

SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS EN MÉXICO 2003/2004: VISIÓN GEOGRÁFICA

MARÍA PEREVOCHTCHIKOVA

JOSÉ JOEL CARRILLO RIVERA

Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, México

LILIANA ANDREA PEÑUELA ARÉVALO

Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, México

CARLOS MUÑOS PIÑA

Dirección General de Investigación en Política y Economía Ambiental, INE, México

Resumen

Considerando el creciente interés en el conocimiento del recurso hídrico debido principalmente al aumento en la necesidad y disminución del volumen asequible, el Gobierno Federal Mexicano inició el programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) en el 2002; basándose en la experiencia de Costa Rica en los años 1996-2002, se espera enriquecer este nuevo programa con la definición de una metodología de valoración correspondiente. El programa supone que la presencia de cubierta forestal en un área contribuye al funcionamiento del ciclo (sistema) hidrológico, junto con otros servicios ambientales. El presente estudio es un *primer análisis* de 20 ejidos de un total de 271 predios inscritos en el 2003 en el PSAH, el cual pretende identificar el comportamiento del flujo de agua subterránea y superficial, su situación geográfica y definir algunos indicadores de impacto al recurso hídrico. A partir de la integración y análisis de información de las zonas de estudio que incluye parámetros de la climatología, hidrogeología, topografía, edafología, uso del suelo y vegetación, crecimiento urbano y migración de población, se pretende establecer el servicio ambiental que suministran las zonas seleccionadas. Se realizaron secciones transversales y trabajo de campo para complementar la información faltante; estos resultados permitieron formular recomendaciones y elementos indicadores para una mejor valoración de los servicios ambientales en un futuro.

Dra. María Perevochtchikova – Ingeniera-hidróloga del Departamento de Geofísica e Hidropronósticos de la Facultad de Hidrología de la Tierra; Universidad Estatal de Rusia de Hidrometeorología; San Petersburgo, Rusia. Doctora en Ciencias Geográficas del Departamento de Ecología Aplicada de la Facultad de Ecología y Física del Ambiente de la misma universidad. Desde abril de 2004 realiza una estancia posdoctoral en el Instituto de Geografía de la UNAM, México, DF. Sus principales líneas de investigación son: pronósticos hidrológicos, geoecología, hidrogeología y servicios ambientales.

Dr. José Joel Carrillo Rivera – Ingeniero Geólogo del Instituto Politécnico Nacional, México, con Diplomado en Hidrogeología, Maestro en Hidrogeología del University College London de la Gran Bretaña, Doctor en Filosofía (Hidrogeología) de la Universidad de Londres, GB. Su experiencia profesional la ha desarrollado en el Gobierno del Estado de Victoria, Australia, en la Comisión Federal de Electricidad, México, en los institutos de Geofísica, Geología y Geografía de la UNAM como tutor, investigador y profesor en los posgrados de Ciencias de la Tierra y Geografía. Es Experto Externo de la Comunidad Europea, Consultor del CONACYT, miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias, Presidente del Capítulo Mexicano de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos y Vicepresidente de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo.

Lic. Liliana Andrea Peñuela Arévalo – Geóloga de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente estudiante de Maestría en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, UNAM, con orientación en Geología Ambiental con énfasis en agua subterránea y servicios ambientales.

Carlos Muños Piña – Es economista, con estudios del Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM), Maestría en Economía Ambiental por The University College London (GB) y Doctor en Economía Agrícola y Recursos Naturales por la Universidad de California en Berkeley. Fue consultor del Departamento del Distrito Federal, del London Environmental Economic Center, del Banco Mundial y también, asesor del Resources Renewal Institute, realizando diversas actividades entre las que destacan las relacionadas al análisis de políticas públicas. Fue Director de Economía Ambiental en la Unidad de Análisis Económico y Social de la Secretaría de Desarrollo Social entre 1992 y 1994. Ha colaborado en la docencia en temas de economía ambiental y políticas públicas en el ITAM, en el ITESM, el Colegio de México y en la Universidad de California en Berkeley. Actualmente es Director General de Investigación en Política y Economía Ambiental, del Instituto Nacional de Ecología.

Introducción

Actualmente, es reconocida la gran importancia del recurso hídrico para los ecosistemas y la subsistencia de la población humana, por lo que es necesario conocer su funcionamiento integral, analizar la interacción que existe entre agua subterránea y agua superficial a cualquier escala espacio-temporal y la influencia de la actividad humana en los cambios del régimen hidrológico, con el fin de proponer estrategias de planeamiento y metodologías de valoración que tengan por objetivo un desarrollo con vista a llegar a un manejo sustentable (más que intensivo) del recurso hídrico a la vez que se impulsan diferentes esquemas de protección ambiental.

El pago por servicios ambientales hidrológicos PSAH en México se inició en el año 2003 por iniciativa de la Comisión Nacional Forestal, CONAFOR (perteneciente a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT), basándose en la experiencia de servicios ambientales en Costa Rica, donde a partir de la promulgación de la Ley Forestal 7575 se reconocen cuatro servicios ambientales: mitigación de gases de efecto invernadero; protección del agua para uso urbano, rural e hidroeléctrico; protección y uso sostenible de la biodiversidad y belleza escénica natural para fines turísticos y científicos. Leyes conexas consideran el recurso hídrico como un servicio ambiental que debe ser valorado económicamente, cobrado a los usuarios en las tarifas para abastecimiento de agua potable y revertido a los propietarios que participan en la protección del bosque por su función hídrica, como un principio de equidad social.

Para el programa de PSAH en México, se enviaron 537 solicitudes de todo el territorio en los años 2003/2004, de las cuales sólo 271 fueron aceptadas con los siguientes criterios de elegibilidad:

- porcentaje de la cubierta forestal del terreno igual o mayor al 80% de la superficie
- localización en zonas críticas para la recarga de acuíferos, catalogadas por la Comisión Nacional del Agua (CNA) como sobreexplotadas o zonas con problemas denominados de escasez, de calidad del agua o de desastres hidrológico, y
- ubicadas en las montañas listadas por CONAFOR o vinculadas con el abastecimiento de agua a centros poblacionales con más de 5,000 habitantes (SEMARNAT, 2003).

En el caso de Costa Rica el programa PSAH fue establecido como el programa de pago por la protección, reforestación y/o manejo de bosque a los comunitarios particulares de territorios pequeños ubicados en los parte-aguas de cuencas hidrográficas con presencia de presas hidroeléctricas (Jiménez *et al.* 2003). Al igual que en México, varios años después de su inicio, fue elaborado el primer estudio con el objeto de establecer normas para determinar la cantidad de pago por SAH y afirmar la necesidad del último (Fondo Nacional de Financiamiento Forestal, FONAFIFO, 2002). Este estudio fue realizado como un análisis socio-económico de cuatro cuencas hidrográficas que incluyó el cálculo de rendimiento hídrico anual y estimación de montos para la producción hidroeléctrica y consumo humano, sin planteamiento realista de funcionamiento del sistema hídrico y, en particular, sin

consideración e incorporación de los sistemas de flujo de agua subterránea, ni definición de diferentes procesos ambientales (bióticos y abióticos) y su jerarquía de importancia (Carrillo-Rivera *et al.* 2005).

