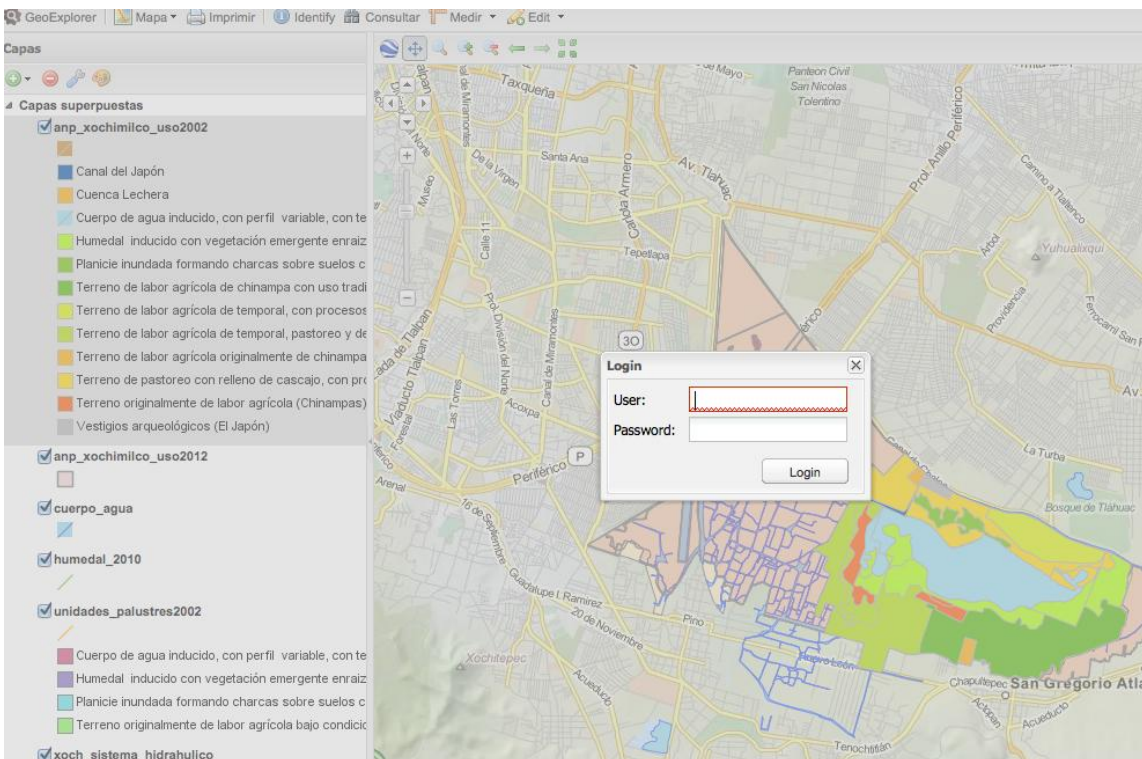


“ESTUDIO PARA LA ELABORACION DE UN SIG PARTICIPATIVO DE LA ZONA CHINAMPERA PARA IDENTIFICAR LOS RIESGOS RELACIONADOS CON LA AFECTACION DE LA CALIDAD DE AGUA Y LOS HUNDIMIENTOS EN XOCHIMILCO”

Licitación LA909024988-N1-2013

Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal



INFORME FINAL

Consultores en Gestión Política y Planificación Ambiental S.C. (GPPA)

Diciembre 2013



PRESENTACION

Mediante la Licitación Pública Nacional, Abierta Mixta Número LA909024988-N1-2013, la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal (PAOT), convocó la prestación del servicio denominado: *“Estudio para la elaboración de un SIG participativo de la zona chinampera para identificar los riesgos relacionados con la afectación de la calidad del agua y los hundimientos en Xochimilco”*.

Concluidos en tiempo y forma los procedimientos legales y mediante el fallo correspondiente, la empresa Consultores en Gestión, Política y Planificación Ambiental S.C. (GPPA), asumió la responsabilidad de realizar el estudio referido.

