
Información hidroclimatológica 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.

M. Perevochtchikova^{1*}, I. A. Rojo Negrete², S. Martínez³ y G. E. Fuentes Mariles⁴

¹El Colegio de México A.C., Av. Camino al Ajusco 20, Pedregal de Santa Teresa, CP 10740, DF, México.

²Posgrado en Geografía, UNAM, Circuito de Posgrados, Ciudad Universitaria, CP 04510, DF, México.

³Autoridad de Cuenca Matanza-Riachuelo, Esmeralda 255 PB, Buenas Aires, Argentina.

⁴Instituto de Ingeniería, UNAM, Circuito Interior s/n, Ciudad Universitaria, CP 04510, DF, México.

Hydroclimatological information for effects evaluation of the Payment for Environmental Hydrological Services program. Study case of the community of San Miguel y Santo Tomás Ajusco, Mexico.

Abstract

This research work presents an analysis of hydroclimatological information, in order to propose improvements for evaluation of the (environmental) effects of the Mexican program of Payment for Hydrological Environmental Services (PHES). Particularly, it is developed the case study of the San Miguel y Santo Tomás Ajusco community, located in the Conservation Land of Mexico City and that has participated in the program since 2004. The methodology combines documentary research of available official and scientific information and fieldwork carried out in 2012-2013 (with the installation of a weather station, measuring in situ and sampling water for physicochemical analysis in laboratory), with the purpose of presenting climatological and hydrological data (climate, quality and quantity) on regional and local scales. The main results show the suitability of the area for application of PHES for its natural characteristics, as well as the good quality of water in the springs, but with a dynamic of amount decrease, that demonstrates their vulnerability and the need to implement scheme of continuous monitoring.

Key words: climate, water quality and quantity, environmental effects, payment programs, conservation land.

Resumen

Se presenta el análisis de información hidroclimatológica, con el fin de proponer mejoras para la evaluación de los efectos (ambientales) del programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) en México. En particular, se desarrolla el estudio de caso de la comunidad forestal de San Miguel y Santo Tomás Ajusco, ubicada en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, que ha participado en el programa desde 2004. La metodología combina la investigación documental de la información oficial y científica disponible y el trabajo de campo realizado en 2012-2013 (con la instalación de una estación climatológica, el muestreo in situ y la toma de muestras de agua para el análisis físico-químico de laboratorio), con el propósito de presentar datos climatológicos e hidrológicos (cantidad y calidad) a escala regional y local. Los principales resultados señalan la idoneidad de la zona para aplicación del PSAH por sus características naturales, igual que buena calidad del agua en los manantiales, pero con una dinámica de disminución en su cantidad, lo que demuestra su vulnerabilidad y la necesidad de implementar esquema de monitoreo continuo.

*Autores de correspondencia

Email: mperevochtchikova@colmex.mx

Palabras clave: clima, calidad y cantidad de agua, efectos ambientales, programas de pago, suelo de conservación.

Introducción

Los ecosistemas forestales siempre han sido importantes para la subsistencia de la vida humana en el planeta por todos los bienes (maderables y no) y los servicios que ofrecen. Desde las civilizaciones antiguas hasta la presente, las actividades antropogénicas han deteriorado excesivamente los bosques. Según Solórzano y Páez-Acosa (2012), en los últimos diez mil años 25 países han perdido completamente su cobertura forestal y otros 29 han quedado con solo un 10%, y presentan un deterioro severo de este valioso recurso natural. Entre los años 2000-2005, la deforestación global fue de 65 millones de ha, las mayores tasas anuales observadas se presentaron en países de África (3.2%) y América Latina (2.5%). El informe de la FAO (2012) sólo confirma esta situación al mostrar el promedio anual neto de desaparición de bosques de 5.2 millones de ha a nivel mundial entre 2000-2010.

México ocupa un 1.5% del territorio mundial y está catalogado como un país megadiverso (CONABIO, 2008) ya que alberga cerca del 10% de la biodiversidad total, con muchas especies endémicas. Sin embargo, la problemática de la deforestación es latente por presentar pérdidas de alrededor de 155 000 ha por año en el periodo de 2005-2010 (INEGI 2013). Entre las principales causas de la deforestación se encuentran: el cambio de uso de suelo por la expansión urbana y las políticas públicas que fomentan la producción agropecuaria y ganadera, la tala ilegal y sobre-explotación, las enfermedades y plagas, así como los incendios forestales (Hughes *et al.* 2000; Geist y Lambin, 2002). Entre sus consecuencias se resaltan: la erosión y degradación de suelo, la modificación en la infiltración de agua y evapotranspiración, la degradación y desaparición de hábitat natural, y múltiples impactos de carácter socio-económico (FAO 2012).

Todo esto influye en la pérdida de diversos Servicios Ecosistémicos (SE) que ofrece el bosque en relación a sus funciones ecológicas, como servicios de provisión, regulación, culturales y de soporte (Daily, 1997; Bishop y Landell-Mills, 2003; Bruschweiler *et al.*, 2004; Kareiva *et al.*, 2011;

Niemela *et al.*, 2012). Para confrontar esta situación se han desarrollado a partir de la Conferencia de Río (PNUMA, 1992), múltiples instrumentos de política pública ambiental, dirigidos hacia la conservación forestal, aunque desde la perspectiva de capital y desarrollo económico (Ayala y Tenthoff, 2012). Así se ha creado el primer mecanismo de Pago por Servicios Ambientales (PSA), que comprende compensación económica por parte de los países desarrollados por emisión de gases de efecto invernadero a los países en desarrollo que conserven cobertura forestal (UN, 1998), abriendo de esta manera la puerta a los mercados de otros SE.

En México el programa federal de PSA (con el uso del adjetivo “ambiental” en lugar de ecosistémico, para fines políticos y de gestión más amplios) ha sido implementado desde 2003, en la modalidad de hidrológicos, bajo el ejemplo de su homólogo en Costa Rica y debido a las facilidades de crédito que ofrecía el Banco Mundial (Perevochtchikova y Ochoa, 2012). Posteriormente se han ampliado las modalidades del programa, se han modificado sus reglas de operación, así como los criterios de elegibilidad y se han establecido otras formas de apoyo y subsidios a la conservación ambiental (Alix-García *et al.*, 2008; Muñoz-Piña *et al.*, 2011). A pesar de los cambios el programa ha logrado atraer el firme interés de la agenda política nacional y de los potenciales participantes (mayoritariamente comunidades y ejidos) demostrado con el cumplimiento de las metas operativas propuestas para 2012 aún en 2010 (Perevochtchikova y Vázquez, 2012). Sin embargo, dejando en evidencia múltiples limitantes, sobre todo en relación a la falta de estudios sobre los efectos que ha generado el programa en la sociedad y el ambiente y al logro de sus objetivos de conservación y de mejoramiento de bienestar social, para cual fue creado. El aspecto del mejoramiento de la evaluación de efectos ambientales del PSAH se retoma en el presente trabajo.

Marco conceptual

Los SE han sido promovidos desde la economía ecológica en la década de los noventa y se refieren a las condiciones y procesos que los ecosistemas naturales ofrecen a la sociedad (Daily, 1997;

Costanza *et al.*, 1997; Greenwalt y McGarh, 2009; Garay, 2010). Según MEA (2005) los SE se distinguen en virtud de las funciones que cumplen en cuatro grupos: I) de provisión, que son objetos tangibles y/o consumibles, como comida, fibras, combustible o agua; II) de regulación, que se enmarcan en los procesos ecológicos dentro de los ciclos naturales; III) culturales, servicios intangibles, como la recreación, el disfrute estético y espiritual de la naturaleza; y IV) servicios de soporte, que resultan ser base para el mantenimiento de todos los demás servicios e incluyen los ciclos de los nutrientes y formación de suelos. Dependiendo de las etapas dentro de los procesos naturales se dividen en intermedios y finales (De Groot *et al.*, 2002), además de la agrupación en los SE hidrológicos, captura de carbono, de biodiversidad y paisaje (MEA, 2005), entre otras tipologías existentes (NRC, 2005; Fisher *et al.*, 2009).

Por su parte el bosque y su funcionamiento depende de los procesos ecosistémicos que se desarrollan en distintas dimensiones temporales y espaciales, por lo que los servicios que genera también son percibidos a distintas escalas (Fisher *et al.*, 2009; Solórzano y Páez-Acosa, 2012). Por ejemplo, varían de periodos cortos y acción local (como obtención de comida), a mediano plazo y escala regional (estabilización climática, contribución al ciclo hídrico, etc.), hasta largo plazo, con influencias mundiales (como captura de carbono) (Bishop y Landell-Mills, 2003; Balvanera, 2012).

Los SE forestales en relación al agua, se detectan dentro de los tres grupos de servicios (por su naturaleza multifacética): provisión del agua; regulación del ciclo hídrico, con mantenimiento del hábitat natural, control de procesos de erosión, sedimentación y enfermedades; y amplios servicios de recreación (Bruschweiler *et al.*, 2004). Para este binomio de Bosque – Agua se pueden encontrar diversos estudios hidroclimatológicos (Brooks *et al.*, 2003; Bruschweiler *et al.*, 2004; Chang, 2006) que incluyen análisis de la cantidad y la calidad del agua superficial y subterránea (Manson, 2007), así como investigaciones de varios aspectos de capital natural (Kareiva *et al.*, 2011), siempre considerando la cuenca hidrográfica, como unidad territorial de manejo (Cordero, 2008; Ujnovsky *et al.*, 2012; Perevochtchikova y Vázquez, 2012).

El mecanismo de PSA en sí mismo, resulta ser una de las herramientas recientes de política pública ambiental desarrollada para prevenir la

deforestación y mejorar el bienestar humano (en términos del desarrollo económico sustentable), por medio de las compensaciones económicas otorgadas por la realización de las actividades que garanticen la permanencia y el uso de ecosistemas a largo plazo (Fregoso, 2006). Este hecho parte de la lógica ecológica de que un buen estado de los ecosistemas es central para la conservación de sus servicios; igual que de la lógica económica de que los mercados y los pagos asumen la internalización de las externalidades negativas (Wunder, 2005; Cordero, 2008; Kosoy *et al.*, 2008). Los PSA se definen como instrumentos financieros, que aseguran la conservación de los SE al concederles un valor económico (NRC, 2005), que pueden ser representados a escala local y global (Fisher *et al.*, 2009). Es una transacción voluntaria, sobre los SE bien definidos que se convierte en la “compra” por parte de al menos un usuario de los SE a su proveedor (Rosa y Kandel, 2002; Wunder, 2005).