En México la idea del PSAH en cuencas “hidroeléctricas” superficiales de Costa Rica se transformó al programa de pago por la conservación de la calidad y cantidad del agua subterránea teniendo en cuenta las características propias del país, donde más del 70% del agua en México para el abastecimiento de la población se extrae del subsuelo.

Es notoria la poca cantidad de estudios relacionados con el PSAH debido a su reciente creación e incorporación en América Latina, por lo que es necesaria la elaboración de una metodología única y propia para la valoración del efecto ambiental del programa. Por esto, en el objetivo del presente estudio es realizar un primer análisis geográfico, y al mismo tiempo sistémico del funcionamiento hídrico en varias zonas receptoras del PSAH en México con el fin de identificar indicadores naturales e inducidos del impacto al recurso hídrico.

Antecedentes

Teniendo en cuenta el reconocimiento de diferentes países de América Latina en los últimos 10 años sobre la importancia de los servicios ambientales que ofrecen los bosques y la vegetación se empezaron a desarrollar los mercados para el Pago por Servicios Ambientales (PSA) en Salvador, Brasil y Colombia (Braña, 2005) y el PSA Hidrológico (PSAH) en Costa Rica (Gutiérrez M. 2005, Jiménez *et al.* 2003), el cual originó modificaciones y cambios en las leyes, junto con la fundación de nuevas organizaciones responsables en cada país.

Así, en el 2002, México propone su versión del Programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos a partir de la experiencia de Costa Rica para el manejo sustentable de los recursos naturales (bosque y agua) en el país. El programa se refiere al pago de los potenciales “usuarios” a los “productores” del agua potable a través de la conservación de bosques en las áreas montañosas, zonas potenciales de recarga de agua a acuíferos, considerando que los bosques mantienen en equilibrio el sistema hidrológico (cantidad y calidad del agua superficial y subterránea), aparte de reducir la erosión del suelo y reducir las inundaciones aguas abajo en una cuenca hidrográfica. El programa está previsto para 5 años (para identificar efectos), con el pago establecido de \$400 (pesos mexicanos) anuales (1 peso = \$0.09US) por cada hectárea de bosque mesófilo de montaña y \$300 hectárea de otro tipo de bosque (CONAFOR, 2004, 2005).

La CONAFOR, aprobó 37 proyectos (predios) para el PSAH en el 2002 (Contreras-Marmolejo, 2003) con los criterios de elegibilidad mencionados anteriormente. Para el año 2003, el pago aumentó a 271 predios de 15 estados de la república con 126.8 mil hectáreas; actualmente, el PSAH en México se realiza en todos los estados de la república, abarcando cerca de 800 mil hectáreas.

Después de dos años del inicio del programa, en el 2004, la parte teórico-administrativa se había desarrollado bastante bien; sin embargo, surgió la necesidad de un estudio sobre el funcionamiento físico del programa, con el fin de conocer los procesos naturales e inducidos involucrados al Servicio Ambiental y definir posibles indicadores de impacto al recurso hídrico.

Metodología

Para definir el funcionamiento del flujo de agua subterránea e inferir la relación que guardan las zonas de estudio con el régimen hidrológico particular, es necesaria la aplicación conjunta de diferentes técnicas de índole interdisciplinaria. Se seleccionaron dos teorías reconocidas en el ámbito internacional, pero de escasa difusión en América Latina, éstas son: i) la teoría de sistemas de flujo de agua subterránea y su interacción con agua superficial, a partir del conocimiento de diversas variables físicas y biológicas del paisaje (Tóth, 2000), y ii) la teoría de la influencia antrópica al cambio en el régimen fluvial por medio de la definición de los aspectos socioeconómicos involucrados y las características hidroclimatológicas (Shiklomanov, 1989).

El funcionamiento de los procesos del flujo subterráneo, sus propiedades y manifestaciones, se basa en que el agua subterránea es un agente geológico de carácter general y es por lo tanto, la causa de una gran variedad de procesos y fenómenos naturales. Como lo indica Tóth (2000) un ambiente hidrogeológico es un modelo conceptual de los parámetros geológicos, hidrológicos superficiales y geomorfológicos que determinan el régimen de flujo de agua subterránea en un lugar o zona determinada. La variación espacial de todos estos factores tiene que ver a su vez con tres controles establecidos por tres componentes ambientales: la topografía, el modelo geológico y el clima. Cada uno de los componentes del ambiente hidrogeológico determina una parte del régimen de flujo de agua subterránea. Es así como el clima determina la magnitud de agua en cada región, la topografía determina la distribución, movimiento y cantidad de energía de un sistema de flujo, el modelo geológico establece las zonas por donde circula el agua controlando la dirección y el esquema de flujo, como también, las características hidrogeoquímica del agua en particular edad y reacción agua-roca (Carrillo-Rivera *et al.* 2005). Los diferentes sistemas de flujo desarrollados (locales, intermedios y regionales) tendrán relación directa con el tipo de la cubierta vegetal (bosques, pastizal, humedal) y del tipo (ácido o alcalino) particular del suelo.

De aquí surge que un análisis de las características hidrológicas de una zona debe incorporar un estudio regional, donde no sólo se incluyan las pequeñas zonas de interés (como son los ejidos beneficiados con el PSAH) sino que abarque además un territorio mucho más amplio, en el cual se puedan identificar zonas de recarga y descarga de agua subterránea para los diferentes sistemas de flujo y así llegar a establecer el funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea, para finalmente obtener efectos externos al comportamiento de la zona que se busca y cómo ésta afecta al entorno exterior, adicionalmente, se agregará información socioeconómica obtenida de la integración de resultados de los diversos parámetros evaluados en forma de diferentes coberturas multitemporales empleando un sistema de información geográfica, SIG como el empleado en Arcview 3.2.

El trabajo se divide metodológicamente en cuatro fases:

- 1) *Fase teórica*, incluye análisis del funcionamiento “bosque-agua” y relación “recarga-descarga” de los sistemas de flujo de agua subterránea
- 2) *Trabajo de gabinete*, compilación de la información accesible sobre el tema y el territorio estudiado de las zonas de PSAH
- 3) *Trabajo de campo*, toma y análisis fisicoquímico de muestras de agua superficial y subterránea para la generación de una nueva base de información estadística
- 4) *Fase final*, manejo de información recopilada y su análisis correspondiente.

