capas de cubierta forestal para los periodos de 1986-2010 y 2006-2014. Posteriormente, se identificaron y trazaron polígonos que corresponden a las zonas donde se había presentado la mayor pérdida forestal, lo cual se corroboró con análisis visual con apoyo

de imágenes satelitales Quick Bird del 2007-2008 (obtenidas por la PAOT). Los polígonos de las zonas deforestadas se convirtieron en formato .kml y se visualizaron en la plataforma Google Earth con imágenes de otros años.

## RESULTADOS

Con los perfiles longitudinales trazados sobre el territorio de la comunidad (Figura 2), se procedió a incorporar la información de las capas temáticas, para lograr un análisis ambiental integrado del territorio, con variables tanto físicas como de servicios ambientales presentes en esos cortes longitudinales. Asimismo, se incorporaron los polígonos de PSAH observando que la mayoría de ellos pasaban por esta sección de análisis. Esto permitió validar el ejercicio, ya que se logró incorporar en dos vistas (perfiles longitudinales A-A' y B-B') la mayor parte de la información para su observación en un modelo bidimensional. Por otro lado, la proyección de la deforestación se analizó sobre todo el territorio de la comunidad, a partir del despliegue de capas.

### Agregación de coberturas en perfiles y análisis integrado

Como se ha comentado en la metodología, se construyeron dos perfiles longitudinales (perfil A-A' y perfil B-B'), con base en el modelo de elevación digital. Estos se editaron para mostrar dentro del corte transversal del terreno las capas de información geográfica (descritas en el Cuadro 1) y en la parte superior del perfil los usos de suelo y la vegetación (Figuras 3 y 4).

El ejercicio incluye la incorporación de la mayor elevación del terreno, la cual corresponde al volcán Pico del Águila (3 889 msnm), que además es el punto más alto de la Ciudad de México. Por su parte, la composición geomorfológica se relaciona con laderas modeladas por disección profunda y derrames de lava, llamados "Formación Ajusco".

En términos edafológicos se presentan suelos "nuevos" y delgados (andosoles y litosoles), y en términos geológicos se cuenta con rocas ígneas extrusivas, las cuales son porosas y poseen alto

potencial de infiltración del agua dado su origen volcánico, lo que provoca que el agua prácticamente no forme escurrimientos perennes en la superficie, lo que favorece la captación directa del agua subterránea. La distribución de la vegetación respecto del gradiente altitudinal es de tipo pastizal en la parte más alta, con algunos ejemplares aislados de *Pinus hartwegii* de talla baja (menos de 5 metros). Además, conforme desciende la ladera, el pastizal pasa a matorral y, entre las cotas de los 3 700 msnm y los 3 600 msnm, se observa una franja con bosque de *Pinus hartwegii*. Por debajo de esta cota y hasta los 3 200 msnm aparece el bosque de oyamel (*Abies religiosa*), seguido de bosques mixtos donde se observan oyameles, pinos (*Pinus hartwegii*, *montezumae* y *pseudostrous*), encinos (*Quercus laurina*, *rugosa* y *lanceolata*), ailes (*Alnus firmifolia* y *jorullensis*) y madroños (*Arbutus xalapensis*).

Es importante comentar que con el descenso de cotas topográficas, la geología presenta transiciones de roca ígnea extrusiva a tobas y basaltos, pero los suelos siguen siendo delgados con abundante materia orgánica, lo que ofrece condiciones para drenaje rápido dadas las texturas limo-areno-arcillosas, susceptibles a la erosión, sobre todo si se retira la capa de hojarasca por la explotación de tierra de monte o por la construcción de "tinajas ciegas", las cuales, irónicamente se consideran prácticas de conservación de suelos en los programas de CONAFOR, aunque Cotler *et al.* (2015) consideran que producen impactos negativos que se reflejan en la movilización de toneladas por hectárea de carbono orgánico que se encuentran en el suelo, y que al pasar a la superficie se mineralizan, además del azolve que resulta del arrastre de sedimentos por erosión.

Por otro lado, al revisar los datos de los servicios ambientales (como captura de carbono, infiltración del agua, escurrimiento superficial y provisión de hábitat), los valores más altos se observan en las zonas con altitud entre 3 200 msnm y 3 600 msnm; es decir, donde se presenta el bosque mixto y de oyamel, con suelos de andosoles muy permeables que se ubican sobre rocas ígneas extrusivas. Cabe resaltar la presencia de zonas agrícolas y de asentamientos humanos en estas cotas, los cuales disminuyen los potenciales de servicios ambientales,