Este documento que presenta GPPA es el Informe Final de dicha Licitación y cubre todos los compromisos previstos en el cronograma correspondiente, mediante la integración de la secuencia de reportes e informes parciales que abajo se enlistan:

1. INTRODUCCION

La Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal (PAOT), es una institución que funciona como Ombudsman Ambiental, se encarga de garantizar el derecho ambiental y urbano de los habitantes, vigilando el cumplimiento de disposiciones jurídicas y locales en materia ambiental y de ordenamiento territorial. Difunde los derechos y obligaciones de los ciudadanos y cuenta con atribuciones para elaborar estudios que contribuyan a la generación de argumentos y apoyen la gestión, administración y protección de recursos naturales; entre sus funciones esta recomendar a las dependencias y entidades de la administración pública federal y del Distrito Federal, la ejecución de acciones que considere procedentes, por actos u omisiones que generen desequilibrio ecológico, daños o deterioro ambiental grave; como es el caso del sistema lacustre y la chinampería agrícola tradicional de Xochimilco, declarados Patrimonio de la Humanidad por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Con base en las conclusiones de un taller seminario realizado en el 2012, la PAOT identificó la necesidad de proponer nuevas herramientas para el análisis, acuerdo y consenso sobre esta región, así como de toma de decisión para una gestión y manejo práctico acorde con la gravedad de los problemas que la afectan y con la urgencia no solo de administrar sus efectos, sino con igual importancia tratar de atender sus causas, a fin de contribuir de manera orientada a frenar el deterioro de la zona; con esta orientación, la PAOT se propuso crear una herramienta de informática que concentre y difunda información útil para los tomadores de decisiones, cuya fase inicial sea implementar un Sistema de Información Geográfica Participativo (SIGP), sobre la problemática de la planicie lacustre del ex-lago de Xochimilco, porque la PAOT considera que futuras acciones de protección, conservación y/o manejo en esta región, deben fundamentarse en la revisión e integración del conocimiento científico y técnico disponible. En este marco la PAOT busca que el SIGP sea un sistema que contenga información actual pero que a la vez ayude en la toma de decisiones, así como a la generación de nuevo conocimiento, orientado específicamente al rescate de la zona.

Con esta finalidad, la PAOT a través de la Licitación LA909024988-N1-2013, convocó la prestación del servicio denominado: *“Estudio elaboración de un SIG participativo de la zona chinampera para identificar los riesgos relacionados con la afectación de la calidad del agua y los hundimientos en Xochimilco”*, con el objetivo de sistematizar información espacial y documental y dar a conocer el estado ambiental que guarda el Área Natural Protegida “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco” (ANP-EXSGA), como un medio público para sensibilizar y fomentar la participación de los actores de la sociedad, con una orientación específica a los siguientes alcances, en orden de importancia:

- A. La protección de la calidad y disponibilidad de agua potable del acuífero regional;
- B. La restauración hidráulica, ecológica y productiva de la chinampería agrícola;
- C. La actualización y/o el mantenimiento de la Declaratoria de la UNESCO; y
- D. La consolidación de los ambientes lacustres y palustres inducidos por el hundimiento.

En este marco el estudio del SIG Participativo contempla los siguientes objetivos

1. Identificar y compilar información de la región de la planicie lacustre de Xochimilco aplicable al caso, sobre los siguientes temas específicos: a) La explotación de pozos de agua potable; b) La calidad del agua y/o contaminación del agua en el acuífero y/o los pozos de extracción, así como en el lago y los canales de san Gregorio Atlapulco; y c) incorporar la información espacial digital disponible, levantamientos LIDAR (Light Detection and Ranging) y fotografías aérea anterior a 1998 a escalas de vuelo 1:20,000 o mayor; para tener una referencia de las condiciones que presenta y presentaba el sitio; la cual esté en posibilidad de solicitarse o adquirirse para los fines de este estudio, en instancias gubernamentales, académicas o privadas.
2. Contar con una herramienta informática que funcione como un facilitador de la información y como una manera de consensar los datos sobre la situación que hay en la zona, que permita poner a disposición la información espacial con la que se cuenta (mapas, fotos, imágenes de satélite, etc.), como una forma de sensibilizar tanto a las autoridades como a la sociedad de lo que sucede en el sitio utilizando un lenguaje visual, que permitirá una mejor planificación, gestión y manejo.