1. Fase Teórica

El estudio de servicios ambientales hidrológicos requiere de un análisis de la relación existente entre el bosque y el agua que fluye a través de éste (superficial y/o subterránea), junto con la estimación del impacto al recurso hídrico que puede generar el cambio del uso de suelo y vegetación en la zona de interés. Como se sabe existen dos tipos de proceso que influyen en el recurso hídrico dígase escorrentía superficial y flujo de agua subterránea: 1) naturales (endógenos y exógenos) los cuales provienen de transformaciones tectónicas de la tierra, del relieve y del suelo, y 2) inducidos, esto es, provocados por la actividad humana “antrópica” (Perevochtchikova, 2004) tales como agricultura, deforestación, reforestación, urbanización, etc. lo cual modifica el uso del suelo en una cuenca hidrográfica y se refleja en cambios del régimen de evaporación, en las condiciones de escorrentía e infiltración y finalmente en cambios en el régimen fluvial y proceso hídrico en general.

Desde hace muchos años se ha estudiado la relación bosque-agua ya que se reconoce su importancia como factor de protección ambiental, de paisaje, de biodiversidad y de recreación. Algunas investigaciones han revelado que, en la mayoría de los casos, la tala del bosque aumenta el caudal de los ríos y la reforestación produce el efecto contrario. Para valorar la influencia de cualquier cambio de la actividad económica, incluyendo deforestación o reforestación, sobre el recurso hídrico, se necesita de datos de mediciones en una estación hidrométrica al final de la cuenca y de una estación

climatológica dentro de la cuenca, así como de la estadística de actividades humanas en ese territorio (Shiklomanov, 1989). En este sentido se necesita de la identificación de zonas de recarga y descarga de agua subterránea, lo que puede lograrse por criterios físicos: cambio del nivel del agua subterránea así como presencia de manantiales, pantanos o suelos alcalinos, modificación de las características químicas del agua, cambio del caudal de ríos perennes y alteración de la vegetación en partes bajas del relieve (Carrillo-Rivera *et al.* 1997).

2. Trabajo de gabinete

En el presente estudio se analiza el territorio de 20 de los 271 ejidos que fueron seleccionados por CONAFOR para la aplicación del PSAH, los cuales fueron agrupados en cuatro zonas (**Figura 1**). Se realizó la búsqueda de información relevante a los objetivos del estudio en forma de artículos, estudios, tesis y mapas. A continuación se indican las principales bases consultadas, organizadas por tema de estudio:

- Hidrología superficial y subterránea – base del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información, INEGI; 1983, escala 1:250,000
- Química del agua – base de datos de calidad del agua subterránea, INEGI, 1983
- Meteorología – base CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional, SMN, perteneciente a la CNA, 2000
- Uso del suelo y vegetación, zonas urbanas – coberturas de INEGI, Instituto Nacional de Ecología INE, e Instituto de Geografía de la UNAM, 1976, 1994, 2000
- Imágenes satelitales Landsat, del 2000 y Landsat MSS de los años 1973, 1979, 1985, 1986, 1989 y 1992 con una resolución de 30 m del sensor ETM y 80 m del sensor MMS
- Fotos aéreas digitales de la Ciudad de México de las zonas 1 y 2, tomadas por el Instituto de Geografía UNAM, en el 2000.

Se encontró cierta insuficiencia de información, principalmente sobre aspectos geológicos (en el plano vertical), erosión del suelo e hidrogeología; para esto último, se encontraron pocos estudios los que sin embargo fueron realizados preferentemente para las partes bajas.

En el siguiente apartado se presenta una breve descripción de las zonas de estudio.

2.1. Ubicación

Las zonas 1 y 2 se localizan al suroeste del Distrito Federal, de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, ZMCM, que pertenece hidrográficamente a la Cuenca de México, por su parte, las zonas 3 y 4 se ubican al norte del Estado de Puebla, en la frontera sureste de la Cuenca de México con la Cuenca de Puebla-Tlaxcala, y están separadas por la Sierra Nevada y la Sierra del Río Frío con un lineamiento norte-sur (**Figura 2**).

La Cuenca de México (superficie de 9,600 km²) es de tipo endorreico, y está rodeada de montañas que alcanzan altitudes de 5,400 m snm, la cual se formó al cerrarse el cauce del antiguo río que corría hacia el sur de la cuenca debido a derrames de lava con un espesor del orden de 2,000 m que dieron formación de la Sierra Chichinautzin, hace aproximadamente 700,000 años. El enfriamiento rápido de la lava causó fracturas y poros grandes con un potencial importante de almacenamiento y filtración del agua lluvia en esta zona. A su vez, la cuenca endorreica provocó la formación de un lago que permite una sedimentación lacustre de hasta de unos 500 m de espesor (**Figura 2**) con intercalaciones de ceniza volcánica. La cuenca de México se encuentra al centro del Cinturón Volcánico Transmexicano, que consiste de rocas volcánicas (Lavas y piroclásticos) del Terciario al Reciente, y el cual tiene una extensión de más de 1,000 por 400 km de largo y ancho, respectivamente y un espesor conjunto de más de 2,000 m.

2.2. Hidrogeología

Existen varios estudios que aportan información parcial del funcionamiento del flujo subterráneo, los cuales abarcan sólo algunas partes de la cuenca y asimismo, la información es aún escasa con respecto a la profundidad de la secuencia estratigráfica de la cuenca y del funcionamiento del acuífero regional. Una aplicación de la teoría de los sistemas de flujo referida a la parte sur de la cuenca se puede encontrar en Edmunds *et al.* (2002).

Las zonas 1 y 2 del estudio se ubican en la Sierra Chichinautzin y Las Cruces, donde especialmente en la primera las rocas volcánicas están altamente fracturadas y con gran porosidad, esto facilita la infiltración, transmisión y almacenamiento de agua meteórica. Asimismo, la profundidad del nivel freático (de hasta 200-250 m) sugiere una gran conductividad hidráulica de estas rocas y su característica como zona de recarga. Por otro lado, en la zona de Sierra Nevada y Río Frío, donde se ubican las zonas 3 y 4, las lavas andesíticas presentan una conductividad hidráulica comparativamente baja, lo que sugiere menor infiltración y capacidad de almacenamiento (Durazo y Farvolden, 1989) pero igualmente se definen como zonas de recarga de agua subterránea.

Históricamente, zonas de descarga de sistemas de flujo de agua subterránea regional, intermedio y local en la Cuenca de México se encontraban en las zonas de Texcoco, Chalco y Xochimilco; las cuales en su conjunto definieron la existencia de un gran lago presente desde los tiempos prehispánicos. La descarga de flujos intermedio y regional se realizaba a través del acuitardo lo que le proporcionó sus características hidráulicas (porosidad y conductividad hidráulica) correspondientes, es una capa de material fino con intercalaciones de estratos de ceniza con espesor promedio de 120 m (20-300 m) (Vázquez-Sánchez, 1995).