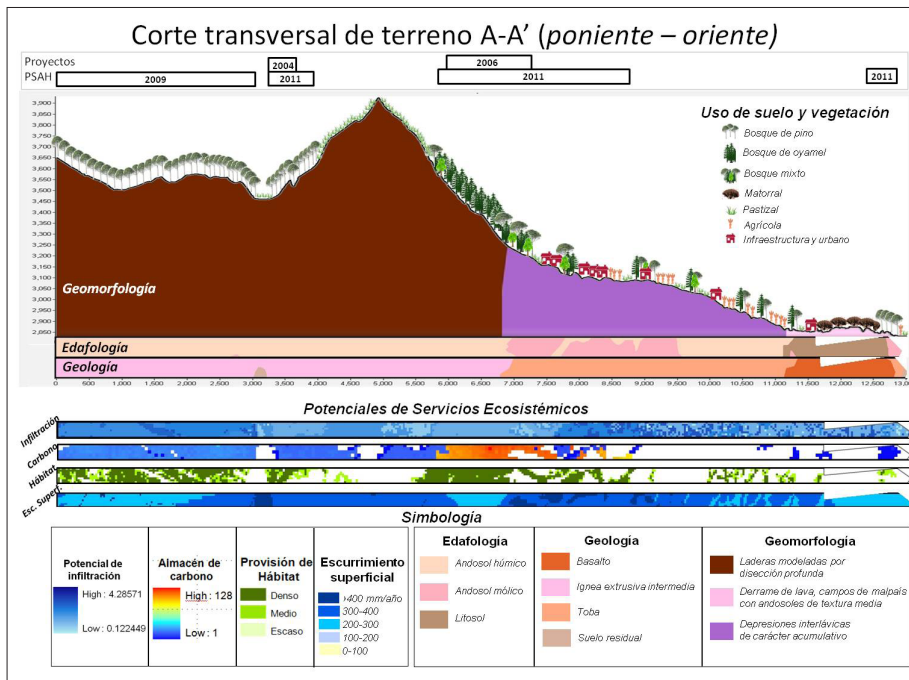


Figura 3. Caracterización ecosistémica del perfil poniente-oriente A-A'. Ecosystemic characterization of cross section along A-A' line (west-east).

(Fuente: elaboración propia, con base en PAOT-SMA, 2012; CONAFOR, 2015).

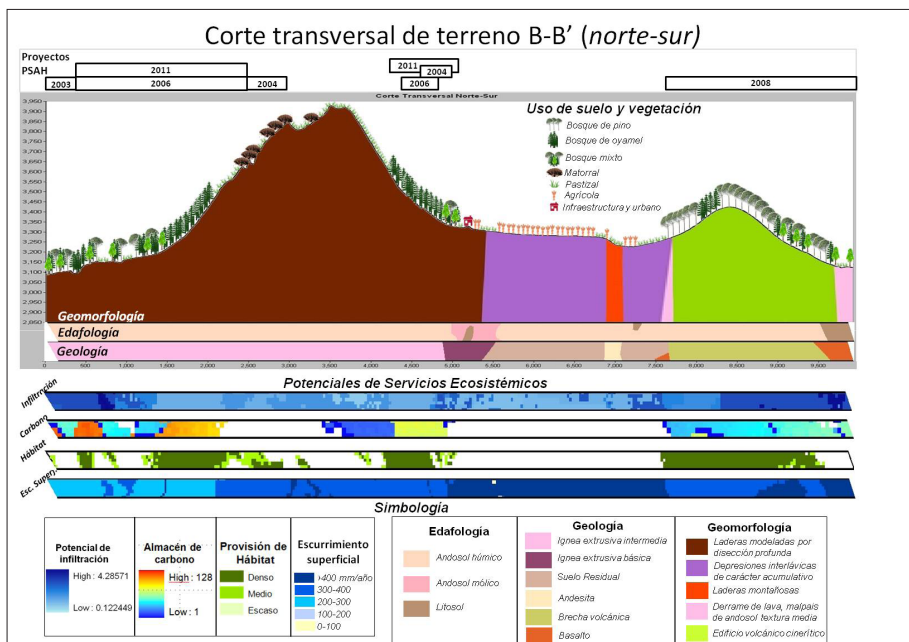


Figura 4. Caracterización ecosistémica del perfil norte-sur B-B'. Ecosystemic characterization of cross section along B-B' line (north-south).

(Fuente: elaboración propia, con base en PAOT-SMA, 2012; CONAFOR, 2015).

principalmente hidrológicos, por el sellamiento del suelo que esto conlleva.

Al revisar todos los polígonos de PSAH contra los valores de servicios ambientales, resultan evidentes otras potencialidades (incluso superiores a los valores de los hidrológicos), como el almacén de carbono y la provisión de hábitat. Este último asocia la densidad arbórea que se ha mantenido constante en espesor y superficie, por lo que se puede relacionar con la presencia de biodiversi-

dad o zonas menos perturbadas. Como se dijo en la metodología, para el análisis se seleccionaron las categorías con valores más altos de cada capa de servicios ambientales. En el Cuadro 2 y en la Figura 5 se aprecian estas zonas con respecto a los polígonos autorizados de PSAH (que fueron fusionados dando lugar a un sólo polígono), y es preocupante que hay áreas que quedaron fuera de este programa y otras, con valores no tan altos, que se han mantenido dentro del polígono de PSAH.

Cuadro 2. Análisis de los sitios con valores más altos de servicios ambientales con respecto a los PSAH presentados en la Figura 5 (Fuente: elaboración propia). Analysis of areas with high values environmental services vs. territories with payments for hydrological environmental services.