3. Desarrollar dicha herramienta informática en forma de un Sistema de Información Geográfica Participativo (SIGP), que permita publicar y descargar información de la zona chinampera de Xochimilco, adecuado a la infraestructura y a la plataforma sistemática interna de la PAOT, incorporando la información con la que cuenta la Procuraduría y la que se genere posteriormente; como un medio tanto para apoyar una mejor planificación, gestión y manejo de la zona, como para sensibilizar a las autoridades y a la sociedad de lo que ocurre en el sitio utilizando un lenguaje visual.
4. Reconocer las principales amenazas y zonas vulnerables en los sistemas agrícola y urbano de San Gregorio Atlapulco, así como describir los riesgos ambientales potenciales y validar la información de manera conjunta entre la PAOT, los especialistas y otras instancias que tengan atribuciones en la gestión de esta zona, a partir de la información disponible incorporada en el SIGP.

De esta manera y con base en el análisis de la información más relevante aplicable y la implementación del SIGP, el énfasis y razonamiento de la PAOT se centra en actualizar la comprensión del proceso de hundimiento en San Gregorio Atlapulco, sus causas y sus efectos sobre la calidad de agua del acuífero regional, sobre las zonas remanentes de chinampería tradicional actuales y sobre los ecosistemas lacustres y palustres inducidos por el hundimiento. Lo anterior con la finalidad de ayudar a revertir el riesgo ambiental que representa para la población la posible contaminación del agua del acuífero regional, que surte la mayor parte del agua potable de la Ciudad de México; así como el riesgo de la desaparición de la actividad chinampera agrícola tradicional, como producto del deterioro ambiental, de la pérdida de rentabilidad y del cambio de la actividad productiva.

Este documento que presenta Consultores en Gestión, Política y Planificación Ambiental S.C. es el Informe Final de la Licitación Pública Nacional, Abierta Mixta Número LA909024988-N1-2013 y cubre todos los compromisos previstos en el Cronograma de Actividades correspondiente.

2. REPORTE DEL GRUPO PRINCIPAL DE EXPERTOS

2.1 CONFORMACION DEL GRUPO

Desde antes de su declaratoria en el Catálogo del Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO en 1987, la región lacustre de Xochimilco ha sido objeto de innumerables estudios por parte de instituciones gubernamentales y académicas, sin embargo a la fecha la información que se ha generado por más de dos décadas se encuentra dispersa y en muchas ocasiones determina la imposibilidad de precisar qué tipo de estudio o temática falta por explorar y de su prioridad o urgencia para contribuir eficientemente a la solución del problema actual del hundimiento regional en la planicie lacustre de Xochimilco y de la consecuente potencial contaminación del acuífero inmediato adyacente, que representa la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la Ciudad de México.

Para la [Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal \(PAOT\)](#), la revisión e integración de la información existente y su análisis por expertos calificados, así como la implementación de una herramienta tecnológica de análisis espacial digital georreferenciado, conjuntamente representan una forma práctica de apoyo para la toma de decisión acorde con la gravedad de estos problemas y asimismo son elementos indispensables en busca de soluciones consensuadas al deterioro ecológico de la matriz-suelo-agua en Xochimilco, basadas en la comprensión científica de las causas de estos problemas y sus efectos, a fin de sustentar la participación de autoridades, dependencias, instancias académicas, organizaciones y actores sociales involucrados en la posibilidad de frenar la pérdida, degradación y contaminación de las zonas de humedales, chinampera y agrícola, especialmente del Área Natural Protegida “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco” (ANP-EXGSA), en un marco de constante comunicación dentro de la aplicación del Programa de Manejo vigente, como alternativa para tratar de mantener, con igual grado de importancia, tanto su valor para la humanidad, como para la calidad del agua del acuífero regional y su disponibilidad para el consumo humano, por su condición de bienes y servicios ambientales críticos para la viabilidad de la Ciudad de México.

En congruencia con estos lineamientos de la PAOT, GPPA designó al M. en C. José Luis Rojas Galaviz, como responsable de la Coordinación Académica requerida para la realización del *“Estudio elaboración de un SIG participativo de la zona chinampera para identificar los riesgos relacionados con la afectación de la calidad del agua y los hundimientos en Xochimilco”*, conforme lo establecido en la Licitación Pública Nacional abierta No. LA909024988-N1-2013, quien previamente fue responsable de la coordinación académica de los siguientes proyectos, que se consideran antecedentes directos para el presente Estudio:

- **2002** *“Programa Rector de Restauración Ecológica del Área Natural Protegida, Zona Sujeta a Conservación Ecológica “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco: Diagnóstico y Propuestas”* realizado por el Instituto de Ecología, A.C., mediante el cual se identificó y georreferenciaron las Unidades Naturales Terrestres y las del Sistema Hidráulico, los tipos de Vegetación y de Uso del Suelo del ANP-EXSGA; así como la zonificación ambiental y la propuesta de Programa de Manejo respectiva, considerando ecosistemas, recursos naturales y los problemas ambientales de la región.
- **2012** *“Taller-Seminario” denominado: Tendencias y propuestas sobre el hundimiento de la zona del ANP “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”*, cuyas conclusiones permitieron a la IPAOT identificar la necesidad de proponer nuevas herramientas de análisis, acuerdo y consenso, para contribuir de manera orientada a tratar de frenar el deterioro de la zona; mediante una herramienta de informática cuya fase inicial sea implementar un Sistema de Información Geográfica Participativo (SIGP), sobre la problemática de la planicie lacustre de Xochimilco.

En este marco el Coordinador Académico designado por GPPA, de común acuerdo con los funcionarios y el personal técnico de la PAOT designado para esos fines, acordaron como primer eje estratégico del estudio, conformar un Grupo Principal de Expertos, constituido por científicos especialistas, participantes en los proyectos referidos anteriormente, que son antecedentes directos de este estudio, asignándoles la responsabilidad de los grupos temáticos que se indican, con lo cual el referido grupo principal quedó constituido de la siguiente manera:

Dr. Mario Arturo Ortíz Pérez: Marco Natural del Ordenamiento Territorial

Dr. José Joel Carrillo Rivera: Dinámica Hidráulica (Funcionamiento del Agua Subterránea)

Dr. Alfonso Vázquez Botello: Contaminación y Calidad del Agua

Biól. Armando Peralta Higuera: Informática y Sistemas de Información Geográfica

2.2 GRUPO PRINCIPAL DE EXPERTOS

2.2.1 Dr. Mario Arturo Ortíz Pérez

Su línea de investigación principal es la Regionalización del Medio Natural. Cuenta con una producción primaria de 44 artículos de investigación publicados y 23 capítulos en libros. Asimismo, 16 mapas de concepción original publicados. Ha participado en temas emergentes y aporte cartográfico en seis atlas: tanto nacionales como regionales y de peligros. Es autor en tres libros, uno en extenso. Como parte de su labor docente ha impartido quince cursos escolarizados de licenciatura y actualmente imparte los cursos de Geomorfología Estructural y El marco Natural del Ordenamiento Territorial en el posgrado de Geografía de la UNAM. Ha participado en la formación de personal académico con doce profesionales de licenciatura y director de siete académicos (cuatro maestrías y tres doctorados) en el posgrado de Geografía de la UNAM. Asimismo ha participado en diversos proyectos y asesorías nacionales e internacionales.

2.2.2 Dr. José Joel Carrillo Rivera

Su trabajo se desarrolla en las líneas de investigación relacionadas con la dinámica hidráulica e hidrogeológica y la comprensión del funcionamiento del agua subterránea, bajo la aplicación de la teoría de sistemas de flujo, su experiencia incluye las técnicas para los estudios hidrogeoquímico e isotópico, de hidráulica subterránea y de indicadores externos (vegetación, suelo y geomorfología). Entre los numerosos proyectos de investigación que ha abordado, se encuentran varias aplicaciones prácticas como la obtención de agua con calidad fisicoquímica controlada, la definición de controles ambientales a problemas de hundimiento del suelo; la determinación de la interacción de agua salada con agua subterránea dulce en zonas costeras, el establecimiento de la dinámica de inundación en planicies y la constitución de referentes socioeconómicos

vinculados con estos aspectos. Es autor y coautor de numerosos artículos de investigación en revistas nacionales e internacionales, numerosos artículos de investigación en revistas nacionales e internacionales, imparte cursos en el Posgrado en Geografía y en Ciencias de la Tierra y ha dirigido seis tesis de licenciatura, una de especialización, siete tesis de maestría y seis de doctorado.