La unidad acuífera principal de donde se extrae actualmente agua para el abastecimiento de la Ciudad de México corresponde con capas de sedimento lacustre intercaladas con material volcánico (piroclástico y epiclástico) los pozos tienen una profundidad promedio de 350 m.

2.3. Clima

Según datos del SMN del año 2000, las zonas de estudio se encuentran comprendidas en el clima Cb'(w2) – semi-frío, sub-húmedo con verano fresco y largo. La temperatura media anual es de 5 a 12°C. La precipitación promedio anual es de 800 a 1,000 mm. Los datos representan una abundante precipitación y una temperatura promedio anual baja que obviamente está relacionada con la altitud sobre el nivel del mar de los terrenos ejidales localizados en las montañas a un promedio de 2,200 a 3,000 m snm. A partir de la base de información climatológica CLICOM (Climat Computing Project) de la CNA (2000), se encontraron 14 estaciones climatológicas, de las cuales sólo cuatro (Desviación Alta al Pedregal, km 39.5 a Cuernavaca, Calpan y Santa Rita Tlahuapan) funcionaban para el año 2000 y tenían un periodo de observación mayor de 15-20 años, periodo que estadísticamente se considera significativo.

2.4. Hidrología superficial

Las zonas de estudio forman parte de dos Regiones Hidrológicas según la división de la CNA, éstas son: *RH 26 del Río Pánuco*, perteneciente a la vertiente del Golfo de México (11,588 km²) y *RH 18 del Río Balsas*, correspondiente al Océano Pacífico (6,486 km²). Las dos regiones forman parte de lo que se denomina Región Administrativa Hidrológica XIII – Valle de México.

Existe una gran extracción de agua para el abastecimiento de la Ciudad de México, la cual se toma de diversos ríos perennes e intermitentes y de muchos manantiales así como innumerables pozos. El agua se mueve por medio de acueductos superficiales y subterráneos, algunos de estos están presentes en las zonas de estudio (o cerca). Igualmente se aprecia el uso de agua de presas, en su mayoría pequeñas, para el riego de plantaciones agrícolas en los poblados vecinos.

Según la cobertura de SIG y base de datos estadísticos BANDAS (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales) de la CNA se observa que en las zonas de estudio no existen estaciones hidrométricas, Sin embargo, en sus alrededores se encuentran 15 estaciones con diferente periodo de observación, de las cuales sólo cuatro de ellas funcionaban para el año 1998, con un periodo de observación mayor de 15-20 años. Según hidrogramas de estas estaciones (con valor promedio mensual Q, en miles m³) se

aprecia que el diagrama del caudal de escorrentía repite el paso de la precipitación (P, mm) y tiene avenidas altas provocadas por lluvia en el periodo correspondiente a la temporada de lluvias, mayo a octubre, con los valores máximos en los meses de julio a octubre. Las gráficas de la sumatoria de la escorrentía media anual de tres estaciones hidrométricas (Santa Teresa, San Marcos y San Mateo) ubicadas en la subcuenca “Lago de Texcoco” indican cambio en dos de ellas, lo que sugiere una transformación radical del uso del suelo en esta subcuenca particular para los años 1980, 1983 y 1990, donde primero se generó una disminución del caudal, después su aumento y de nuevo su disminución. En total la disminución del caudal consistió en cerca del 15% de lo que al principio se registró (**Figura 3**). Hay que considerar que esta información puede ser contraria con la de las zonas de PSAH ya que las dos últimas estaciones no están ubicadas en la misma subcuenca correspondiente a las zonas de estudio y tampoco en el mismo parte-aguas. Sin embargo, pueden estar relacionadas subterráneamente ya que se infiere por la distribución regional de las rocas volcánicas que forman la cuenca y que componen el Cinturón Volcánico Transmexicano, que son parte del mismo acuífero.

2.5. Agua subterránea

El análisis hidrogeológico se basó en la revisión de la información contenida en mapas impresos y digitales a escala 1:250,000 del INEGI - SPP (1983, 1989) los cuales incluyen la cobertura de las zonas de veda establecidas en la cuenca, unidades geohidrológicas, análisis químicos de aprovechamientos de agua (pozos, norias y manantiales) y dirección de flujo del agua subterránea en el plano horizontal. La inmensa mayoría de los estudios se han realizado en la planicie de la cuenca, lo que produce un vacío de información de gran valía para efectos de conocer el comportamiento del agua subterránea como para poder establecer una situación comparativa resultante de las acciones del PSAH. Se carece de mapas actualizados de esta temática, por lo que el análisis realizado contrasta fuertemente con los cambios en la dinámica poblacional y de desarrollo, y por lo tanto con el uso real del agua en las zonas de estudio. Cabe resaltar que a pesar que se tienen registrados cerca de 6 mil aprovechamientos en la Cuenca de México, en las zonas de estudio sólo se localizan manantiales, y se carece de pozos, lo cual se puede explicar por la altura de las montañas y la distancia a las grandes áreas urbanas, más sobre todo por el bajo crecimiento urbano que han experimentados las zonas en estudio.

2.6. Uso del suelo y vegetación

El cambio de uso del suelo en los últimos 30-40 años en las zonas de interés se determinó a partir de un análisis multi-temporal de mapas impresos del INEGI de uso del suelo y vegetación, para dos periodos (1968-1986 y 1993-1996) a la escala de 1:250,000 y cuatro coberturas digitales en un SIG a la misma escala: dos del INEGI para 1976 y 1993 y dos del Inventario Forestal Nacional (IFN) del Instituto de Geografía de la UNAM, de 1994 y 2000.

Se observó que en las zonas de estudio la cobertura forestal representa más del 80% de su superficie (excepto el ejido Magdalena Petlascalco donde el 95% de su superficie carece de cobertura vegetal, según las observaciones de campo) y un 20% pertenece a agricultura de temporal (con cultivos de frijol, maguey pulquero, maíz) y pastizal (pradera de alta montaña). A pesar de que las coberturas presentan una diferente clasificación de la vegetación, se realizó un esfuerzo para hacerlas comparables y lograr obtener una clasificación única, basándose en la experiencia de Velásquez *et al.* (2002). La comparación se realizó para mapas digitales de 1976 (INEGI) y del 2000 (Instituto de Geografía de la UNAM); donde se obtuvo una tendencia al aumento del bosque de conífera latifoliada y agricultura de temporal, así como la disminución del área de pastizal y coníferas (**Figura 4**).