De esta manera dentro del esquema de PSA forestal se detecta una serie de actores involucrados directamente en su funcionamiento: los proveedores de los servicios (que son propietarios de terrenos que poseen bosques y quienes se benefician del pago, renunciando a otros usos de suelo, quizás potencialmente más atractivos) y los usuarios (que puede ser una población en particular, algún sector industrial o el gobierno). En los programas federales es precisamente el gobierno quién administra y financia estos mecanismos, tomando el papel de usuarios, cuando los SE nos están definidos con claridad. Pero existen otros participantes, como Organizaciones No Gubernamentales o gobiernos a nivel estatal y municipal, que gestionan los programas que surgen de iniciativas locales y fondos mixtos, donde se mezclan los capitales provenientes de distintas fuentes (Rosa *et al.*, 2004). En el caso de esquemas de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH), la idea se concibe en el otorgamiento de una compensación económica a los dueños de los terrenos ubicados en las partes altas de cuencas hidrográficas (zonas de captura del agua subterránea), que decidan preservar sus áreas forestales, con fin de proporcionar servicios hidrológicos a la población cuenca abajo (Greenwalt y McGarh, 2009; Cordero, 2008).

PSA en México

Como se ha mencionado, el programa federal de PSA en México se ha implementado desde el 2003

por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), y ha ido cambiando su formulación desde los SE hidrológicos, hasta incluir a la Captura de carbono y la Biodiversidad, formando parte de los 45 rubros de apoyo dentro del programa ProÁrbol (2006-2012), y su posterior incorporación al Programa Nacional Forestal (PRONAFOR) en 2013. Cabe señalar que el instrumento ha tenido también modificaciones anuales en las reglas de operación que lo rigen y de criterios de selección de zonas elegibles. A pesar de esto, ha logrado cumplir las metas institucionales, incorporado 2767 millones de hectáreas, 5400 propietarios y 5289 millones de pesos para 2010 (www.conafor.gob.mx); convirtiéndose en uno de los programas federales más importantes del mundo (Perevochtchikova y Ochoa, 2012). Sin embargo, ha presentado varias limitantes, como la falta de cuantificación y monitoreo de los SE (no sólo refiriéndose a la cobertura forestal analizada por la CONAFOR), y de estudios de los efectos socio-ambientales que esto genera (Mayrand y Paquin, 2004; Bruschiweiler *et al.*, 2004; Manson, 2007).

Cabe señalar que en los últimos años ha surgido un crecimiento de la bibliografía acerca de los SE y esquemas de PSA alrededor del mundo (Mayrand y Paquin, 2004; Fregoso, 2006; Martínez-Tuna y Kosoy, 2007; Muñoz-Piña *et al.*, 2008; Cordero, 2008; Balvanera *et al.*, 2012; Molnar y Kubiszewski, 2012; Gross-Camp *et al.*, 2012), analizados en una línea de tiempo 1992-2012 en el trabajo de Perevochtchikova y Oggioni (2014) para escala internacional y nacional. En esta revisión se han identificado 49 artículos científicos sobre el tema en México, y sólo 10 de ellos relacionados al programa de PSA. De 49 artículos la mitad analizan el territorio del Distrito Federal, y los restantes se refieren a casos en los estados de Michoacán, Veracruz y Oaxaca, enfocándose predominantemente a las cuestiones sociales, seguido de las cuestiones físicas y económicas. Sin embargo, ningún artículo se dedica de forma explícita a la exploración de los efectos sociales y ambientales generados a partir de la implementación de PSA.

Por otro lado se observa el uso de la información hidroclimatológica en los estudios de PSAH de INE (2005), Manson (2007), Almeida *et al.* (2007), Peñuela (2007), Jujnovsky *et al.* (2010, 2012), Vigerstol y Aukema (2011), Perevochtchikova y Vázquez (2012). En particular, en el informe del

INE (2005) se realizó el primer ejercicio del análisis del funcionamiento hidrogeológico del esquema de PSAH en cuatro sitios del Distrito Federal y dos en el estado de Puebla, ampliado posteriormente en el análisis de Peñuela (2007). Por su parte Manson (2007) buscó determinar los efectos hidrológicos del uso de suelo mediante la obtención de datos hidrogeológicos de campo en dos zonas de México. Jujnovsky *et al.* (2010), continuando con el trabajo de Almeida *et al.* (2007), realizaron una evaluación de la calidad y la cantidad de agua en la cuenca del río Magdalena, México, vistos como servicios ecosistémicos hidrológicos. En particular, se evaluó la calidad del agua en dos ciclos anuales basada en indicadores fisicoquímicos y bacteriológicos, demostrando un cambio significativo en la transición entre la zona forestal y la urbana. Jujnovsky *et al.* (2012) presentaron resultados de una investigación sobre la misma cuenca donde evaluaron el servicio del suministro de agua mediante la determinación del balance hídrico con el uso del modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), y también del número de beneficiarios de los SE.

Perevochtchikova y Vázquez (2012) por su parte, discutieron la posibilidad de considerar el programa federal de PSAH como instrumento alternativo de la política pública ambiental desde la perspectiva de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos, bajo la revisión de los antecedentes del estudio de funcionamiento hidrogeológico de la zona de estudio. En este análisis se detecta la necesidad de la organización metodológica y el análisis de datos hidroclimatológicos con el fin de poder evaluar los efectos ambientales que produce el programa de PSAH.

De esta forma se observa que todos los trabajos mencionados aunque se enfocan en mostrar o cuantificar los SE Hidrológicos con el uso de la información hidroclimatológica, no todos están relacionados con la evaluación de los efectos del programa de PSAH. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo se concentró en presentar un análisis de la información hidroclimatológica que pueda servir para la evaluación del programa de PSAH, aplicándolo al caso de estudio de una comunidad forestal mexicana.

Materiales y métodos

Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a los Bienes Comunales (en adelante la comunidad) de San Miguel y Santo Tomás Ajusco que se encuentra ubicada al suroeste del Distrito Federal (DF), la capital mexicana, que se caracteriza por un crecimiento poblacional constante y una expansión urbana sobre su zona periférica (Pérez *et al.*, 2011). Geográficamente, forma parte del límite suroeste de la Cuenca de México (formación hidrográficamente cerrada), a la altura de 3200-3900 msnm (Fig. 1). El territorio de la comunidad se encuentra enmarcado en el Suelo de Conservación (SC) del DF, que posee altos índices de biodiversidad y contribuye al mantenimiento de la calidad de vida de los habitantes de la ciudad, ya que su existencia perpetúa procesos y funciones ecológicas que dan sustento a diversos SE (GDF, 2001; PAOT, 2007, 2012). Por otro lado, el 90% del SC está bajo el

régimen de propiedad comunal (comunidades y ejidos), con una diversidad de problemáticas socioeconómicas, históricas y culturales, que se presentan en el contexto de una fuerte presión de crecimiento urbano.

El cambio de uso de suelo en el DF ha llegado a un promedio de 239 ha al año, principalmente debido a la deforestación para el uso urbano y agrícola (Aguilar y Santos, 2011). En este contexto, se han implementado múltiples instrumentos de política pública ambiental, social y urbana en este territorio, proveniente de tres ámbitos de gobierno: federal, estatal y delegacional (Pérez *et al.*, 2011). Uno de ellos es el programa de PSAH de la CONAFOR, aplicado en el SC por su alta importancia hídrica en relación a la captación del agua subterránea, recurso que contribuye con un 70% del suministro de agua potable a la ciudad (Escolero *et al.*, 2009).

La comunidad de San Miguel y Santo Tomás Ajusco (denominada por su antecedente prehispánico como Pueblo Originario) cuenta con 7619

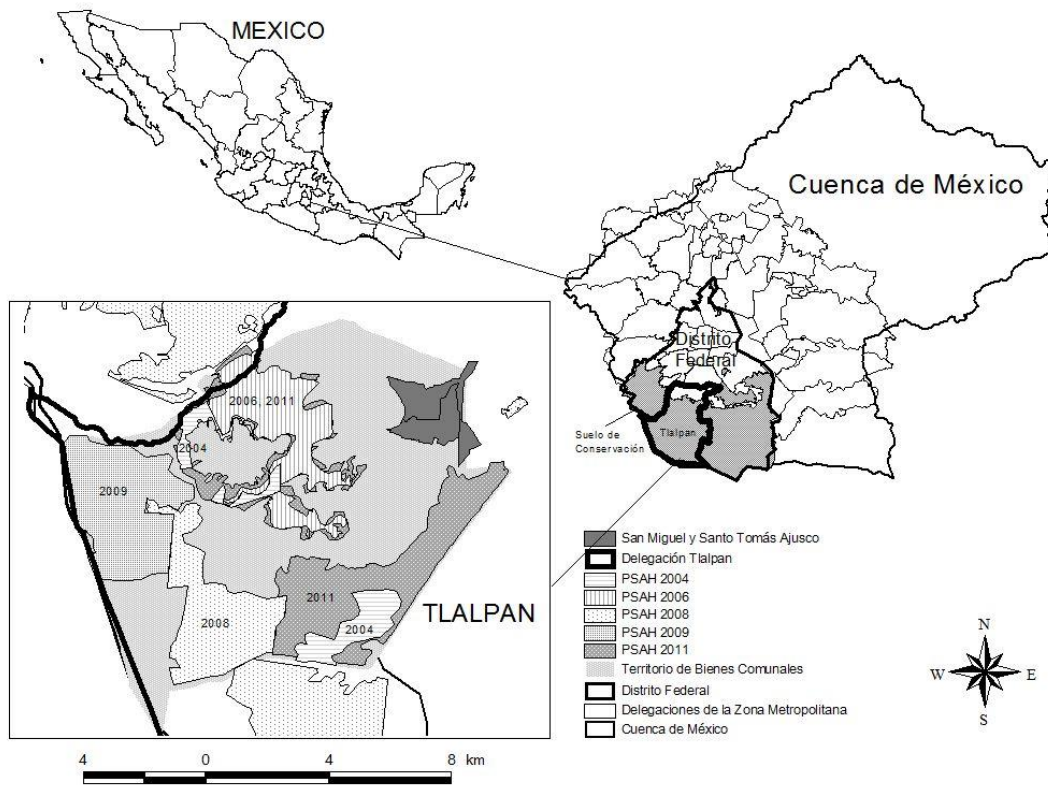


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio (Fuente: con base en los datos del PSAH proporcionados por la Comisión Nacional Forestal).

ha y 604 comuneros reconocidos por el Registro Agrario Nacional. Posee un 45% de la cobertura forestal en su territorio, correspondiente al bosque compuesto en su mayor parte por pino, encino y oyamel, y otros usos de tierra: agrícola (15%), pastizal (20%), urbano (15%) y bosque mixto (5%). La comunidad que se rige por las decisiones de la Asamblea General se ha incorporado al PSAH federal desde 2004 a 2011, incrementando gradualmente la superficie apoyada (Fig. 1), y llegando a ocupar para este fin cerca de 5000 ha (Sandoval y Gutiérrez, 2012).