2.2.3 Dr. Alfonso Vázquez Botello

Ha sido Experto para la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO y para el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Consultor y Asesor de la Comisión Permanente del Pacífico Sur (Chile) y del Instituto de Investigaciones y Desarrollo Pesquero (Argentina). Ha sido Coordinador del Programa Regional del Gran Caribe sobre Contaminación Marina por Petróleo (1986-1989) del PNUMA con sede en Kingston, Jamaica. Asesor del Proyecto UNDP-CUBA sobre Contaminación de la Bahía de la Habana, Cuba (1984-1985). Asimismo, Representante de México en el Comité Mundial para estudios de la Contaminación Marina de la UNESCO desde 1986 a la fecha. Actualmente es Miembro de los Comités Internacionales de la UNESCO para estudios de la Interacción de la Salud de los Océanos y la Salud Humana y del Programa Internacional sobre las Zonas Costeras (GOOS/UNESCO) de 2002-2005. Autor-coautor de 75 artículos especializados publicados aceptados en revistas con arbitraje internacional. Autor/coautor de 7 libros en tópicos de contaminación acuática y 20 capítulos en libros. Responsable de la Cátedra Divisional “Dr. Alejandro Villalobos” de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (1993 - 1994). Integrante de las ternas 1991 Y 1994 para Director del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología - UNAM.

2.2.4 Biól. Armando Peralta Higuera

Es experto en fotografía aérea digital, sistemas de información geográfica y sistemas para investigaciones y proyectos científicos aplicados en temas ambientales, por ejemplo la creación y monitoreo de áreas naturales protegidas (Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, El Tajín, Marismas Nacionales, el Suelo de Conservación del D.F. y otros). Desde 2003 ha promovido el uso de los datos LIDAR en estudios ambientales e ingenieriles y ha trabajado con datos obtenidos de esta

tecnología en diversos proyectos ambientales, incluyendo recientemente un levantamiento LIDAR de alta densidad de la Ciudad Universitaria.

Los integrantes del Grupo Principal de Expertos convocados por GPPA, aceptaron colaborar en este estudio dentro del marco de su normatividad institucional aplicable y conforme a los términos de referencia de la propuesta sometida en la licitación LA909024988-N1-2013 y tanto sus cartas de aceptación como sus Curriculum Vitae se incluyen en el Anexo 1 de este Informe.

2.3 RESULTADOS DE LAS ACTIVIDADES DEL GRUPO

Mediante un esfuerzo conjunto la coordinación académica, el grupo principal de expertos y los equipos de trabajo temáticos, que se relacionan más adelante en las secciones correspondientes, alcanzaron los siguientes resultados:

1. Se identificó y compiló información de la región de la planicie lacustre Xochimilco y Tláhuac aplicable al caso, sobre los siguientes temas específicos: a) La explotación de pozos de agua potable; b) La calidad del agua y/o contaminación del agua en el lago, los canales, el acuífero y/o los pozos de extracción; y c) información espacial digital disponible levantamiento LIDAR (Light Detection and Ranging) y fotografía aérea anterior a 1998 a escalas de vuelo 1:20,000 o mayor (1:10,000, 1:5000); para tener así la referencia de las condiciones que presenta y presentaba el sitio; la cual estuvo en posibilidad de solicitarse o adquirirse para los fines de este estudio, en instancias gubernamentales, académicas o privadas.
2. Se diseñó una herramienta informática que funciona como un facilitador de la información y como una manera de consensar datos sobre la situación que hay en la zona, la cual permite poner a disposición información espacial (mapas, fotos, imágenes de satélite, etc.) con la que se cuenta, como una forma de sensibilizar tanto a las autoridades como a la sociedad de lo que sucede en el sitio utilizando un lenguaje visual, que puede ayudar a lograr una mejor planificación, gestión y manejo.

3. Se desarrolló dicha herramienta informática en forma de un Sistema de Información Geográfica Participativo (SIGP), que permite publicar y descargar información de la zona chinampera de Xochimilco, la cual fue adecuado a la infraestructura y a la plataforma sistemática interna de la PAOT, incorporando la información con la que cuenta la Procuraduría y con posibilidad de incorporarle la que se genere posteriormente.
4. Se identificaron las principales amenazas y zonas vulnerables en los sistemas agrícola y urbano de San Gregorio Atlapulco, describiendo los riesgos ambientales potenciales, validando la información de manera conjunta entre la PAOT, los especialistas y otras instancias con atribuciones en la gestión de esta zona, a partir de la información disponible incorporada en el SIGP.
5. Se Impartió un seminario taller al personal técnico-directivo de la PAOT para presentar los resultados y conclusiones del estudio.
6. Se elaboró este Informe Final del proyecto, en forma de un diagnóstico integral sobre la situación que guarda la zona chinampera de Xochimilco, mediante la integración de información proveniente de diferentes fuentes e instituciones públicas disponibles y la que se generó en el presente estudio, la cual queda compilada dentro de la plataforma del SIG Participativo.