Igualmente, para este periodo se notó la tendencia de crecimiento de la población en el área asociada a la ZMCM, lo cual se ha realizado por un desplazamiento de la población del país a los alrededores de la ciudad, generando nuevas áreas urbanas, lo que incide en las zonas 1 y 2 principalmente (**Figura 5**). Es importante tener en cuenta esta dinámica, considerando la influencia producida por estos cambios rápidos en uso del suelo que producen una respuesta del sistema hídrico.

3. Trabajo de Campo

El trabajo de campo se realizó para complementar y ampliar la información existente a través de observaciones de la cobertura USV, mediciones de calidad y cantidad de agua de manantiales (y pozos), encuestas con ejidatarios y habitantes, tomando como referencia el mapa digital del INEGI (1983) que contiene la base de datos de las características físicas y químicas de los aprovechamientos de agua subterránea. Como resultado, se propuso iniciar un programa de seguimiento a esta base para determinar la evolución fisicoquímica del agua subterránea en los últimos años.

La realización del trabajo de campo permitió percibir que en la mayoría de los casos el programa de PSAH cubre sólo una porción de los ejidos involucrados, y el territorio real donde se dan los procesos hidrológicos es de mayor extensión y allí no existe control alguno del uso del suelo. Igualmente se observó preocupación por parte de los lugareños quienes señalan que algunos manantiales se están secando o que ha disminuido su caudal debido probablemente a que casi todos los manantiales se explotan de manera intensiva llevando el agua hacia otras poblaciones, o como en el caso del manantial Santa Rita Tlahuapan de la zona 4 donde los espacios en el bosque han sido reforestados según entrevistas realizadas. A su vez, las actividades agrícolas han tendido a disminuir por varias razones, tales como el precio bajo de los productos, sub-utilización de la tierra, emigración de agricultores, entre otras.

Cabe resaltar que algunos pozos ubicados en las zonas de estudio no cumplen con normas sanitarias (**Foto 1**) ni con la normatividad de la CNA, ya que no se tiene instalado medidor de flujo del agua captada, como tampoco dispositivos para medir el nivel del agua. Por esta razón, no fue posible determinar parámetros como profundidad del nivel estático, realizar registro de temperatura (comportamiento vertical) y tomar muestras para determinar la cantidad de agua.

4. Fase Final

A partir del análisis integrado de toda la información recopilada por medio de las fases anteriores, se construyeron cuatro secciones hidrogeológicas a escala regional que abarcan las zonas de estudio y que pretenden facilitar la comprensión del funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea y distinguir zonas de recarga y descarga con base en las características naturales del paisaje. En los cortes hidrogeológicos de las zonas de estudio (**Figuras 6, 7**) se incluyen aspectos geológicos, uso de suelo, zonas urbanas e hidrología del terreno. Así mismo, se identificaron posibles zonas de recarga (montañas, compuestas generalmente por andesitas) y zonas de descarga (planicie aluvial), donde es notoria la menor profundidad del nivel freático, la escorrentía es perenne y se advierte la presencia de suelo salino. El análisis de éstos señala que cualquier cambio en la cobertura de USV a gran escala espacial y temporal en la zona de recarga puede generar un impacto al recurso hídrico en las zonas de tránsito y de descarga.

A continuación se describen los resultados obtenidos de las secciones hidrogeológicas generadas en este trabajo para las zonas estudiadas desde la perspectiva de PSAH, sin olvidar que los perfiles realizados son una aproximación y que se requiere de continuar con nuevas investigaciones para generar un modelo de comportamiento más concreto y detallado.

Sección 1.- incluye el territorio desde el Cerro La Palma (Sierra de La Cruces) hacia los canales de Xochimilco en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. El agua subterránea se infiltra, almacena y circula en rocas volcánicas, el flujo de agua observado se ha generado aguas arriba (desde la perspectiva del nivel freático), esto es, desde una parte topográficamente con mayor altitud como lo es, posiblemente, el Cerro La Palma. Desde un punto de vista estricto, en la Zona 1 no se genera una recarga importante, más bien esta zona se encuentra localizada en una parte de la zona de tránsito del sistema de flujo, esto parece estar corroborado por resultados de las mediciones de campo realizadas en el agua subterránea de esta sección (**Figura 6**). De acuerdo con la información procesada, la contribución del agua infiltrada pudiera ser de relativo interés a la ZMCM; sin embargo, es de enfatizar que el agua que aquí se extrae es posiblemente de una recarga generada más allá del parteaguas de la Cuenca de México (Edmunds *et al.*, 2002).

Sección 2.- trazada desde el Volcán Pelado hasta los canales de Xochimilco. Su interpretación sugiere la posibilidad de que el Volcán Pelado esté funcionando como zona de recarga o de tránsito y esto explique en parte la ausencia de manantiales entre este volcán y su vecindad hacia la Ciudad de México.

Sección 3.- se trazó desde la zona más alta de la cuenca, el Parque Nacional Toquiapan hacia el municipio de Santa Ana Napaluca, zona topográficamente más baja y con menor profundidad del nivel freático. Los datos asequibles para la Zona 3 (**Figura 7**) localizada en la Sierra de Río Frío proponen la presencia de dos tipos de flujo, un sistema local con agua de baja temperatura ($T=14^{\circ}\text{C}$) y baja salinidad ($CE=74.9\ \mu\text{S}$) manifiesto en los manantiales; y otro de mayor recorrido tanto en forma lateral como a profundidad, interpretado como de tipo intermedio cuya agua presenta una temperatura y salinidad mayor que la del sistema local. Lo anterior sugiere que la zona de PSAH tiene un comportamiento de zona de descarga, por lo que su valor como área para incrementar el aporte al agua subterránea es limitado.

Sección 4.- se ha trazado desde el Cerro de La Trampa hacia el municipio de Santa Ana Napaluca. La información asequible de esta zona señala que el comportamiento esperado del agua subterránea en el Cerro de La Trampa es de un virtual parte-aguas (recarga), congruente con el límite de la Cuenca de México y Cuenca de Puebla. Las características físicas y químicas del agua obtenida de los pozos ubicados en la sección ($T = 12\text{-}24^{\circ}\text{C}$ y $CE = 65\text{-}445\ \mu\text{S}$), indican que el agua no se ha infiltrado a gran profundidad ni ha estado sujeta a largas reacciones con los materiales geológicos por donde circula. La falta de manantiales reportados en esta zona y la diferencia en las profundidades del nivel freático en los pozos conducen a concluir que este cerro funciona como parte de una zona de recarga y que el agua que se extrae hacia la vertiente de Puebla representa parcialmente una porción del agua que se infiltra en este parte-aguas.