Adicionalmente, la comunidad ha sido seleccionada para la aplicación del primer esquema en el DF financiado por el programa de Fondos Concurrentes, firmado entre la CONAFOR y los Ingenieros Civiles Asociados (ICA) en 2012, con el monto más alto del país (1600 pesos por hectárea al año, equivalente a 100 dólares USD), donde se incorporaron otras 220 ha. Este esquema supone una aportación conjunta y equitativa de montos por parte de la CONAFOR y el ICA para poder aumentar el pago por SE y ser más atractivo para los propietarios del bosque; además de poder realizar el monitoreo, en este caso de hongos (propuesto por la Universidad Nacional Autónoma de México) sin ningún otro compromiso social o ambiental asumido.

Para cumplir con lo establecido en las Reglas de Operación del PSAH, la comunidad ha realizado varias actividades de manejo forestal, como chaponeo, cajeteo, brechas contra-fuego, reforestación y recolección de basura, establecidas en el Programa de Mejores Prácticas de Manejo (PMPM) que exige la CONAFOR desde 2008 para todos los participantes (www.conafor.gob.mx). Sin embargo, aún es necesario evaluar el potencial territorial para ser aplicado y el efecto ambiental que ha producido el programa, para poder reflexionar acerca de cumplimiento de su objetivo de la conservación ambiental.

Metodología

Para llegar al objetivo propuesto se realizó el análisis de datos hidroclimatológicos, combinando el trabajo de gabinete y de campo. En primera instancia se llevó a cabo la recopilación y el análisis documental a escala regional (Delegación Tlalpan), igual que revisión de bases de datos y estadísticas

publicadas por los organizamos responsables en materia de clima y agua en México. Por su parte en campo se realizó el monitoreo hidroclimatológico con el fin de obtener datos a escala local (la comunidad de San Miguel y Santo Tomás Ajusco).

Para la información a escala regional se recurrió al apoyo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), donde fueron solicitados y en respuesta obtenidos, los datos de las estaciones climatológicas a cargo del SMN (precipitación y temperatura promedio diarias) y de la cantidad del agua (caudal promedio diario) de las estaciones hidrométricas de la CONAGUA, previamente detectadas para la zona de estudio.

Así dentro de la Delegación Tlalpan y en su cercanía se detectaron 17 estaciones climatológicas del SMN, de las cuales se consideraron sólo cinco, teniendo en cuenta la ubicación en un radio no mayor a 5 km, el periodo de observación mayor a 15 años y la continuidad de los datos. Dichas estaciones fueron: El Calvario 61, Desviación Alta al Pedregal, El Guarda, San Francisco Tlalnepantla y Campamento los Berros (Fig. 2 y Tabla 1). A partir de los datos de lluvias máximas anuales con duración de 24 horas registradas en cada una de las estaciones climatológicas, se construyeron las isoyetas en el Sistema de Información Geográfica ArcGIS 10.1. Estos datos se acompañaron con la información topográfica y de cubierta forestal para poder determinar su distribución espacial.

En relación a las estaciones hidrométricas de la CONAGUA se ubicaron: La Agraria, Rancho de Castro, La Conchita y Santa Teresa, aunque todas dentro de la micro-cuenca del río Magdalena, fuera de la zona de estudio (Fig. 2 y Tabla 2). Para el análisis hidrométrico se recurrió a la recopilación y actualización de coberturas y bases de datos de PAOT (2012), INEGI (2008, 2015), CONABIO (2015), CONAFOR (2015) para la construcción de un mapa de síntesis de información.

Para datos a escala local se instaló una estación climatológica WatchDog, 2000 en la estación de vigilancia contra incendios "Cruz de Murillo" de la Comisión de Recursos Naturales del DF (CORENA), ubicada en la parte más alta del terreno donde prevalecen las condiciones naturales. La estación mide cada hora y acumula en forma automática los siguientes datos: radiación solar,

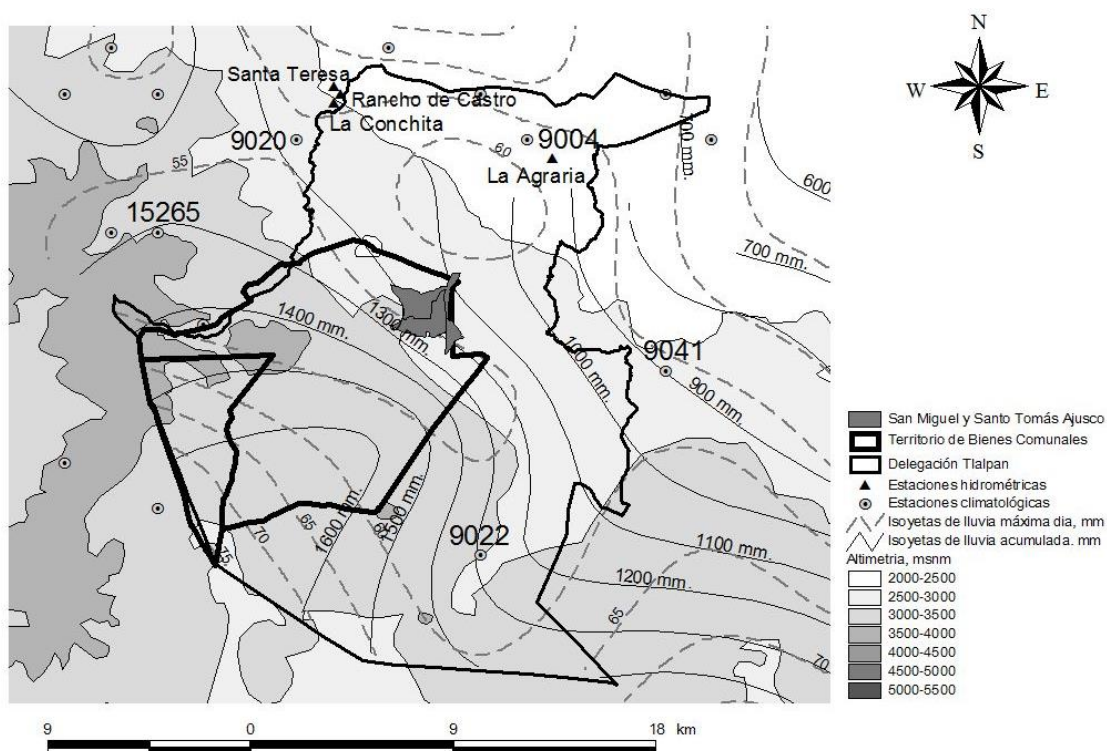


Figura 2. Ubicación de las estaciones climatológicas e hidrométricas.

Tabla 1. Las estaciones climatológicas (Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional).

| Nº | Número de estación, SMN | Nombre de la estación | Delegación/ Municipio | Altura, msnm | Periodo de observación |
|----|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------|-----------------------------|
| 1 | 9004 | El Calvario 61 | Tlalpan | 2726 | enero 1970 – mayo 2014 |
| 2 | 9020 | Desviación Alta al Pedregal | Tlalpan | 2296 | enero 1952 – noviembre 2014 |
| 3 | 9022 | El Guarda | Tlalpan | 2990 | enero 1961 – junio 2014 |
| 4 | 9041 | San Francisco Tlalnepantla | Xochimilco | 2620 | enero 1961 – octubre 2013 |
| 5 | 15265 | Campamento Los Berros | Villa de Allende | 3254 | enero 1981 – agosto 2010 |

Tabla 2. Las estaciones hidrométricas de la zona de estudio (Fuente: elaboración propia con base en los datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua).

| Nº | Número de estación, CONAGUA | Nombre de la estación | Periodo de observación | Con falta de observaciones | Años con ausencia completa de datos |
|----|-----------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 26308 | Rancho de Castro | 1962-1987 | sin dato | sin dato |
| 2 | 26514 | La Agraria | 1986-2011 | 1991, 1993 | 1992, 1996, 1998, 2000 |
| 3 | 26438 | La Conchita | 1976-1988 | 1992, 1996, 1999-2002 | 1984 |
| 4 | 26440 | Santa Teresa | 1973-2011 | | 1988, 2005 |

humedad relativa, temperatura, precipitación, dirección del viento, velocidad del viento y punto de rocío.