Servicio ambiental analizado	Ubicación de los valores más altos de SA respecto al territorio de la Comunidad	% estimado de superficie que presenta los valores más altos del SA respecto a los polígonos de PSAH	Zonas con los valores más altos de SA fuera de los polígonos de PSAH
Potencial de infiltración Figura A.	Se distribuyen al SO y una pequeña parte el NE. Los valores más altos ocupan <10%	2006 y 2011.- <10% 2009.- 10% 2008.- 20%	La mayor parte de los valores más altos están fuera de los polígono de PSAH
Escurrimiento superficial Figura B	Se distribuyen en el centro y sur del territorio. Los valores más altos ocupan casi el 70%	2004.- 75% 2006.- 10-15% 2008.- 80% 2009.- 35-40% 2011.- 75-80%	Esta variable aparece tanto dentro como fuera de los polígonos de PSAH.
Provisión de Hábitat Figura C	Aproximadamente la mitad del territorio presenta valores altos	Mas del 80% de la superficie de todos los polígonos de PSAH presentan valores altos de SA	En general, los valores altos corresponden con los polígonos de PSAH. Existe un macizo boscoso de 128.52 ha. al SO que no se ha inscrito en el programa de PSAH
Almacén de carbono Figura D	Toda la ladera NE del Ajusco tiene valores altos del SA y se observan otros dos sitios al SO; en total representan poco más del 10%	2006.- 85% 2008.- 20%	Los valores altos corresponden con dos polígonos de PSAH; sin embargo, existe un macizo boscoso de 47.34 ha. al SO que no se ha inscrito en ningún programa de PSAH
Zonas prioritarias por altos servicios ecosistémicos Figura E	Se observan dos zonas al SO con los valores más altos y algunas áreas pequeñas dispersas, distribuidas en la ladera NE del Ajusco y también en el SO. En total representan <5%	2004.- <5% 2006.- <10% 2008.- 15% 2009.- <5% 2011.- <10%	La mayoría de los valores altos están en el polígono de 2008 y otras pequeñas áreas en los polígonos del N, NE y SO; sin embargo, una superficie (65.38 ha.) con valores altos al SO no se ha inscrito en ningún programa de PSAH
N.- norte, NE.- noreste, SO.- Suroeste, SA.- Servicio ambiental, PSAH.- Pago por servicios ambientales hidrológicos			



Por lo anterior, se considera importante que los criterios para inscribir polígonos en el programa de PSAH no etiqueten sólo a los recursos hidrológicos, de carbono o de biodiversidad, ya que se muestra con esta información que los ecosistemas aportan un conjunto de servicios ambientales.

Una contribución de este estudio es que permite identificar, en términos ambientales, las zonas más importantes mediante la construcción del mapa de “zonas prioritarias por altos servicios ecosistémicos”, el cual incluye los valores más altos relacionados con la infiltración del agua, el escurrimiento superficial, el almacén de carbono y la provisión de hábitat (Figura 5).

Si bien no se encontraron zonas con estas cuatro variables (debido a que los suelos con mayor potencial de infiltración tienen características de alta permeabilidad y las zonas de mayor escurrimiento superficial tienen a ser menos permeables), sí se

identificaron 236.70 hectáreas en la comunidad que presentan tres de las cuatro variables con valores más altos de servicios ambientales. Por ello sería necesario pensar en que este territorio fuera considerado para ser incluido en un nuevo proyecto integrativo de PSA que incorpora diversos servicios ambientales y que pueda obtener un mayor pago por cada hectárea inscrita. Cabe mencionar que de esas 236.70 ha prioritarias por altos servicios ecosistémicos, 81.28 han quedado fuera de los polígonos de PSAH.

### Proyección de deforestación

Para complementar el ejercicio anterior se optó por revisar la información sobre cobertura forestal a partir de dos estudios disponibles (PAOT-Centro-Geo, 2010, 2014), con la finalidad de identificar si el programa de PSAH ha contribuido a detener el problema de la deforestación. Aunque los datos

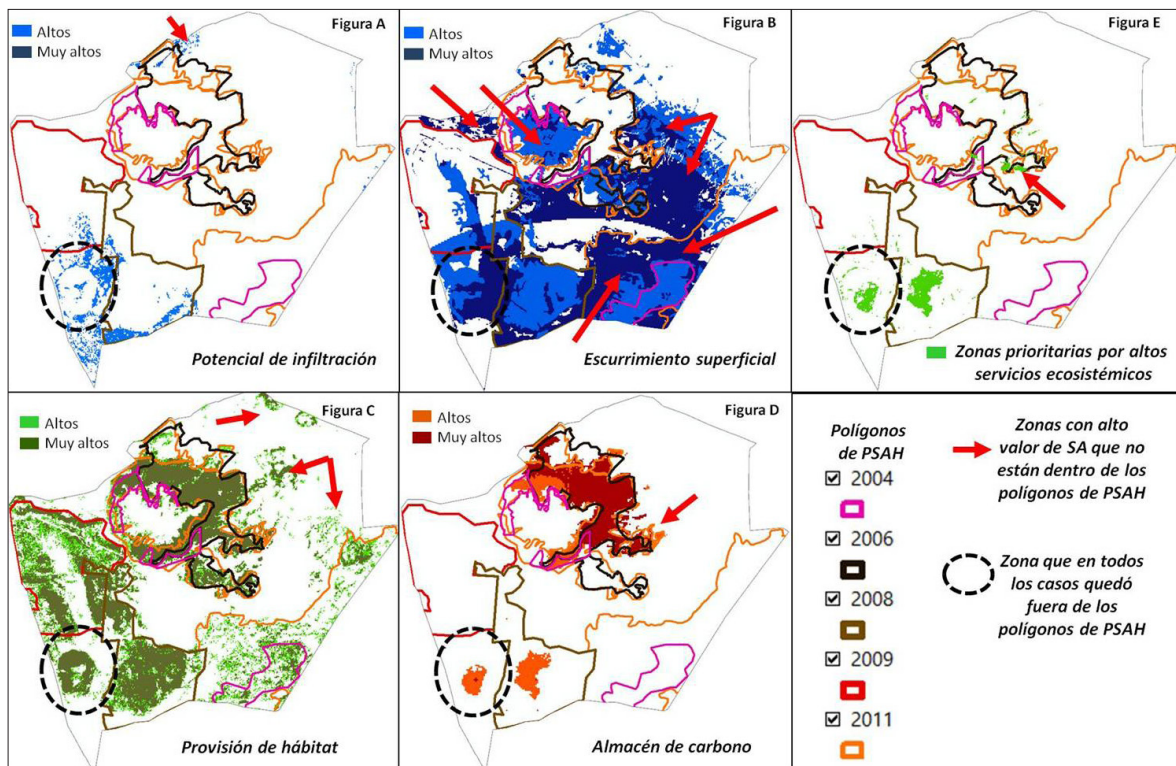


Figura 5. Distribución espacial de los valores más altos de servicios ambientales con respecto a los PSAH. Spatial analysis distribution of areas with high values of environmental services vs. territories with payments for hydrological environmental services (PHES).