3. REPORTE DEL GRUPO TEMATICO: MARCO NATURAL DEL ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y RIESGOS NATURALES

3.1 EQUIPO DE TRABAJO

El Dr. Mario Arturo Ortíz Pérez coordinó el equipo de trabajo integrado por las siguientes especialistas:

a) La Doctora Silke Cram Heydrich, experta en el tema de la degradación y contaminación de suelos y sedimentos; entre cuyos trabajos destacan la caracterización y diagnóstico de la contaminación por plaguicidas en el lago de Xochimilco; la evaluación de los procesos de degradación en suelos de los Tuxtlas, Veracruz” en el marco del proyecto global “Conservación y manejo sostenible de la biodiversidad bajo el suelo”; la propuesta metodológica para la identificación de sitios ambientalmente sensibles a los efectos por derrames de hidrocarburos y la evaluación del impacto de las acciones de conservación de suelos en el centro de México. En sus labores docentes de licenciatura destaca la del diagnóstico ambiental y evaluación de riesgo en Xochimilco, D.F. Taller de la UNAAMB en la Licenciatura de Biología la Facultad de Ciencias, UNAM. Nivel I-IV a partir del I semestre de 2003 a la fecha; y en el posgrado *de Ciencias de la Tierra, el curso de degradación y contaminación de suelos, desde 2001 a la fecha.*

b) La Maestra en Ciencias Oralia Oropeza Orozco, cuyas líneas principales de trabajo son la Geografía de los Riesgos, la Geografía Física Global y el Ordenamiento Territorial, trabajando en proyectos interdisciplinarios orientados al análisis de amenazas de origen natural y antrópico. Coordinó la sección de Medio Ambiente del Atlas Nacional de México (1992) y participó en la elaboración de cartografía sobre inundaciones para el Nuevo Atlas Nacional de México (2007). Ha desarrollado cartografía para diversos atlas temáticos y Programas Estatales de Ordenamiento Territorial. Es profesora en el Programa de Posgrado en Geografía de la UNAM. Asimismo ha sido coordinadora de Diplomados en Integración Territorial con fines de evaluación de riesgos y prevención de desastres (Instituto de Geografía, UNAM – CENAPRED). Es Miembro fundador de la Red Mexicana de Estudios Interdisciplinarios para la Prevención de Desastres;

c) Participaron también en este grupo de trabajo la M. en C. Pilar fernández Lomelín; la M. en C. Mayelli Hernández Juárez y el Geog. Sócrates Carlos Villar Pérez.

Este equipo de trabajo cuenta con una amplia experiencia y producción de trabajo científico original en los temas del Marco Natural del Ordenamiento Territorial y la Cartografía del Riesgo Ambiental; asimismo han impartido de manera sistemática cursos de posgrado en los temas relacionados con esas especialidades, como se puede apreciar en el análisis de los Curricula Vitae correspondientes, que se incluyen en el Anexo 1 de este Informe.

3.2 OBJETIVOS DEL EQUIPO DE TRABAJO

3.2.1 Objetivo General

Identificar las principales amenazas y zonas vulnerables en los sistemas agrícola y urbano de San Gregorio Atlapulco, así como describir los riesgos ambientales potenciales y validar la información de manera conjunta entre la PAOT, los especialistas y otras instancias que tengan atribuciones en la gestión de esta zona, a partir de la información disponible incorporada en el SIGP.

3.2.1 Objetivos Específicos

Mediante la elaboración de un diagnóstico integral sobre la situación que resguarda la zona chinampera de San Gregorio Atlapulco, basado en la integración de información proveniente de diferentes fuentes e instituciones públicas y la que se genere en el presente estudio.

La finalidad fue que esta información quedara compilada dentro de la herramienta informática de la PAOT, que sirva para toma de decisiones y para mejorar la gestión ambiental y urbana del sitio; para ello, conjuntamente este equipo de trabajo estableció como sus objetivos específicos los siguientes:

- Elaborar un plan de trabajo con un cronograma de actividades para analizar los aspectos conceptuales y de implementación de los productos esperados del proyecto.
- Identificar las principales amenazas y zonas vulnerables en los sistemas agrícola y urbano de San Gregorio Atlapulco, así como describir los riesgos ambientales potenciales y validar la información de manera conjunta entre la PAOT, los especialistas y otras instancias que tengan atribuciones en la gestión de esta zona, a partir de la información disponible incorporada en el SIGP.
- Delimitar las unidades espaciales (geosistemas), para la evaluación del riesgo y sus componentes.
- Identificar las amenazas (subsistencia, inundaciones, sequías, degradación de tierras, contaminación de agua, suelo y aire, plagas y enfermedades, y otros según información disponible y levantamiento de campo.
- Determinar los factores que generan vulnerabilidad en los sistemas agrícolas y urbanos.
- Estimar el riesgo (conjunción de amenazas y vulnerabilidad) en los sistemas agrícolas y urbanos.
- Elaborar la cartografía correspondiente a los puntos anteriores.
- Incorporar la información generada en un Sistema de Información Geográfica.

En este marco de referencia y para estimar el riesgo de desastre, el Grupo de trabajo del Marco Natural del Ordenamiento Territorial se propuso la siguiente formulación:

Riesgo de desastre = Amenaza x vulnerabilidad x grado de exposición

considerando las siguientes definiciones:

Amenaza: Peligro latente que representa la probable manifestación de un fenómeno físico de origen natural, socio-natural o antropogénico, que se anticipa puede producir efectos adversos en las personas, la producción, la infraestructura, y los bienes y servicios. Es un factor de riesgo físico externo a un elemento o grupo de elementos sociales expuestos, que se expresa como la probabilidad de que un fenómeno se presente con una cierta intensidad, en un sitio específico y dentro de un periodo de tiempo definido (CEPREDENAC-PNUD s/f).

Vulnerabilidad: Factor de riesgo interno de un elemento o grupo de elementos expuestos a una amenaza. Corresponde a la predisposición o susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que se manifieste un fenómeno peligroso de origen natural, socio natural o antrópico. Representa también las condiciones que imposibilitan o dificultan la recuperación autónoma posterior. Las diferencias de vulnerabilidad del contexto social y material expuesto ante un fenómeno peligroso determinan el carácter selectivo de la severidad de sus efectos (CEPREDENAC-PNUD s/f).

Vulnerabilidad Ambiental: Se entiende como la alteración de las condiciones ambientales debido a la intervención negativa del hombre, lo que conlleva a una debilidad e incapacidad de un ecosistema para absorber cambios y modificaciones en un espacio físico (Buch y Turcios, 2003).

Riesgo de desastre: Es la probabilidad de que se presente un nivel de consecuencias económicas y sociales adversas en un sitio particular y durante un tiempo definido que exceden niveles aceptables a tal grado que la sociedad o un componente de la sociedad afectada encuentre severamente interrumpido su funcionamiento rutinario y no pueda recuperarse de forma autónoma, requiriendo de ayuda y asistencia externa (CEPREDENAC-PNUD s/f).

Con ese enfoque, el equipo de trabajo sobre el Marco Natural del Ordenamiento Territorial y Riesgos Naturales, implementó la siguiente metodología, por objetivos específicos:

3.3 METODOLOGIA POR OBJETIVOS ESPECIFICOS

- a. La determinación de la amenaza, la vulnerabilidad social y ambiental y el riesgo derivado, se establecieron a partir de los geosistemas (unidades espaciales o territoriales de análisis que muestran una homogeneidad relativa en la interacción de los procesos naturales y socioeconómicos que ocurren dentro de ellas). Esto con la finalidad que el carácter integral de estas unidades facilite su evaluación y manejo.
- b. Para identificar y delimitar los geosistemas se utilizó la metodología de Cram *et al.* (2008). Asimismo, de acuerdo con Belem y Nucci (2011), se estableció el grado de naturalidad de los geosistemas o unidades espaciales por medio del análisis de la Hemerobia (que se define como una medida para evaluar la influencia antropogénica sobre los ecosistemas).
- c. Con objeto de conocer las amenazas se utilizaron indicadores que permitieron identificar los fenómenos de peligrosidad o amenaza de la zona a través de dos estrategias metodológicas: La superposición y adición de los distintos peligros concurrentes en el geosistema (superposición y adición *in situ*), y como alternativa, mediante la metodología de integración de las interacciones entre los distintos peligros que se identifican en el caso de que exista retroalimentación negativa o positiva (integración y transferencia espacio-temporal).
- d. El grupo tuvo en cuenta que la principal dificultad para estimar la vulnerabilidad social y ambiental no deriva la carencia de metodologías sino más bien la falta de información específica que permita aplicarlas. Por ello, exploraron varios enfoques metodológicos que se pueden adaptar a la información disponible y la escala elegida en la zona de estudio.
- e. Un primer enfoque de exámen fue el de Turner *et al.* (2003), quienes definen la vulnerabilidad como “la probabilidad de que el sistema sociedad-naturaleza, o cualquiera de sus componentes, sufra daño derivado de su exposición y sensibilidad frente a una amenaza, y de su capacidad para recuperarse y adaptarse una vez que la amenaza ha causado el daño”. Al concebirse como probabilidad, la vulnerabilidad