Para el diseño de actividades del monitoreo del flujo y calidad del agua a escala local se tomó de referencia los trabajos de Morales *et al.* (2000), Escolero *et al.* (2005), INE (2005), Peñuela (2007) y Manson (2007). En específico, se realizó la medición del caudal y la determinación de parámetros físico-químicos in situ, y la toma de muestras para determinaciones en laboratorio en dos periodos (época seca y húmeda). Para la selección de los sitios se hizo un primer recorrido de campo y se georreferenciaron 60 puntos usando el Sistema de Información Geográfica ArcView 3.2. De estos 60 puntos se seleccionaron 13 sitios ubicados en manantiales descritos por la comunidad como permanentes (Fig. 3), para mediciones de caudal y determinaciones físico-químicas del agua. En estos

sitios se colectaron 20 muestras, 7 en el mes de abril y 13 en el mes de agosto del año 2013, las cuales fueron analizadas en el laboratorio de la Edafología Ambiental del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

In situ se midieron: el potencial de Hidrógeno (pH), los Sólidos Totales Disueltos (STD), la conductividad eléctrica, la temperatura del agua, y el caudal usando técnicas manuales. Para el laboratorio, se colectaron muestras de agua en botellas de 60 ml, y se determinaron cationes: calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) y potasio (K); y aniones: sulfuro (SO₄), cloro (Cl), carbonato (CO₃), bicarbonato (HCO₃), en mg/l. Los datos obtenidos se representaron en diagramas de Piper (1953) usando el modelador ambiental AquaChem 3.70 que permite la representación de la química del agua, donde los cationes y los aniones se muestran en planos separados, de los ápices (o vértices). Los dos

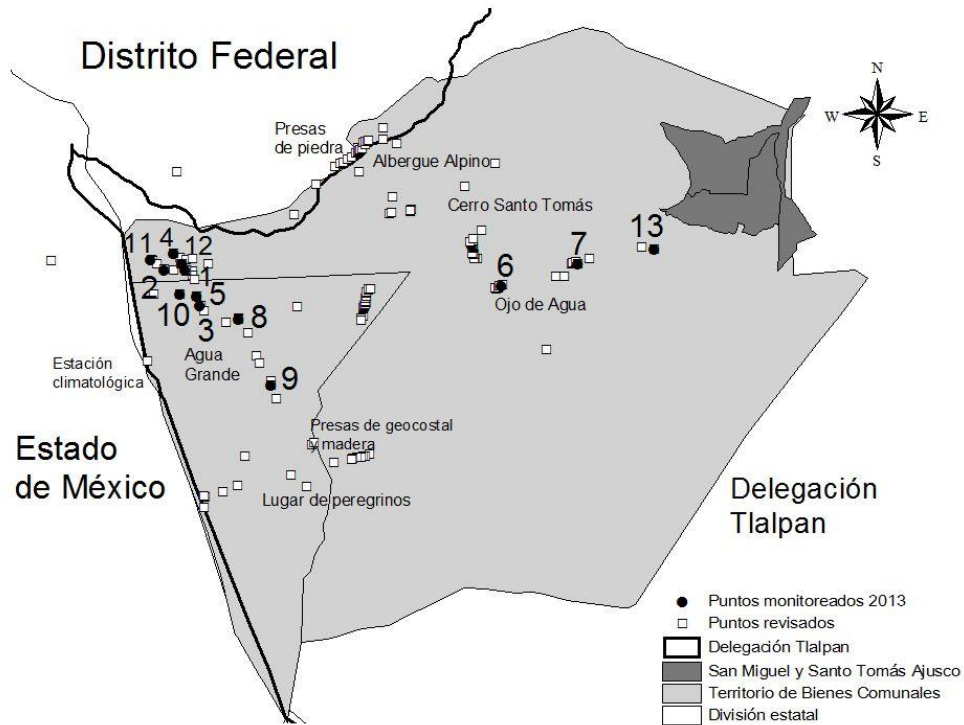


Figura 3. Ubicación de los puntos revisados en trabajo de campo y determinados para el monitoreo físico-químico.

planos triangulares se proyectan dentro de un plano de diamante, que es una matriz de transformación de aniones (sulfato y cloro/ total de aniones) y cationes (sodio y potasio/ total de aniones) (Rao, 1998).

Resultados y discusión

Información a escala regional

Datos climatológicos. Por los datos de la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal (PAOT, 2012) el clima de la zona se describe como semifrío, subhúmedo Cb(w2)(w), con verano fresco, la precipitación promedio anual de 1401-1676 mm y

coeficiente de escurrimiento superficial mayor a 55 mm, con época húmeda ubicada entre mayo y septiembre y la temperatura de 9-10°C. Estas características se explican por la situación geográfica del sitio, con relieve de pendientes pronunciadas en laderas montañosas y altitud mayor a 3000 msnm.

Los datos de las estaciones climatológicas con base en la información proporcionada por el SMN (Fig. 2, Tabla 1), fueron transformados de formato TXT a EXCEL, y procesados para analizar las tendencias a largo plazo y de distribución anual. El análisis arroja una temperatura promedio anual de 9.4°C. En la figura 4 se representan los datos de precipitación Para el ejemplo de la estación El Calvario 61. Estos

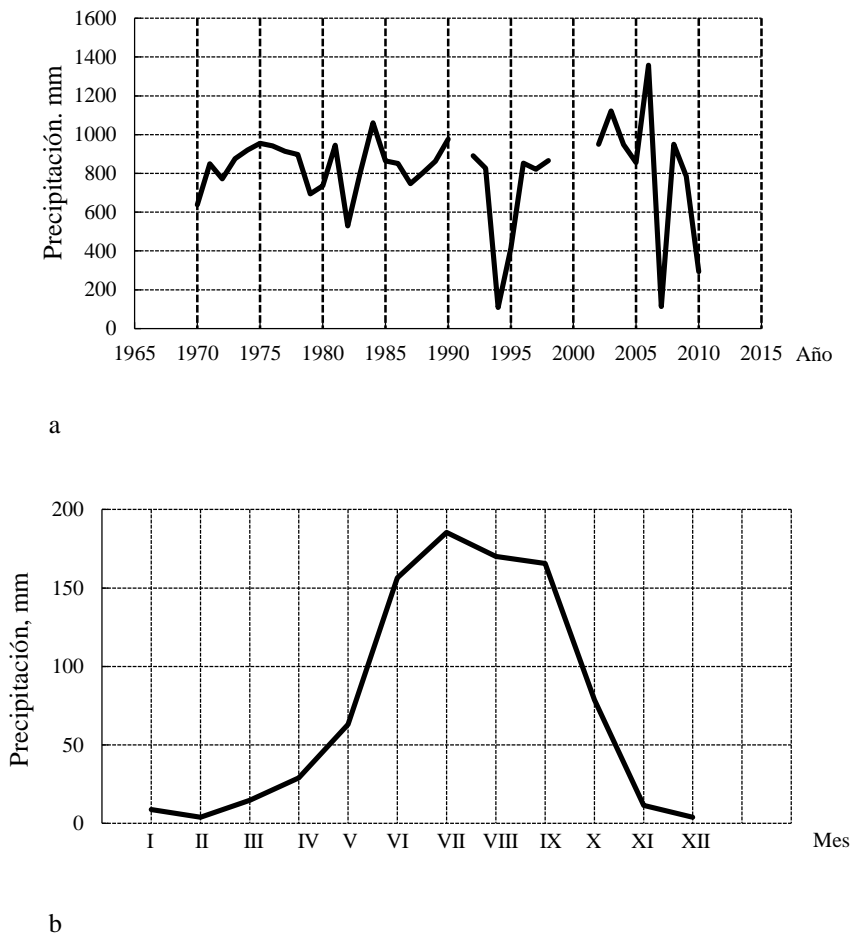


Figura 4. Datos de precipitación de la estación El Calvario, 1970-2010: a) media anual y b) medio mensual (Fuente: con base en datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional).

datos indican una precipitación promedia anual de 1200 mm, la cual se ha mantenido casi constante durante los últimos 40 años en su tendencia central (con diferencias anuales que van de 200 a 1400 mm), y la presencia de dos épocas marcadas al año: húmeda (entre mayo y octubre) y seca (entre noviembre y abril).

Es importante comentar que con la construcción de isoyetas se puede observar la variabilidad espacial de datos climatológicos, como lo sugieren Ceballos (s/f) y Jacobs (2004). En particular, los valores de lluvia máxima en la Delegación Tlalpan obtienen registros más bajos en la parte norte (su parte urbana), aumentando hacia el sur hasta 60-80mm al día (en el Suelo de Conservación). Lo que corresponde con el carácter topográfico del terreno, donde valores altos se ubican sobre espacios de mayor altitud y cubierta vegetal, de forma igual como lo demuestran las isoyetas de lluvia anual acumulada presentadas en la figura 2. Detectando así la influencia directa de las estaciones 9022 y 15265 en la composición y representividad espacial de la red de monitoreo climatológico actual (Gebremichael *et al.*, 2005).

Datos hidrológicos. La zona de estudio se ubica en la Región Hidrológica Administrativa (RHA) XIII Aguas del Valle de México, y pertenece a las Regiones Hidrológicas (RH) 18 Río Balsas y 26 Río Pánuco (CONAGUA, 2011); y forma parte de la cuenca del Río Grande de Amacuzca, y de la micro-cuenca de Tres Marías y Santiago (PAOT, 2012). La red hidrográfica está conformada por arroyos de carácter intermitente que recorren trayectos cortos por la permeabilidad alta de la roca volcánica de la zona. Actualmente, existen dos ríos San Buenaventura y San Juan de Dios, que fueron caudalosos en otros tiempos pero actualmente son temporales. También se encuentra el río Eslava que es intermitente y pasa por el límite de las delegaciones Tlalpan y Magdalena Contreras.

Con los datos obtenidos de las estaciones hidrométricas (Fig. 2, Tabla 2) se realizaron gráficas históricas para valores de caudal medio anual y medio mensual para todas las estaciones. En la figura 5 se presentan como ejemplo los datos para la estación La Conchita, donde se observa tendencia general a la disminución drástica de los caudales,

que puede ser atribuido a la captación del flujo del río Magdalena y sus afluentes para el abastecimiento del área urbana del DF. Asimismo se observan dos épocas marcadas en el año: seca (de noviembre a abril) y húmeda (de mayo a octubre), que tiene una correlación directa con los datos climatológicos regionales. Sin embargo, esta situación no refleja la realidad de la zona de estudio por ubicarse en otra micro-cuenca, por lo que se requeriría la implementación de un monitoreo local, de preferencia de manera continua.