(Fuente: elaboración propia, con base en PAOT-SMA, 2012)



de los dos estudios no son comparables debido a la metodología que se utilizó para su clasificación, el análisis espacial, visual y estadístico de los datos que contienen, permite identificar una tendencia de la deforestación de 215 hectáreas por año en este territorio. A pesar de eso, se observó que la deforestación no ha tenido el mismo comportamiento durante todo este periodo, como se puede observar en la Figura 6. Se observó que entre los años 2002 y 2006 no sólo se detuvo la pérdida de cubierta forestal, sino que aumentó la superficie vegetal (PAOT-CentroGeo, 2010), luego se mantuvo constante la cobertura (PAOT-CentroGeo, 2014) y, finalmente, disminuyó a partir de los años 2010 y 2012.

Al respecto hay varios supuestos que podrían definir este comportamiento, el primero es darle mérito a la presencia de los apoyos derivados del programa PSAH federal en la zona. El otro es referente a la entrada en vigor del Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal en el año 2000, el cual especifica que las zonificaciones para estas áreas son de tipo Forestal de Conservación, Área Natural Protegida y Agroforestal, categorías que restringen las actividades de aprovechamiento forestal, desmonte y, en general, el cambio de uso de suelo (Aguilar y Santos, 2011). El uso habitacional sólo está permitido para el casco urbano de la comunidad. Otro dato importante, que puede ayudar a interpretar porqué disminuyó la deforestación en 2010, es que el 16 de noviembre de ese año se publicó en la *Gaceta Oficial* del Dis-

trito Federal la declaratoria de San Miguel Ajusco como Reserva Ecológica Comunitaria,<sup>2</sup> la cual incluye 1 175.99 ha localizadas al sur de la comunidad. Un tercer supuesto se relaciona con los grandes incendios de 1998 en el suelo de conservación y la creación del vivero de San Luis Tlaxiátemalco, en Xochimilco (el cual tiene la capacidad de producir 30 millones de plantas y pertenece a la Secretaría del Medio Ambiente). Por esas fechas se inició una campaña masiva de reforestaciones anuales que ha ido disminuyendo (SEDEMA, 2016), pero los árboles que sobrevivieron ahora tienen una talla tal que se pudieron cuantificar en las imágenes satelitales usadas en los estudios revisados. Por otro lado, algunas razones que se identifican para explicar porqué la deforestación ha continuado en la zona son las siguientes: durante los recorridos en campo se observó que en la zona se presenta tala ilegal, presencia de asentamientos irregulares en la zona de bosque y ganado en libre pastoreo (al

<sup>2</sup> El Programa de Retribución por la Conservación de Servicios Ambientales, del gobierno local, otorga una retribución a los propietarios de los terrenos para promover un esquema de coparticipación entre sociedad, gobierno y poseedores de los recursos naturales, para la conservación de espacios naturales clave para la ciudad. Se otorgan recursos para pago de brigadas de vigilancia y conservación, para mejoramiento del área en general, adquisición y/o mejoramiento de infraestructura, y la entrega de un incentivo anual por la conservación de los servicios ambientales (SEDEMA, 2016). Véase: <http://www.sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/suelo-de-conservacion>

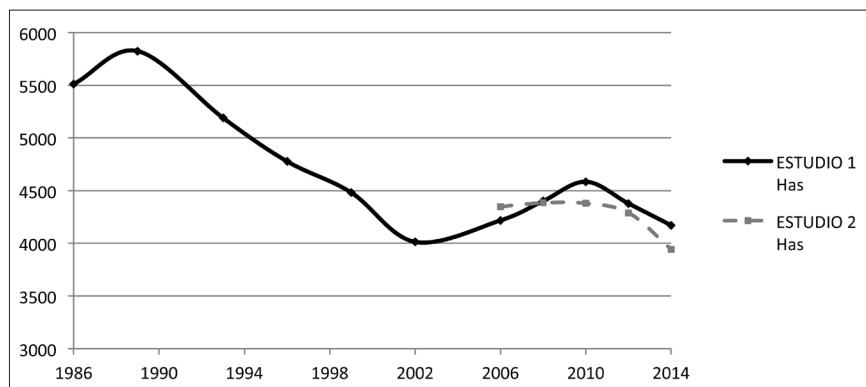


Figura 6. Índice de deforestación en la zona de estudio, de 1986 a 2014. Deforestation indicator in the study area.

(Fuente: elaboración propia con base en PAOT-CentroGeo, 2010, 2014)

que se asocian quemas provocadas para favorecer el rebrote del pasto que consume el ganado) y que ocasiona la muerte de plántulas y brinzales de reforestación o de regeneración natural del bosque, al ser pisadas o comidas por el ganado o incendiadas en las quemas (Salidas de campo, 2012-2016).

En las Figuras 7 y 8 se muestran los mapas con los modelos de pérdida de cubierta forestal de acuerdo a los dos estudios consultados; a éstos se les agregaron los polígonos de PSAH para identificar si las zonas deforestadas tienen coincidencia con estos apoyos y se graficaron los datos diferenciando las áreas deforestadas dentro del polígono de PSAH y fuera de él.