Conclusiones y recomendaciones

La experiencia actual del Pago por Servicios Ambientales en México ha permitido apreciar que los cambios en la cobertura forestal (tanto en cantidad como en tipo) estimados a partir de imágenes satelitales no permite asegurar el éxito del PSAH, debido a que la escala utilizada y la menor resolución, no permite apreciar claramente el cambio de cobertura en el lapso en que se tienen las imágenes (1976 a 2000). Por lo que es necesario resaltar la importancia de contar con fotografías aéreas que permitan mejorar este aspecto, trabajando a nivel de un píxel por metro. Igualmente, se recomienda el seguimiento del programa de PSAH y la actualización continua de aspectos físicos en estas zonas, como la calidad química y cantidad del agua superficial y subterránea, además de estudios geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos más detallados del territorio, factores que sin embargo requieren de varios años de estudios de carácter continuo.

El trabajo de campo mostró que en la mayoría de los casos el PSAH cubre sólo una pequeña parte de los ejidos involucrados, el porcentaje es en algunos casos de sólo un 5% del área de interés hidrológico para la recarga; esto es muy importante ya que muestra: *i*) que el territorio real y sobre el cual no existe control o seguimiento, es de mayor extensión y con un uso de suelo diferente o igual que en casos incluye hasta la tala del bosque con permiso oficial, y *ii*) la necesidad de aumentar el área de interés a incorporar como PSAH. Igualmente, es importante para el PSAH incorporar además de las zonas de recarga del agua subterránea (zonas de PSAH) las zonas de descarga como zonas de control de calidad y cantidad del agua.

Por último, se considera altamente recomendable y necesario realizar una campaña en campo para que la población esté informada sobre el funcionamiento del programa de PSAH, lo que en cierta manera apoyaría el esfuerzo hacia la conservación de la naturaleza propuesta por parte del Gobierno Federal.

Lista de figuras y fotos

- Figura 1. Localización de las zonas de estudio
- Figura 2. Esquema geológico superficial de la Cuenca de México
- Figura 3. Diagramas de la sumatoria de la escurrentía media anual para tres estaciones hidrométricas
- Figura 4. Cambio de cobertura de uso del suelo para los años 1976, 1994 y 2000. A) Zona 1, B) Zona 2, C) Zona 3, D) Zona 4
- Figura 5. Crecimiento de zonas urbanas, período 1976-2000
- Figura 6. Sección hidrogeológica 1, zona del Volcán Ajusco
- Figura 7. Sección hidrogeológica 3, zona de Río Frío
- Foto 1. Condiciones sanitarias de un pozo ubicado en Santa Rita Tlahuapan

REFERENCIAS

- Braña VJ. 2005. El papel de la negociación en el desarrollo de mercados para el pago de servicios ambientales. INE. México, D.F. Presentación Power Point.
- Carrillo-Rivera JJ, Cardona A y Margain R, 1997. Groundwater flow and environmental impact in Mexico. *Geografía y Desarrollo*, No 15, pp 17-27.
- Carrillo-Rivera JJ, Perevochtchicova M, Tautiva M, Godoy A, Peñuela L y Hergt T. 2005. "Definición de indicadores de impacto al recurso hídrico en las zonas receptoras de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos 2003/2004". Informe final al Instituto Nacional de Ecología del Instituto de Geografía, UNAM. México, DF, 99 pp
- Contreras-Marmolejo FJ. 2003. Futuro prometedor para el mercado de servicios ambientales en México. SEMARNAT, CONAFOR. México. p. 27-28
- CNA, 2000. Proyecto de bases de datos climatológicos. Subdirección General Técnica Unidad del Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua.
- CONAFOR, 2004. La experiencia de México en el Pago por Servicios Ambientales hidrológicos y el Fondo Forestal mexicano. Comisión Nacional Forestal, SEMARNAT. México, DF. Presentación
- CONAFOR, 2005. Programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos PSA. Comisión Nacional Forestal, SEMARNAT, Página electrónica: http://www.conafor.gob.mx/programas_nacionales_forestales/psa
- Durazo J y Farvolden RN. 1989. The groundwater regime of the Valley of México from historic evidence and field observations. *J. Hydrol.* Vol. 112, p. 171-190
- Edmunds, WM; Carrillo-Rivera, JJ y A Cardona, 2002. Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico city. *Journal of Hydrology*, Vol 258, pp 1-24.
- Fondo Nacional de Financiamiento Forestal FONAFIFO. 2002. Definición de parámetros hídricos para la valoración del servicio ambiental de protección del recurso hídrico brindado por los bosques y plantaciones forestales en Costa Rica. Inf Final del CINPE-UNA. Costa Rica. 149 pp
- Gutiérrez M. 2005. Acceso al Pago de Servicios Ambientales en Costa Rica. Archivo PDF en la página electrónica: <http://lead-es.virtualcentre.org/es/ele/conferencia3/articulo11.htm>
- INEGI. 1976. Carta de Uso del Suelo y Vegetación. Hoja E14-2: La Ciudad de México, escala 1:250 000 (impresa y digital). Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F.

INEGI - SPP. 1983. Carta Hidrológica de Aguas Superficiales. Hoja E14-2: La Ciudad de México, escala 1:250 000 (impresa y digital). Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática y Secretaría de Programación y Presupuesto, México, D.F.

INEGI - SPP. 1989. Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas. Hoja E14-2: La Ciudad de México, escala 1:250 000 (impresa y digital). Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática y Secretaría de Programación y Presupuesto, México, D.F.

IGg-UNAM. 2000. Inventario Forestal Nacional. Hoja E14-2: La Ciudad de México, escala 1:250 000 (cobertura digital). Instituto de Geografía de la UNAM en colaboración con el Instituto Nacional de Ecología, México, D.F.

Jiménez F. Joaquín Campos J, Alpízar F y Navarro G. 2003. Experiencias de pago por servicios ambientales en cuencas de Costa Rica. CATIE. Archivo PDF en la página electrónica: <http://www.rlc.fao.org/foro/psa/pdf/jimenez.pdf>

Perevochtchikova M. 2004. Inclusión de factores de compensación en un análisis de influencia de la actividad económica en el cambio del caudal del río Sosva, Rusia. Memorias del Congreso XXXIII AIH - 7° ALHSUD "Entendimiento del flujo del agua subterránea desde la escala local a la regional". Ciudad de Zacatecas, México.

SEMARNAT. 2003. Acuerdo que establece las Reglas de operación para el otorgamiento de pagos del Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales Diario Oficial, 3 octubre. México. D.F. p. 6-22

Shiklomanov IA. 1989. Influencia de la actividad económica en escorrentía fluvial. Editorial Gidrometeoizdat, Leningrado, 335 pp (en ruso)

Tóth J. 2000. "Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones". Boletín Geológico y Minero, Vol. 111-4, México, p. 9-26

Vásquez-Sánchez E, 1995. Modelo conceptual hidrológico y características hidráulicas del acuífero en explotación en la parte meridional de la Cuenca de México. Tesis de maestría. Instituto de Geofísica, UNAM, México D.F.