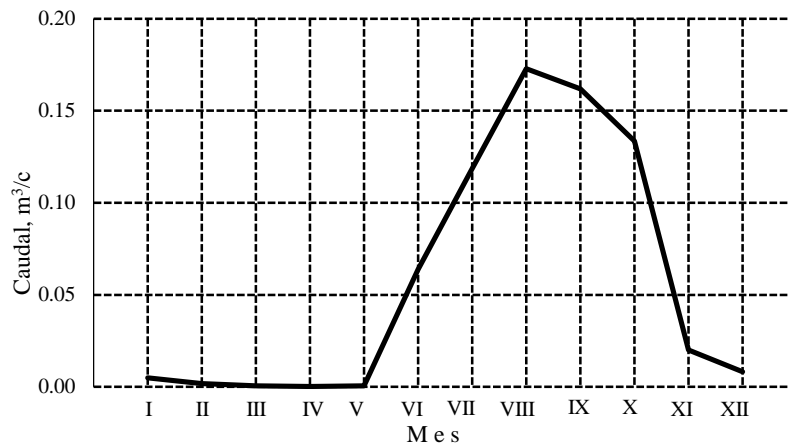
Según datos de la PAOT (2012) la infiltración se estima entre 10-15 mm/día y el escurrimiento superficial entre 300-400 mm/año en la mitad del territorio y entre 400-500 mm/año en el área restante. Asimismo, la erosión hídrica se estima entre 12-50 ton ha⁻¹ año⁻¹ en un 50% del territorio (grado considerado como “erosión ligera”) y menor a 12 ton ha⁻¹ año⁻¹ en el resto del área, donde se considera que la erosión es mínima; la erosión eólica por su parte se calcula menor a 12 ton ha⁻¹ año⁻¹. Lo que puede relacionarse con las restricciones del uso de suelo en el Suelo de Conservación, donde existe cobertura forestal, y se ubican Áreas Naturales Protegidas, como por ejemplo el Parque Nacional Cumbres de Ajusco y la Reserva Comunitaria de San Miguel Ajusco (PAOT, 2012).

En la figura 6 se presenta una síntesis de información hidrométrica, con el fin de determinar las interrelaciones entre la ubicación de las zonas receptoras de PSAH, la cobertura boscosa, la infiltración del agua y el coeficiente de escurrimiento superficial (PAOT, 2012; INEGI, 2008, 2015; CONABIO, 2015; CONAFOR, 2015). Sobre todo los últimos datos nos permiten indicar las posibles rutas de flujo en caso de existir reciclaje de lluvia dentro de la cuenca (Savenije *et al.*, 1995). En particular se resalta la dinámica relacionada con el bajo coeficiente de escurrimiento superficial, vinculado al alto grado de infiltración del agua por la roca volcánica, asociado a la cubierta forestal de pino-encino y oyamel (con bajos valores de evapotranspiración). Es interesante observar que no todas las zonas de PSAH poseen alto o medio grado de infiltración del agua, aun cuando presentan una cobertura vegetal importante y escurrimiento superficial más elevado.

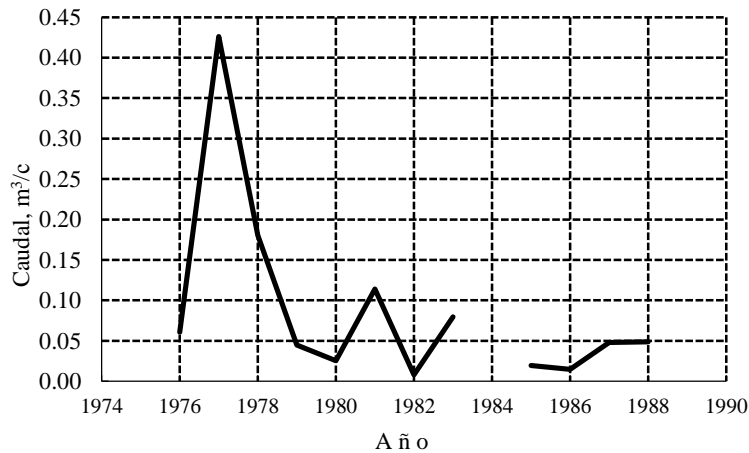
En relación a la calidad del agua se obtuvieron datos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Totales Disueltos (STD) correspondientes a dos sitios (número 5 y 11) de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua, ubicados en otra delegación. Los datos indican agua de calidad buena

y excelente respectivamente por la clasificación de la CONAGUA (2011). Sin embargo, no hay información disponible a escala local, por lo que este vacío se reparó con la realización de un amplio trabajo de campo.

Información a escala local



a



b

Figura 5. Datos del caudal de la estación La Conchita, 1976-1988: a) media anual y b) media mensual (Fuente: con base en datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua).

Datos climatológicos. Los datos climatológicos a escala local fueron obtenidos de la estación climatológica WatchDog, 2000, instalada en 2012. En la fig. 7 se presentan las tendencias temporales para precipitación, radiación solar y humedad relativa de acuerdo a datos disponibles dentro del

solar es de 182 W m^{-2} , la humedad relativa de 81% y la precipitación acumulada de 1312 mm (semejante al dato regional).

Datos hidrológicos.

Para el análisis de los datos hidrológicos se

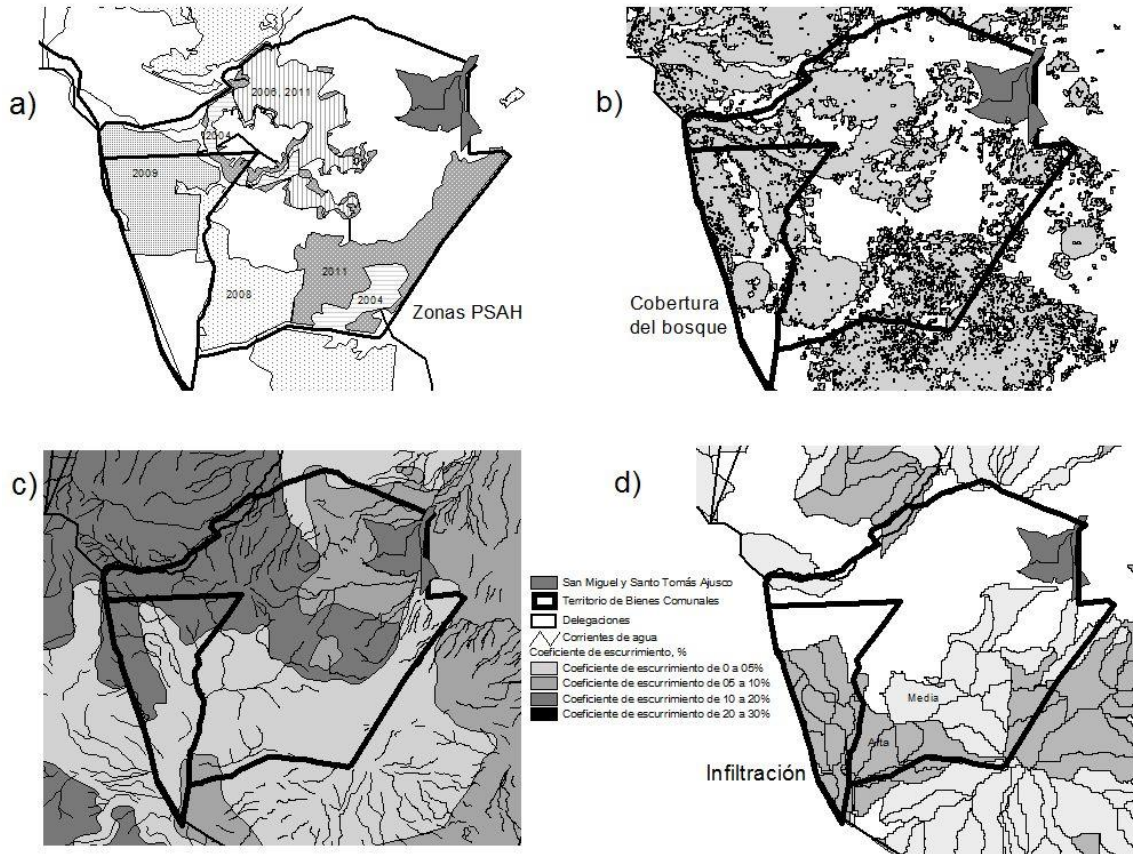


Figura 6. La síntesis de información hidrométrica: a) Ubicación de las zonas receptoras de PSAH, b) Cobertura boscosa, c) Coeficiente de escurrimiento superficial, d) Infiltración del agua (Fuente: con base en PAOT 2012; INEGI 2008 2015; CONABIO 2015; CONAFOR 2015).

periodo de mayo 2012 a 2014. En particular, se observan dos épocas marcadas del año: húmeda (de mayo a noviembre) y seca (de diciembre a abril), lo que corresponde con los datos regionales medio mensuales, con diferencia en un mes de retraso en las lluvias. La temperatura promedio anual muestra el valor de 7.4°C , que corresponde a un valor inferior a la temperatura regional, la radicación

compararon las observaciones realizadas en campo durante los años 2012 y 2013 en los 13 puntos seleccionados (Fig. 3). Con base en los resultados de la medición del caudal (Tabla 3), se observa una disminución del flujo desde octubre de 2012 a abril de 2013, seguido del aumento en el mes de agosto debido a las lluvias, y posteriormente el secado de ocho manantiales durante diciembre de 2013. Esto