En la Figura 8 se aprovecha la proyección al 2030 para no sólo resaltar las zonas deforestadas al 2010, sino identificar las que posiblemente se perderán de continuar estas tendencias. Por otro lado, como se puede observar, tanto en el mapa como en la gráfica, el programa de PSAH no ha podido frenar la deforestación y las zonas donde se observó la mayor pérdida de cubierta forestal están en los límites entre los macizos boscosos y otros usos del suelo. Asimismo, se indican con números del 1 al 10 los lugares donde se ha dado la mayor pérdida de

arbolado. El número 1 es la zona con más superficie de pérdida; los sitios del 1 al 7 tienen coincidencia en ambos estudios; los sitios del 8 al 12 son los que podrían aparecer en un futuro considerando el dato de la proyección al 2030. En los sitios 2, 4, 5, 6, 10, 11 y 12 se presenta deforestación a pesar de estar inscritos en PSAH, lo que se confirma con las gráficas de apoyo de las Figuras 7 y 8, donde al diferenciar la superficie de pérdida de vegetación de las zonas dentro de los polígonos y fuera de ellos, se observa que las superficies deforestadas son mayores en las zonas inscritas al programa PSAH que en el resto del territorio de la comunidad (no se considera en este análisis el polígono de PSAH por año, por lo que existe la posibilidad de que la deforestación en esos sitios se haya dado una vez que el programa concluyó su vigencia). Esto indica que el programa de PSAH no ha podido tener una incidencia importante en la problemática de la deforestación en la zona y la proyección indica que se perderá más superficie arbolada, por lo que es necesario tomar medidas inter e intra sectoriales para evitar ese escenario.

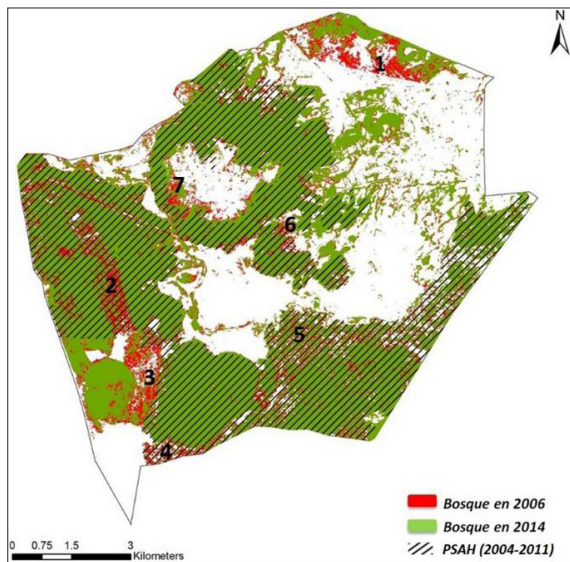


Figura 7. Mapa de la pérdida de cubierta forestal del 2006 al 2014, con los polígonos de PSAH, y gráfica complementaria. Deforestation 2006-2014 vs. territories PHES.

(Fuente: elaboración propia, con base en PAOT-CentroGeo, 2014; CONAFOR, 2015)

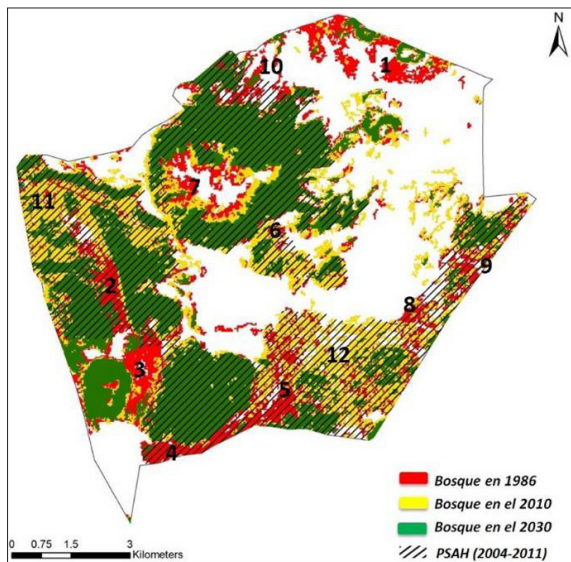


Figura 8. Mapa de la pérdida de cubierta forestal de 1986 al 2030, con los polígonos de PSAH y gráfica complementaria. Deforestation 1986-2030 vs. territories PHES.

(Fuente: elaboración propia, con base en PAOT-CentroGeo, 2010; CONAFOR, 2015)

## CONCLUSIONES

En este trabajo se elaboraron dos perfiles longitudinales, donde se incorporó la información cartográfica disponible, para llevar a cabo una evaluación ambiental integral del programa federal de PSAH en la zona de Ajusco, México. Este ejercicio permitió realizar un análisis completo para identificar los sitios de recepción de pago y su relación con las potencialidades del territorio para ofrecer diversos servicios ecosistémicos así como la proyección de deforestación. Además, a través del uso de los sistemas de información geográfica y la generación del mapa de "zonas prioritarias por altos servicios ecosistémicos", se mostró que en el caso de estudio de la comunidad de San Miguel y Santo Tomás Ajusco, en general, los sitios apoyados por el programa de PSAH durante 2003-2012 poseen altos valores hidrológicos; sin embargo, también ofrecen potencialmente otros servicios, como captura de carbono y provisión de hábitat, que incluso tienen valores superiores a los potenciales hidrológicos.