Velázquez A, Mas JF, Díaz-Gallegos JR, Mayorga-Saucedo R. Alcántara PC. Castro R. Fernández T, Bocco G, Ezcurra E y Palacio JL. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. Gaceta Ecológica, No 62. INE-SEMARNAT. México. p. 21-37

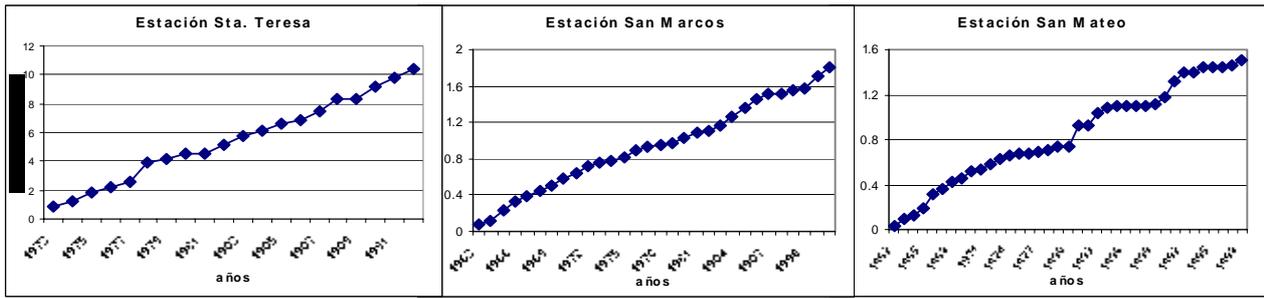


Figura 3. Diagramas de la sumatoria de la escorrentía media anual para tres estaciones hidrométricas.

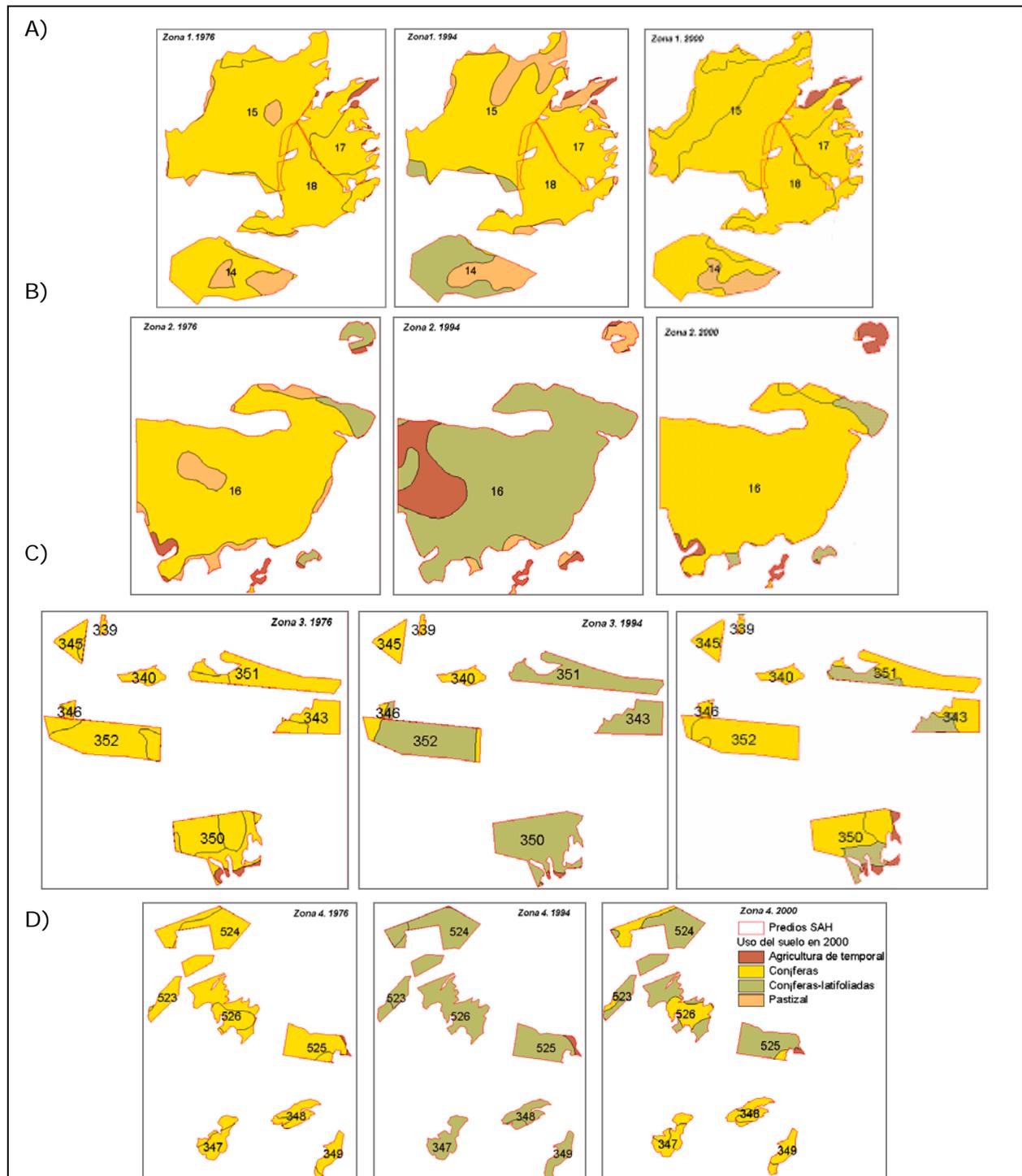


Figura 4. Cambio de la cobertura del uso del suelo para los años 1976, 1994 y 2000. A) Zona 1, B) Zona 2, C) Zona 3, D) Zona 4.