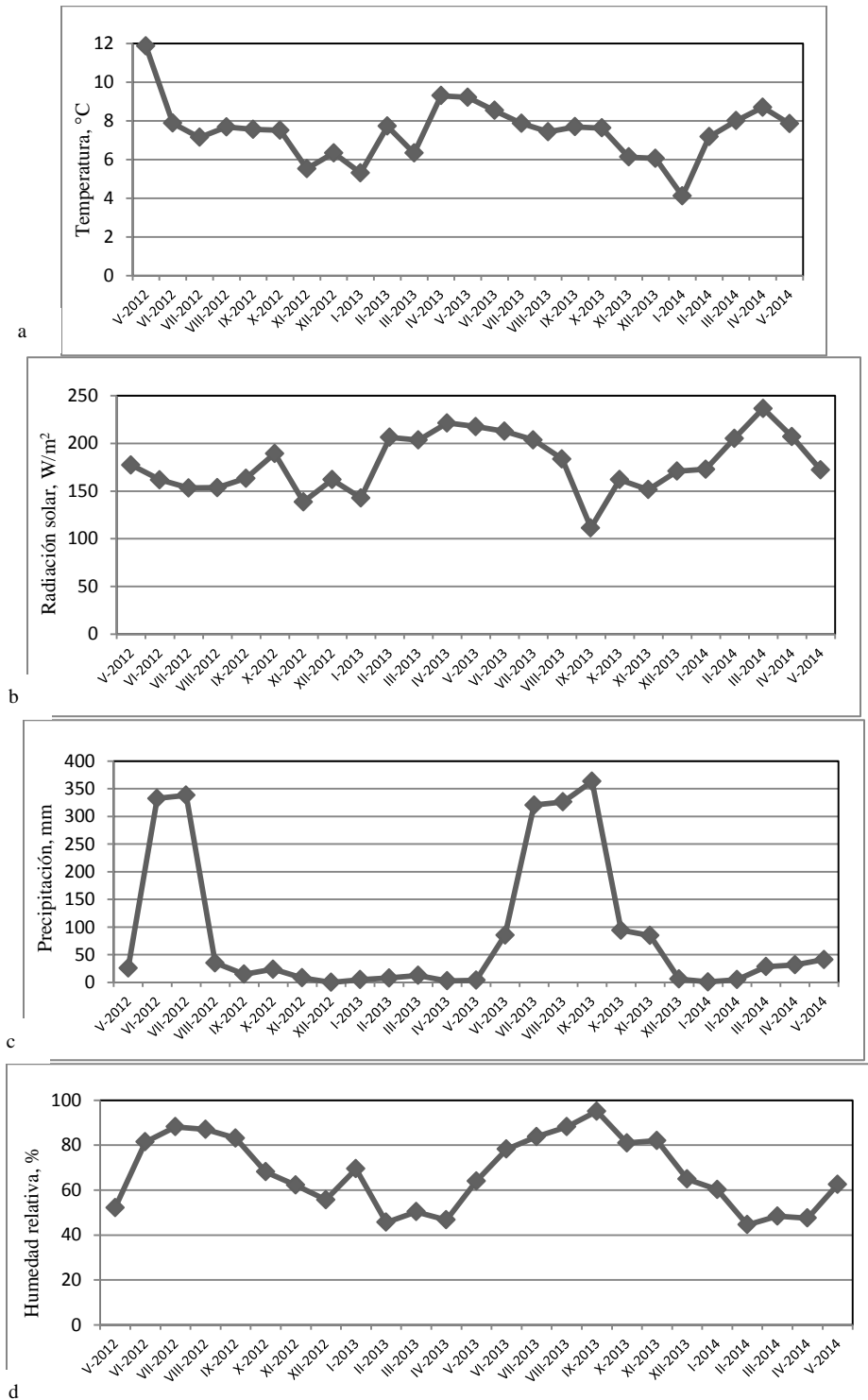


Figura 7. Características climatológicas medias mensuales locales: a) Temperatura, b) Radiación solar, c) Precipitación, d) Humedad relativa.

demuestra el carácter intermitente de varios de los cuerpos de agua en la zona de estudio, no solamente por las condiciones de alta permeabilidad del terreno (PAOT, 2012), sino también por el comportamiento climático y las actividades antropogénicas, tal como ocurre en los sitios 1, 5, 6 y 13.

En relación a la calidad del agua se han determinado in situ las siguientes características físico-químicas. El potencial de hidrógeno (pH) entre 6.25-6.97 (ligeramente ácido) en el mes de abril, baja levemente a 6.09-6.72 en agosto y vuelve a crecer a 6.1-7.13 en el mes de diciembre, siendo el promedio para los tres muestreos de 6.52. La temperatura del agua presentó variaciones de 11.3-17.1°C en el mes de abril, a entre 11.0-18.5°C en agosto, y de 9.7-12.1°C en el mes diciembre. Los Sólidos Totales Disueltos (STD) se determinaron entre 30-170 mg l⁻¹ en el mes de abril, entre 25-70 mg l⁻¹ en agosto, y entre 20-30 mg l⁻¹ en diciembre, en tanto la conductividad presentó valores entre 45-260 en el mes de abril, de entre 40-100 en agosto, y entre 35-50 en diciembre. Esto indica que los flujos son de carácter local, correspondiente con la clasificación de Toth (2000), y que se encuentran dentro de las normas mexicanas establecidas para agua potable (CONAGUA, 2012).

Las determinaciones físico-químicas de los muestreos realizados en los meses de abril y agosto indican que los sitios 2 y 12 corresponden a lugares de nacimiento de agua (con alta presencia de Ca y HCO₃) y sus características son las más representativas para el tipo de flujo local, en tanto el sitio 6 indica un flujo de mayor recorrido (Morales *et al.*, 2000; Manson, 2007). Los sitios 1 y 5 presentan mayores concentraciones de sales, en particular Mg y Cl en virtud de su ubicación; donde el sitio 1 corresponde a un pequeño embalse donde se capta el agua para la comunidad, lo que propicia una mayor evaporación y por tanto concentración de sales y el sitio 5 está próximo a un punto donde los pobladores suelen arrojar basura y desechos de comida (Fig. 8, 9, 10).

Así, en los sitios identificados como nacimiento de agua, ubicados en su mayoría en el lugar conocido como Agua Grande, el agua resulta de buena calidad, con parámetros físico-químicos dentro de la Norma Mexicana establecida para agua potable (CONAGUA, 2012). En el mes de diciembre hay una reducción en el flujo de agua coincidente con la época seca, que posteriormente se refleja en el sitio

de captación con una mayor concentración de sales detectada en el muestreo de abril. Sin embargo, la ubicación de los 13 sitios muestreados no refleja específicamente las dinámicas locales en respuesta a las actividades realizadas en diferentes lugares de la comunidad dentro de los requerimientos de PMPM. Esto pone en reto el análisis de la influencia directa de estas prácticas de manejo en el mantenimiento del ciclo hídrico, sobre todo considerando la desaparición de los manantiales identificados anteriormente como perennes. En términos de mantenimiento de la calidad del agua, sólo resaltan los sitios más vulnerables al deterioro de la calidad del agua por actividades antropogénicas, tal como el sitio 5. Esto hace pensar que se requiere de un análisis más detallado, con aplicación de técnicas hidrogeológicas más sofisticadas, como la perforación de pozos piloto para observar el nivel del agua subterránea y la medición de su calidad en forma continua, cerca de las áreas donde se realizan dichas actividades.

Discusión

Las funciones ecológicas que determinan la existencia y continuidad de los SE forestales, sobre todo hídricos, en los que se basa el programa de PSAH, dependen indudablemente del contexto local de cada sitio. Esto es dado las condiciones naturales, como el relieve, el suelo, el clima, la hidrografía, la biodiversidad, etc. y sus transformaciones antropogénicas, que se reflejan en forma directa en el cambio de las características hidroclimatológicas. Por lo cual éstas podrían utilizarse como indicadores para la evaluación de los efectos ambientales del PSAH y sus actividades de conservación exigidas.

Al respecto es importante comentar que algunos autores han empezado a considerar la influencia del cambio del uso de suelo en los SE hidrológicos, como por ejemplo Sanders *et al.* (2013) con la evaluación integral de los SE, Almeida *et al.* (2007), Jujnovsky *et al.* (2010) con sus estudios en la cuenca del río Magdalena, Manson (2007) con el análisis hidrogeológico aplicado a dos casos de estudio en Veracruz y Distrito Federal, y Peñuela (2007) con el estudio de dos sitios en la cuenca de México. Resaltando en el último trabajo, la utilidad de la teoría de flujos (Toth 2000) para este tipo de análisis, como la caracterización de los flujos de agua subterránea y su interrelación con diversas

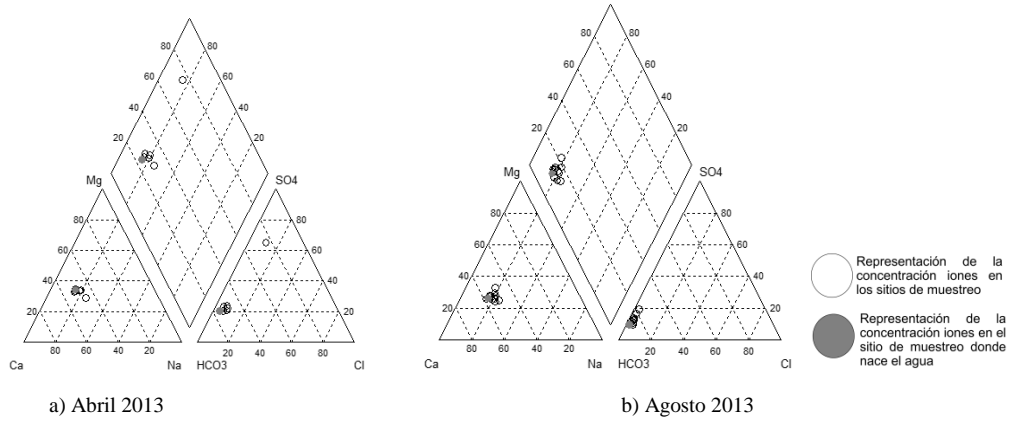


Figura 8. Clasificación físico-química del agua de los sitios del muestreo: a) abril y b) agosto de 2013.

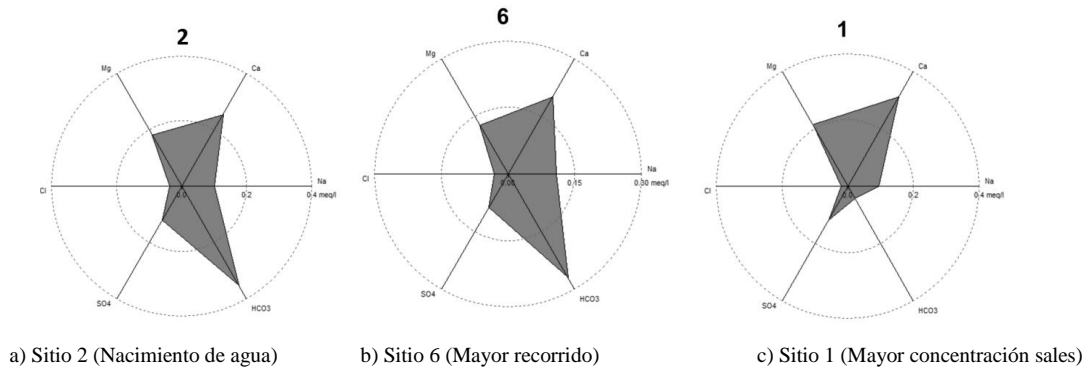


Figura 9. Caracterización iónica de las muestras de agua, abril 2013.