Por lo anterior, se recomienda reformular el programa de PSAH, estableciendo los apoyos en "paquetes de diversos SA" (con un monto económico mayor) y no restringirlos a una modalidad, ya que cada territorio aporta más de un servicio, como, por ejemplo, lo han establecido en Costa Rica, el país pionero en América Latina en aplicar este tipo de mecanismos de compensación económica (Ochoa, 2009). En este sentido, la CONAFOR ha avanzado al impulsar iniciativas de mecanismos locales (que incorporan las características específicas de cada sitio en particular), con el financiamiento mixto dentro de los Fondos Concurrentes y apoyo a las comunidades que ofrecen diversos servicios ecosistémicos, los que se cree que se irán perfilando como programas dominantes a futuro, en contraste con el programa federal y la imposibilidad de poder cubrir la creciente demanda por parte de los solicitantes (Perevochtchikova y Rojo, 2015).

También se pudo determinar que, a pesar de la implementación del programa de PSAH en la zona de estudio durante casi una década, se mantiene la deforestación. Aunque aparentemente su tasa disminuyó durante 2006-2014, se observó que las

áreas deforestadas dentro de las zonas inscritas en el programa de PSAH son mayores que las que no lo han estado; por otro lado, se identificaron otros factores que también pudieron contribuir al proceso, lo que indica que un programa federal, como el PSAH, aislado no tiene incidencia en la problemática de la deforestación en las comunidades del suelo de conservación. Esto refuerza la idea de la necesidad de la sinergia entre los instrumentos de política pública con la planeación territorial y la disminución de los impactos ambientales. Finalmente, se resalta la identificación de un área continua de 236.70 hectáreas forestales, dentro de la zona de estudio, que no ha sido inscrita en el programa de PSAH y que presenta los valores más altos de diversos SA, dejando explícita la vulnerabilidad de este territorio ante el panorama de la presión urbana.

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento de los proyectos 155039 de Ciencia Básica, 246947 de Problemas Nacionales y 260199 de estancia sabática; y al Dr. Oscar Escolero, IG-UNAM, por sus sugerencias sobre la evaluación ambiental integrada del programa de PSAH.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aceves-Quesada, J. F., J. Díaz-Salgado y J. López-Blanco (2007), "Vulnerability assessment in a volcanic risk evaluation in Central Mexico through a multi-criteria-GIS approach", *Natural Hazards*, vol. 40, núm. 2, pp. 339-356.
- Aguilar, A. G. y C. Santos (2011), "Asentamientos informales y preservación de medio ambiente en la Ciudad de México. Un dilema para la política de uso del suelo", en Pérez-Campuzano, E., M. Perevochtchikova y S. V. Ávila-Foucat (coord.), *Suelo de Conservación del Distrito Federal. ¿Hacia una gestión y manejo sustentable?*, M. A. Porrúa, México, pp. 93-124.
- Balderas Torres, A., D. C. MacMillan, M. Skutsch y J. C. Lovett (2013), "Payment for Ecosystem Services and rural development: Landowners' preferences and potential participation in western Mexico", *Ecosystem Services*, núm. 6, pp. 72-81.