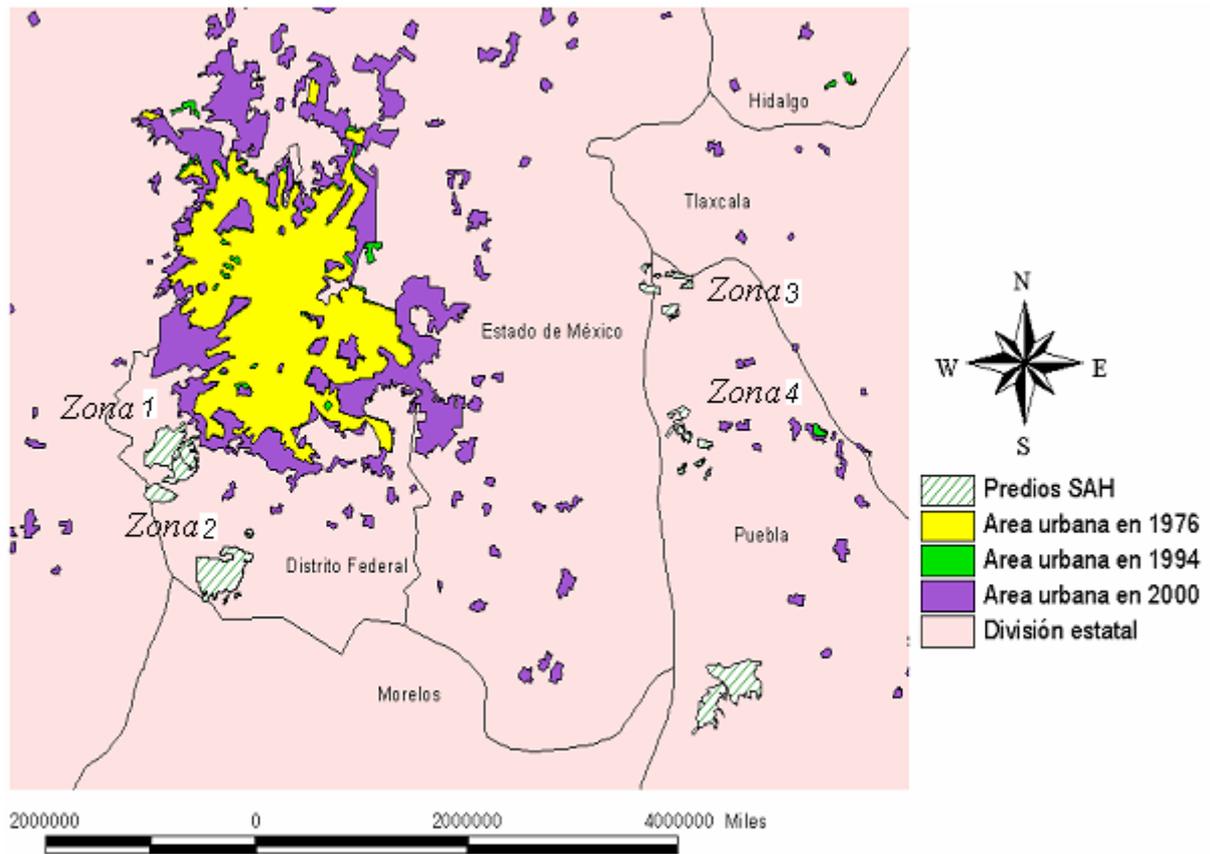


Figura 5. Crecimiento de zonas urbanas, período 1976-2000.

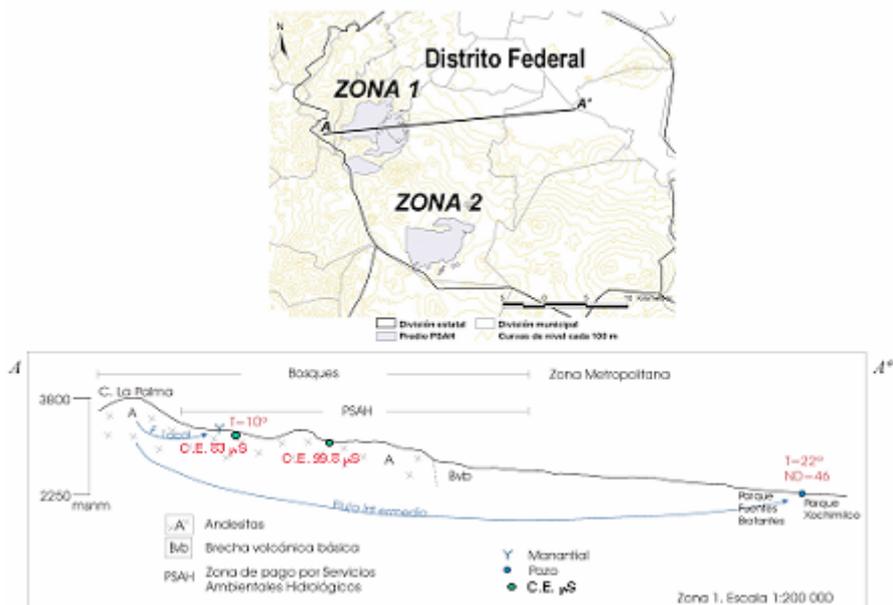


Figura 6. Sección hidrogeológica 1, zona del Volcán Ajusco.

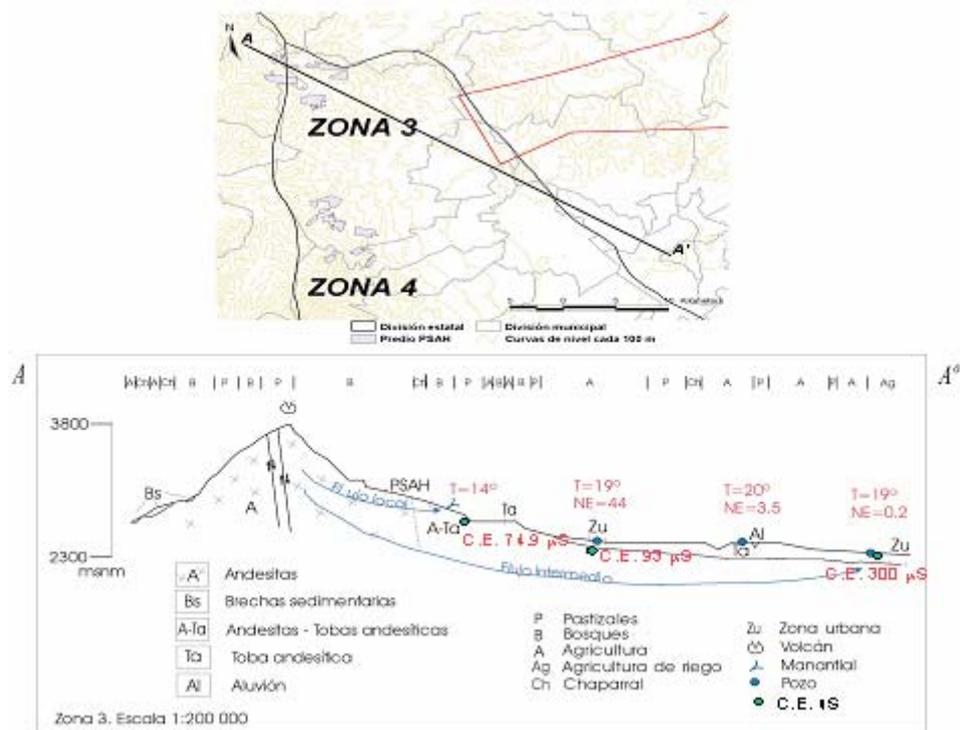


Figura 7. Sección hidrogeológica 3, Zona de Río Frío.



Foto 1. Condiciones sanitarias de un pozo ubicado en Santa Rita Tlahuapan