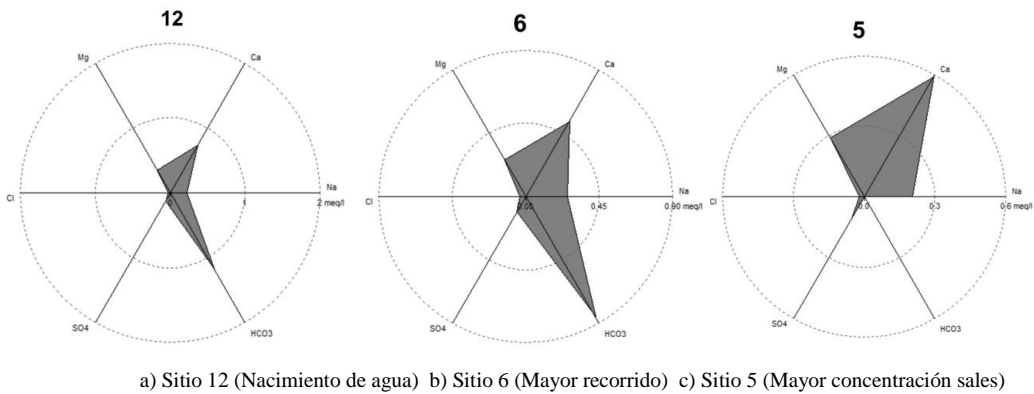


Figura 10. Caracterización iónica de las muestras de agua, agosto 2013.

características superficiales y subterráneas (geología, geomorfología, vegetación, uso de suelo). Por otro lado, el trabajo de Niemela (2012) reúne las experiencias internacionales acerca del estudio de los SE considerados desde el enfoque de sistemas complejos, aplicados a espacios urbanos (sistemas socio-económicos), así como peri-urbanos (socio-ecológicos). Este trabajo trata la estrecha relación de los SE con el cambio de uso de suelo, resaltando el impacto ambiental provocado por la expansión urbana, y la modificación de la frontera agrícola y ganadera, entre otros. Este proceso es notorio en territorios periféricos de grandes ciudades por la pérdida de los recursos naturales y consecuentemente de los SE, vinculados al cambio de las características hidroclimáticas, como temperatura, evapotranspiración, infiltración del agua en el suelo y escurrimiento superficial.

Complementariamente, Chang (2006) describe diversas relaciones que tiene el bosque con las características hidroclimáticas analizadas desde el enfoque espacial de cuenca hidrográfica, tal como la disminución de la temperatura dentro del bosque, el incremento de la precipitación, el mantenimiento de la evapotranspiración, el control del escurrimiento superficial, la reducción de la sedimentación, el control de las inundaciones, el incremento del hábitat, la conservación de las características físico-químicas del suelo. Pero también este autor hace referencia a ciertas variaciones que se presentan en diferentes contextos geográficos, aunque siempre con un efecto positivo en la conservación de los SE hidrológicos relacionados con el mantenimiento de la cobertura forestal original.

A esto se suma el trabajo de Postel y Thompson (2005) sobre la interacción de la cubierta forestal con una mayor efectividad en el control de inundaciones y la purificación del agua, donde la vegetación y el suelo determinan la capacidad de infiltración del agua, la captación de sedimentos y el control del escurrimiento superficial.

En este sentido el aporte central del trabajo realizado, en comparación con otras publicaciones, consiste en el primer intento exploratorio de sistematización y análisis de datos hidroclimáticos a escala regional y local para un estudio de caso, con el fin de detectar la información existente y faltante para evaluar los efectos ambientales del PSAH y proponer mejoras para el monitoreo hidroclimático.

Conclusiones

En relación a la vinculación de las características hidroclimáticas observadas y la idea de la preservación de uso del suelo forestal al que apunta el programa federal de PSAH, se concluye lo siguiente:

La precipitación está vinculada a los factores de la localización geográfica del sitio, su topografía y también al uso de suelo (en particular a la conservación de la vegetación natural). En el caso de estudio se relaciona con la ubicación en una zona montañosa, con alto porcentaje de cubierta forestal (hasta 45%), donde se presentan altos valores de precipitación e infiltración, por lo que la zona posee un alto potencial para ofrecer SE hidrológicos, sobre todo de aporte a la recarga de agua subterránea. El análisis del uso del suelo antes de la implementación del programa, durante y después (cuando un sitio deja de recibir el apoyo), sería un importante reto y necesidad para la investigación en esta línea.

El escurrimiento superficial depende de las características físicas del territorio, como topografía, geología, edafología, cubierta vegetal, y es susceptible al cambio de uso de suelo. Representando en la zona de Ajusco valores muy bajos naturalmente por las características locales principalmente vinculados a altos índices de infiltración por la geología referida a la composición de roca volcánica, y el regreso de una parte de precipitación por procesos de evapotranspiración (como reciclaje de flujo superficial). Además asociado a las dinámicas antropogénicas preocupantes de la desaparición de manantiales por la captura del flujo en tinajas impermeables para fines de abastecimiento de la comunidad.

La calidad del agua está influenciada directamente por el uso de suelo. En general el agua en los manantiales de la zona de estudio es de calidad potable dentro del bosque, donde no se presenta la actividad antropogénica. Pero presenta valores mayores de salinidad cerca de la zona urbanizada y sitios de disposición de basura, en virtud de la contaminación adquirida.

El programa de PSAH en su planteamiento tiene incidencia directa en el uso de suelo por las diversas actividades que requiere el PMPM y que deben desarrollar las comunidades en el bosque. Sería de gran interés poder evaluar el efecto ambiental local,

por ejemplo de la construcción de brechas contrafuego, cavación de tinas ciegas o reforestación puntual y su influencia en la capacidad de la infiltración del agua, etc., para lo cual se requeriría el programa de observación más específico a mediano o largo plazo.

Lo expuesto anteriormente determina la necesidad de establecer esquemas de monitoreo continuo, de preferencia con la participación de la comunidad, complementándolo con estudios de biodiversidad, efectos sociales y uso del suelo para obtener la información necesaria para un análisis integrado de los efectos del PSAH, e incluso de los sitios y trabajos requeridos por el PMPM. En este sentido, se avanzó en 2015 con la capacitación de monitoreo comunitario de la calidad del agua bajo el apoyo metodológico por parte de Global Water Watch (<http://gww-mexico.aes.auburn.edu/>), que actualmente sigue su curso, determinando las características físico-químicas y bacteriológicas del agua en los manantiales permanentes que sirven de fuentes de abastecimiento para la comunidad.

Agradecimientos

Se agradece al CONACYT por el financiamiento del proyecto 155039 de Ciencia Básica y ahora del 260199 de estancia sabática. A la Dra. Lucy Mora por el procesamiento de las muestras y al Dr. Oscar Escolero por los comentarios para su interpretación. Se agradece profundamente a la comunidad de San Miguel y Santo Tomás Ajusco, especialmente a Moisés Reyes Flores, y también a Zenia Saavedra y a Natalia Lukianova por su participación en los muestreos y el primer análisis de datos.

Bibliografía

- Aguilar, A.G., Santos, C. 2011. Asentamientos informales y preservación del medio ambiente en la Ciudad de México. Un dilema para la política de uso del suelo. En: Perez Campuzano, E., Perevochtchikova, M., Ávila Foucat V.S. (coord.), Suelo de Conservación del Distrito Federal ¿hacia una gestión y manejo sustentable? pp. 93-124. IPN, MA Porrúa, México.
- Alix-García, J., de Janvry, A., Sadoulet, E., Torres-Rojo, J.M. 2008. Lessons learned from Mexico's payment for environmental services program. En: Zilberman, D., Stringer, R., Lipper, L., Sakuyama, T. (edit.), *Managing Environmental Services in Agricultural Landscapes*, Springer, USA.
- Almeida, L., Nava, M., Ramos, A., Ordoñez, Ma de J., Ujnovsky, J. 2007. Servicios Ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. *Gaceta Ecológica* 84-85:53-64.
- Ayala, M., Tenthoff, M. 2012. El capitalismo verde: otra cara del mismo modelo. COSPACC, CENSAT, Agua Viva, ISVARA, Colombia.
- Balvanera, P. 2012. Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas* 21(1-2):136-147.
- Balvanera P., Uriarte, M., Almeida-Leñero, L., Altesor, A., De Clerck, F., Gardner, T., Hall, J., Lara, A., Laterra, P., Muñoz-Peña, C., Silva-Matos, D.M., Vogl, A.L., Romero-Duque, L.P., Arreola, L.F., Caro-Borrero, A., Gallego, F., Jain, M., Little, C., de Oliveira Xavier, R., Paruelo, Jo.M., Peinado, J.E., Poorter, L., Ascarrunz, N., Correa, F., Cunha-Santino, M.B., Hernández-Sánchez, A.P., Vallejos, M. 2012. Ecosystem services research in Latin America: The state of the art. *Ecosystem Services* 2:56-70.
- Bishop, J. y Landell-Mills, N. 2003. Los servicios ambientales de los bosques: Información general. En: Piagiola, B., Landell-Mills, N. (coord.), *La venta de servicios ambientales forestales*. SEMARNAT, INE, CONAFOR, México.
- Brooks, K.N., Ffolliott, P.F., Gregersen, H.M., de Bano, L.F. 2003. *Hydrology and the Management of Watersheds*. 3rd edition. Blackwell Publishing, USA.
- Bruschweiler, S., Hoggel, U., Klay, A. 2004. Los bosques y el agua: Interrelaciones y su manejo. *Informes de desarrollo y medio ambiente*. Geographica Bernensia, 19, Berna, Suiza.
- Ceballos, A.B. s/f. Variabilidad espacial de la lluvia en una pequeña Cuenca hidrográfica de la Provincia de Cáceres. Documento en web, pp.24-33.
- Chang, M. 2006. *Forest Hydrology. An Introduction to Water and Forests*. 2nd edition, Taylor & Francis Group, USA.
- CONABIO 2008. *Manglares de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- CONABIO, 2015. Portal de geo-información. Sistema Nacional de Información sobre biodiversidad. Disponible en web: www.conabio.gob.mx/informacion/gis (15 de abril 2015)
- CONAGUA 2011. *Estadísticas del agua en México*, edición 2011. Comisión Nacional del Agua, México.
- CONAGUA 2012. Norma Oficial Mexicana NOM-001-CONAGUA-2011: *Sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario*. Hermeticidad, especificaciones y métodos de prueba. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5234380&fecha=17/02/2012
- CONAFOR 2015. *Base de datos de los sitios receptores de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos en México, 2003-2015*. CONAFOR, México.
- Cordero, D. 2008. Esquemas de pagos por servicios ambientales para la conservación de cuencas hidrográficas en el Ecuador. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 17(1): 54-66.
- Costanza, R., d Arge, R., De Groot, R., Farber S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., Oneill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., Vanden Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253-260.
- Daily, G.C. (ed.) 1997. *Nature's Services. Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, USA.
- De Groot, R.S., Wilson, M.A., Boumans, R.M.J. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41: 393-408.
- Escolero, O., Marín, L. E., Steinich, B., Pacheco, J.A., Molina-Maldonado, A., Anzaldo, M. 2005. Geochemistry of the hydrogeological reserve of Merida, Yucatan, Mexico. *Geofísica Internacional* 44(3):301-314.