- Balvanera, P., M. Uriarte, L. Almeida-Leñero, A. Altesor, F. de Clerck, T. Gardner, J. Hall, A. Lara, P. Laterra, C. Peña-Muñoz, D. M. Silva-Matos, A. L. Vogl, L. P. Romero-Duque, L. F. Arreola, A. Caro-Borrero, F. Gallego, M. Jain, C. Little, X. R. de Oliveira, Jo. M. Paruelo, J. E. Peinado, L. Poorter, N. Ascarrunz, F. Correa, M. B. Cunha-Santino, A. P. Hernández-Sánchez y M. Vallejos (2012), "Ecosystem Services Research in Latin America: The State of the Art", *Ecosystem Services*, vol. 2, pp. 56-70.
- Barton Bray, D., E. Durán y O. A. Molina (2012), "Multiscale governance and indigenous/community conserved areas in Oaxaca, Mexico", *International Journal of the Commons*, vol. 6, pp. 151-178.
- Brüschweiler, S., U. Höggel y A. Kläy (2004), "Los Bosques y el Agua: Interrelaciones y su Manejo", *Centre for Development and Environment*, Geographica Bernensia, Berna, Suiza.
- Caro-Borrero A., J. Carmona-Jiménez, T. González-Martínez y M. Mazari-Hiriart (2015), "Hydrological evaluation of a peri-urban stream and its impact on ecosystem services potential", *Global Ecology and Conservation*, vol. 3, pp. 628-644.
- Carrera-Hernández, J. J. y S. J. Gaskin (2008), "Spatio-temporal analysis of potential aquifer recharge: application to the Basin of Mexico", *Journal of Hydrology*, vol. 353, num. 3-4, pp. 228-246.
- Chang, M. (2006), *Forest Hydrology. An Introduction to Water and Forests*, segunda edición, Taylor and Francis Group, EE.UU.
- Chen, N., L. Huancheng y W. Lihong (2009), "A GIS-Based Approach for Mapping Direct Use Value of Ecosystem Services at a County Scale: Management Implications", *Ecological Economics*, vol. 68, pp. 2 768-2 776.
- CONABIO (2010), *El Bosque Mesófilo de Montaña de México. Amenazas y oportunidades para su conservación y manejo sostenible*, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- CONAFOR (2015), Base de datos de los sitios receptores de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos en México, 2003-2015, Comisión Nacional Forestal, México.
- CONAFOR (2016), página web oficial actualizada al 06/10/2016. <http://www.gob.mx/conafor>
- Cortina, S. y A. Saldaña (2014), "Retos de la evaluación del Programa de Pago por Servicios Ambientales de la Comisión Nacional Forestal", en Perevochtchikova M. (coord.), *Pago por Servicios Ambientales en México. Un acercamiento para su estudio*, El Colegio de México, México, pp. 133-154.
- Cotler, H., S. Cram, S. Martínez y V. Bunge (2015), "Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: caso de las zanjas trincheras", *Investigaciones Geográficas*, núm. 88, pp. 6-18.
- Daily, G. (ed.), (1997), *Natures Services. Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Washington, Island Press, EE.UU.
- De Groot, R. S., M. A. Wilson y R. M. J. Boumans (2002), "A Typology for the Classification, Description and Valuation of Ecosystem Functions, Goods and Services", *Ecological Economics*, vol. 41, pp. 393-408.
- Domenico, P. A. y W. Schwartz (1998), *Physical and Chemical Hydrogeology*, segunda edición, John Wiley and Sons, New York, EE.UU.
- Ellis, E. y L. Porter-Bolland (2008), "Is community based forest management more effective than protected areas? A comparison of land use/land cover change in two neighboring study areas of the Central Yucatán Peninsula, Mexico", *Forest Ecology and Management*, vol. 256, pp. 1 971-1 983.
- Engel, S., S. Pagiola y S. Wunder (2008), "Designing payment for environmental services in theory and practice-an overview of the issues", *Ecological Economics*, vol. 65, num. 4, pp. 663-674.
- FAO (2012), *El estado de los bosques del mundo*, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia.
- Fisher, B., K. Turner y P. Morling (2009), "Defining and Classifying Ecosystem Services for Decision Making", *Ecological Economics*, vol. 68, pp. 643-653.
- Freeze, R. A. y J. A. Cherry (1979), *Groundwater*, Prentice-Hall Inc., N. J. EE.UU.
- García Rodríguez, M., J. I. Gallego y A. E. Fernández Escalante (2004), *Características hidrogeológicas de la zona de borde entre el macizo cristalino y el terciario detrítico en Torrelodones (Madrid)*, Universidad Alfonso E. El Sabio, Escuela Politécnica Superior Villanueva de la Cañada, Madrid, España.
- Gómez Mendoza, L., E. Vega Peña, M. I. Ramírez, J. L. Palacio Prieto y L. Galicia (2006), "Projecting land use change processes in Sierra Norte of Oaxaca", *Applied Geography*, vol. 26, pp. 276-290.
- Honey-Roses, J., J. López-García, E. Rendón-Salinas, A. Peralta-Higuera y C. Galindo-Leal (2009), "To pay or not to pay? Monitoring performance and enforcing conditionality when paying for forest conservation in Mexico", *Environmental Conservation*, vol. 36, núm. 2, pp. 120-128.
- Honey-Roses, J., J. Baylis y M. I. Ramírez (2011), "A spatially explicit estimate of avoided forest loss", *Conservation Biology*, vol. 25, núm. 5, pp. 1 032-1 043.
- INE (2005), Definición de indicadores de impacto al recurso hídrico en zonas receptoras de pago por servicios ambientales hidrológicos 2003/2004. Informe final, Instituto Nacional de Ecología, México.
- Jujnovsky, J., L. Almeida-Leñero, M. Bojorge-García, Y. L. Monges, E. Cantoral-Uriza y M. Mazari-Hiriart (2010), "Hydrologic ecosystem services: water quality and quantity in the Magdalena River, Mexico City", *Hidrobiológica*, vol. 20, núm. 2, pp. 113-126.