- Escolero, O., Martínez, S., Kralisch, S., Perevochtchikova, M. 2009. Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático. ICYTDF, PINCC-UNAM, IGeol-UNAM, COLMEX, México.
- FAO 2012. El estado de los bosques del mundo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, 2012. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/016/i3010s/i3010s.pdf>
- Fisher, B., Turner, R.K., Morling, P. 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics* 68(3):643-653.
- Fregoso, A. 2006. La oferta y el pago de los servicios ambientales hídricos: una comparación de diversos estudios. *Gaceta Ecológica* 78:29-46.
- Garay, J. 2010. Marco Legal Ambiental de los Servicios Ambientales en las Áreas Naturales Protegidas. Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado y el Ministerio del Ambiente del Perú, Perú.
- GDF 2001. Programa General de Ordenamiento Ecológico del DF. CORENA, SMA,- Gobierno del Distrito Federal, México.
- Geist, H., Lambin, E. 2002. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience* 2(52):143-150.
- Gebremichael, M., Krajewski, W.F., Morrissey, M.L., Huffman, G.J. And Adler, R.F. 2005. A Detailed Evaluation of GPCP 1° Daily Rainfall Estimates over the Mississippi River Basin. *American Meteorological Society* 44:665-681.
- Greenwalt, T., McGrath, D., 2009. Protecting the City's Water: Designing a Payment for Ecosystem Services Program. *Natural Resources & Environment* 24(1):1-5.
- Gross-Camp, N., Martin, A., McGuire, S., Kebede, B., Munyarukaza, J. 2012. Payments for ecosystem services in an African protected area: exploring issues of legitimacy, fairness, equity and effectiveness. *Fauna & Flora International*, *Oryx* 46(1):24-33.
- Hughes, R.F., Kauffman, J. B., Jaramillo, V.J. 2000. Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Mexico. *Ecological Applications* (10):515-527.
- 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.
- INEGI 2008. Carta de Aguas Superficiales. Hoja E 14-2, escala 1:250000, INEGI (coberturas digitales).
- INEGI 2013. Estadísticas a propósito del día mundial forestal. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Contenidos/estadisticas/2013/forestal0.pdf>
- INEGI, 2015. Mapa Digital de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en web: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/> (25 de mayo 2015)
- Jacobs, J.M., Mohanty, B.P., Hsu, E.C., Miller, D. 2004. SMEX02: Field scale variability, time stability and similarity of soil moisture. *Remote Sensing of Environment* 92: 436-446.
- Jujnovsky, J., Almeida-Leñero, L., Bojorge-García, M., Monges, Y. L., Cantoral-Uriza, E., Mazari-Hiriart, M. 2010. Hydrologic ecosystem services: water quality and quantity in the Magdalena River, Mexico City. *Hidrobiológica* 20(2):113-126.
- Jujnovsky, J., González-Martínez, T.M., Cantoral-Uriza, E.A., Almeida-Leñero, L. 2012. Assessment of Water Supply as an Ecosystem Service in a Rural-Urban Watershed in Southwestern Mexico City. *Environmental Management* 49:690-702.
- Kareiva, P., Tallis, H., Ricketts, T., Daily, G.C., Polasky, S. (ed.) 2011. *Natural Capital. Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services*. Oxford University Press, United Kingdom.
- Kosoy, N., Corbera, E., Brown, K. 2008. Participation in payments for ecosystem services: Case studies from the Lacandon rainforest, Mexico. *Geoforum* 39:2073-2083.
- Manson, R.H. 2007. Efectos del uso del suelo sobre la provisión de servicios ambientales hidrológicos: monitoreo del impacto del PSAH. Informe final, INECOL, México.
- Martínez-Tuna, M., Kosoy, N. 2007. Compensaciones monetarias y conservación de bosques. Pagos por servicios ambientales y pobreza en una comunidad rural en Honduras. *Revista Iberoamericana Economía Ecológica* (6):40-51.
- Mayrand, K., Paquin, M. 2004. Pago por servicios ambientales: Estudio y evaluación de esquemas vigentes. Unisféra International Centre, Canadá.
- MEA 2005. *Ecosystems and human well-being: Synthesis. Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press, USA.
- Molnar, J.L., Kubiszewski, I. 2012. Managing natural wealth: Research and implementation of ecosystem services in the United States and Canada. *Ecosystem Services* 2:45-55.
- Morales-Luis, R., Palacios-Vélez, O.L., Marín-Stillman, L., Peña-Díaz, S. 2000. Dirección de flujo y clasificación del agua subterránea en Monte Alegre, Sierra del Ajusco, México. *Agrociencia* 34(6):667-687.
- Muñoz-Piña, C., Guevara, A., Torres-Rojo, J.M., Braña, J. 2008. Paying for hydrological services of Mexico's forest: Analysis, negotiations and results. *Ecological Economics* 65(4):725-736.
- Muñoz-Piña, C., Cisneros, A., García, H. 2011. Retos de la focalización del Programa de Pago por los Servicios Ambientales en México. *Revista Española de Estudios Agro-sociales y Pesqueros* 228:87-113.
- NRC 2005. *Valuing Ecosystem Services. Toward Better Environmental Decision-Making*. National Research Council, The National Academies Press, USA.
- Niemela, J. (ed.) 2012. *Urban Ecology: patterns, processes, and applications*. Oxford University Press, USA.
- PAOT 2007. Elementos para una gestión adecuada del Suelo de Conservación del Distrito Federal. Documento de trabajo. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial, México. Disponible en: <http://www.paot.org.mx/centro/temas/suelo/docpaot/refsc.pdf>
- PAOT 2012. Atlas geográfico del Suelo de Conservación del Distrito Federal. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial, SEDEMA, México.
- Peñuela, L. 2007. Proceso de recarga-descarga de agua subterránea en zonas receptoras de Pago por Servicio Ambiental Hidrológico, Sierras Nevada y Las Cruces-México. Tesis de maestría en Geografía, UNAM, México.
- Pérez Campuzano, E., Perevochtchikova, M., Avila Foucat, V.S. (coord.) 2011. *Suelo de Conservación del Distrito Federal ¿hacia una gestión y manejo sustentable?* IPN, MA Porrúa, México.
- Perevochtchikova, M., Vázquez, A. 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* 5:35-46.
- Perevochtchikova, M., Ochoa Tamayo, M. 2012. Avances y limitantes del programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos en México, 2003-2009. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(10) 89-112.
- Perevochtchikova, M., Oggioni, J. 2014. Global and Mexican analytical review of the state of art on Ecosystem and Environmental services: a geographical approach. *Investigaciones Geográficas* 85 (pre-print).
- Piper, A.M. 1953. *A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analysis*. United States Geological Survey, USA.
- PNUMA 1992. Conferencia de la Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y el Desarrollo. Disponible en: <http://www.pnuma.org/docamb/dr1992.php>
- Postel, S., Thompson, B.H. Jr. 2005. Watershed protection: Capturing the benefits of nature's water supply services. *Natural Resources Forum* 29 98-108.
- Rao, N.S. 1998. MHPT.BAS: a computer program for modified Hill-Piper diagram for classification of ground water. *Computers & Geosciences* 24(10):991-1008.
- Rosa, H., Kandel, S. (coord.) 2002. Pago por servicios ambientales y comunidades rurales: contexto, experiencias y lecciones de México. PRISMA y Fundación Ford, México.
- Rosa, H., Kandel, S., Dimas, L. 2004. Compensación por servicios ambientales y comunidades rurales. Lecciones de las Américas y temas críticos para fortalecer estrategias comunitarias. PRISMA, INE-SEMARNAT, CCMSS, México.
- Sanders, J., Dendoncker, N., Keune, H. 2013. *Ecosystem Services – Global Issues, Local Practice*. Elsevier, USA.
- Sandoval-Palacios, E., Gutiérrez Cacique, J. 2012. Servicios Ambientales, experiencia federal en el Distrito Federal. En: Pérez Campusano E., Perevochtchikova, M., Avila Foucat, V.S. (coord.), 2011. *Suelo de Conservación del Distrito Federal ¿hacia una gestión y manejo sustentable?* pp. 94-118, IPN, MA Porrúa, México.
- Savenije, H.H.G. 1995. New definitions for moisture recycling and the relationship with land-use changes in the Sahel. *Journal of Hydrology* 167 (1995) 57-78.
- Solórzano, L.A., Páez-Acosa, G.I. 2012. Forests. En: Levin, S.A. (ed.), *The Princeton Guide to Ecology*. pp. 606-613. Princeton University Press, USA.
- Toth, J. 2000. Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero de España* 111(4):9-26.
- UN 1998. Protocolo de Kyoto de la convención marco de Naciones Unidas sobre el Cambio climático. Naciones Unidas. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Vigerstol, K.L., Aukema, J.E. 2011. A Comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of Environmental Management* 92:2403-2409.
- Wunder, S. 2005. Pagos por servicios ambientales: Principios básicos esenciales. *Centro Internacional de Investigación Forestal. Occasional Paper* 42(s):2.