- Jujnovsky, J., T. M. González-Martínez, E. A. Cantoral-Uriza, L. Almeida-Leñero (2012), "Assessment of Water Supply as an Ecosystem Service in a Rural-Urban Watershed in Southwestern Mexico City", *Environmental Management*, vol. 49, pp. 690–702.
- Kareiva, P., H. Tallis, T. H. Ricketts, G. C. Daily y S. Polasky (2012), *Natural Capital. Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services*, Oxford, Oxford University Press, New York, EE.UU.
- Mahmoud, S. H. y A. A. Alazba (2015), "Hydrological Response to Land Cover Changes and Human Activities in Arid Regions Using a Geographic Information System and Remote Sensing", *PLOS ONE*, vol. 10, núm. 4, pp. 1-19.
- Manson, R. (2007), Efectos del uso del suelo sobre la provisión de servicios ambientales hidrológicos: monitoreo del impacto del PSAH, Informe final, Instituto de Ecología, A.C., Veracruz, México.
- Martínez Harms, M. J. y P. Balvanera (2012), "Methods for Mapping Ecosystem Service Supply: A Review International Journal of Biodiversity Science", *Ecosystem Services and Management*, núm. 1, pp. 1-9.
- MEA (2005), *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, EE.UU.
- Merino, L. (2005), "El desarrollo institucional de esquemas de pago por servicios ambientales", *Gaceta Ecológica*, núm. 74, pp. 29-42.
- Morales-Luis, R., O. L. Palacios-Vélez, L. Marín-Stillman y S. Peña-Díaz (2000), "Dirección de flujo y clasificación del agua subterránea en Monte Alegre, Sierra del Ajusco, México", *Agrociencia*, vol. 34, núm. 6, pp. 667-687.
- Muñoz, C., A. Guevara, J. M. Bulás, J. M. Torres Rojo y J. Braña Varela (2006), "Pagar por los servicios hidrológicos del bosque en México", en Pagiola, S., J. Bishop y N. Landell-Mills (coords.), *La venta de servicios ambientales forestales*, INE, SEMARNAT, CONAFOR, México. [https://goo.gl/DwcaUB].
- Ochoa, A. M. (2009). *Programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos en México: implementación y funcionamiento*, Tesis de Maestría en Estudios Urbanos, El Colegio de México, México.
- Pagiola, S., J. Bishop y N. Landell-Mills (coords.) (2003), *La venta de servicios ambientales forestales*. SEMARNAT, INE, CONAFOR, México.
- PAOT (2009), "Diagnóstico de las zonas afectadas por la tala clandestina y la presión urbana dentro y propuesta de recomendaciones para su manejo, conservación y aprovechamiento sustentable", estudio EOT-04-2009, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial. [http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/EOT-04-2009.pdf: 6 de octubre de 2016].
- PAOT-SMA (2012), *Atlas geográfico del Suelo de Conservación del Distrito Federal*, PAOT y Secretaría del Medio Ambiente, México.
- PAOT-CentroGeo (2010), Modelo de análisis tendencial sobre la pérdida de cubierta forestal en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, Primer Informe, México.
- PAOT-CentroGeo, 2014, Ampliación, consolidación e integración de los estudios, aplicaciones, iniciativas y recomendaciones realizadas por CentroGeo a PAOT, Informe final, México.
- Peñuela Arévalo, L. A. (2009), *Proceso de recarga-descarga de agua subterránea en zonas receptoras de pago por servicio ambiental hidrológico. Sierra Nevada y Las Cruces- México*. Tesis de maestría, UNAM, México.
- Peñuela Arévalo, L. A. y J. J. Carrillo Rivera (2013), "Discharge areas as a useful tool for understanding recharge areas, study case: Mexico Catchment", *Environmental Earth Science*, vol. 68, pp. 999–1013.
- Perevochtchikova, M. y A. Vázquez (2012), "The federal program of Payment for Hydrological Environmental Services as an alternative instrument for Integrated Water Resources Management in Mexico City", *The Open Geography Journal*, vol. 5, pp. 35-46.
- Perevochtchikova, M. y J. Oggioni (2014), "Global and Mexican analytical review of the state of art on Ecosystem and Environmental services: a geographical approach", *Investigaciones Geográficas*, núm. 85, pp. 47-65.
- Perevochtchikova, M. (coord.) (2014), *Pago por Servicios Ambientales en México. Un acercamiento para su estudio*, El Colegio de México, México.
- Perevochtchikova, M. e I. A. Rojo Negrete (2015), "The perceptions about payment schemes for ecosystem services: Study case of the San Miguel and Santo Tomás Ajusco community, Mexico", *Ecosystem Services*, núm. 14, pp. 27-36.
- Perevochtchikova, M., I. A. Rojo Negrete, S. Martínez y G. Fuentes Mariles (2015), "Análisis hidro-climatológico para la evaluación de los efectos del programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos. Caso de estudio de la comunidad de San Miguel y Santo Tomás Ajusco, México", *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, vol. 11, núm. 1, pp. 46-55.
- Pidwirny, M. y S. Jones (2010), "Maps, Remote Sensing, and GIS", *Fundamentals of Physical Geography*, segunda edición, University of British Columbia, Canadá.
- Postel, S. y S.R. Carpenter (1997), "Freshwater Ecosystem Services", en G. Daily (ed.), *Nature's Services*, Washington, Island Press, EE.UU., pp. 195-214.
- Saavedra Z., L. Ojeda Revah y F. López Barrera (2011), "Identification of threatened areas of environmental value in the Conservation Area of Mexico City, and setting priorities for their protection", *Investigaciones Geográficas*, núm. 74, pp. 19-34.



- Sanders, J., N. Dendoncker, H. Keune (2013), *Ecosystem Services – Global Issues, Local Practice*, Elsevier, EE.UU.
- Sandoval, E. y J. Gutiérrez (2012), "Servicios Ambientales, experiencia federal en el Distrito Federal", en Campuzano, E., M. Prevochtchikova y S. Avila-Foucat (coord.), *Hacia un manejo sustentable del Suelo de Conservación del Distrito Federal*, IPN, M. A. Porrúa, México, pp. 74-79.
- SEDEMA (2016), página web oficial [www.sedema.cdmx.gob.mx: 01/10/2016].
- Sims, K. R., Alix-García J.M., Shapiro-Garza E., Fine L.R., Radeloff V.C., Aronson G., Castillo S., Ramírez-Reyes C., Yañez-Pagans P. (2014). Improving environmental and social targeting through adaptive management in Mexico's payments for hydrological services program. *Conservation Biology* 28(5):1151-9.
- Spalvins, A., J. Slangens, I. Lace, K. Krauklis y O. Aleksans (2014), "Survey of the first results provided by hydrogeological model of Latvia", *Memories of the 9th International Conference Environmental Engineering*, Vilnius, Lituania.
- Toth, J. (2000), "Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones", *Boletín Geológico y Minero*, vol. 111, núm. 4, pp. 9-26.
- Troy, A. y M.A. Wilson (2006), "Mapping Ecosystem Services: Practical Challenges and Opportunities in Linking GIS and Value Transfer", *Ecological Economics*, vol. 60, pp. 435-449.
- Van Zijl, G. y P. Le Roux (2014), "Creating a conceptual hydrological soil response map for the Stevenson Hamilton Research Supersite, Kruger National Park, South Africa", *Water SA*, vol. 40, núm. 2, pp. 331-336.
- Velaso Murguía, A., E. Durán Medina, R. Rivera y D. Barton Bray (2014), "Cambios en la cobertura arbolada de comunidades indígenas con y sin iniciativas de conservación, en Oaxaca, México", *Investigaciones Geográficas*, núm. 83, pp. 56-74.
- Vigerstol, K. L. y E. A. Juliann (2011), "A Comparison of Tools for Modeling Freshwater Ecosystem Services", *Journal of Environmental Management*, vol. 92, núm. 10, pp. 2 403-2 409.
- Wunder, S. (2005), *Pagos por servicios ambientales: Principios básicos esenciales*, Centro Internacional de Investigación Forestal, Occasional Paper núm. 42(s).