se puede cuantificar y entonces resulta operacional, no obstante esta característica, establecer la vulnerabilidad es muy complejo. El esquema de Turner *et al.* (2003) parte del supuesto de la existencia de una interacción entre condiciones y procesos humanos y ambientales a distintas escalas. El enfoque se basa en la relación ambiental y humana considerándola como un “sistema” y el estudio de la vulnerabilidad se centra en la determinación de la exposición, la sensibilidad y la resiliencia (Figura 5).

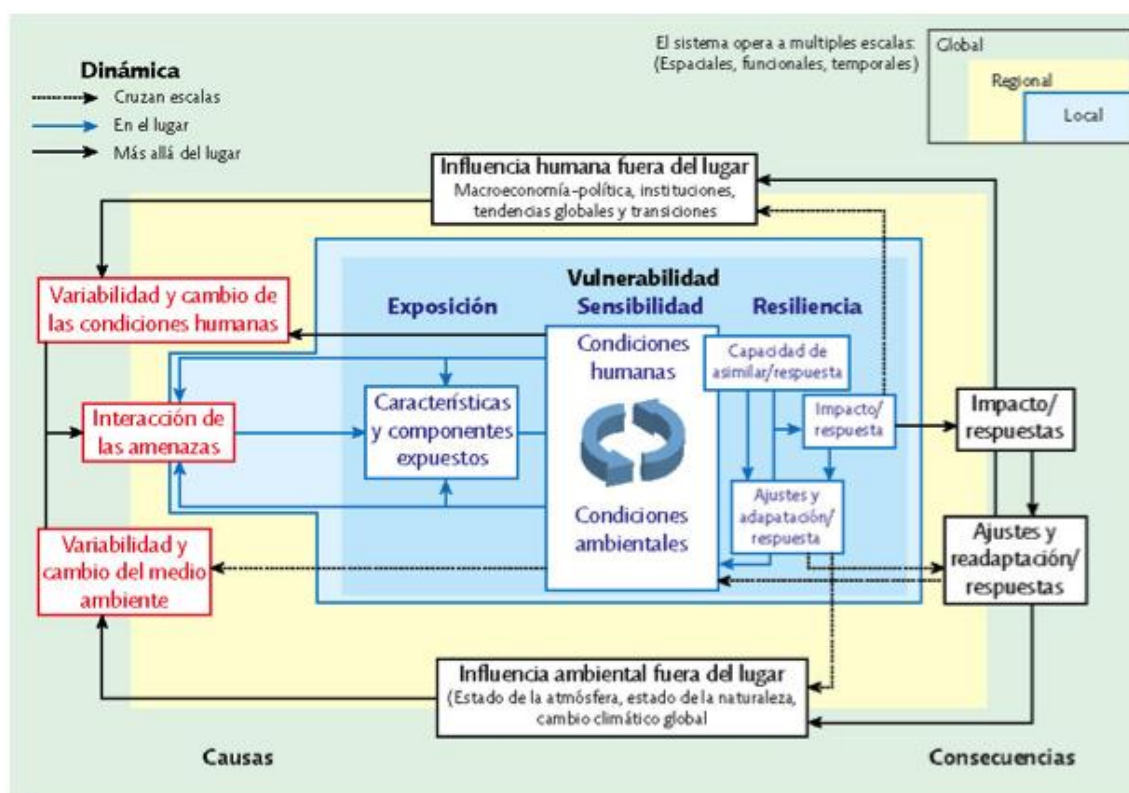


Figura 5. Esquema metodológico de Turner *et al.* 2003 (en Murillo 2013).

- f. Para integrar los resultados de la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas y urbanos se realizó un análisis multivariado aplicando el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) de Saaty (1982, en Banai-Kashani, 1989), cuyos pasos se muestran en la Figura 6.

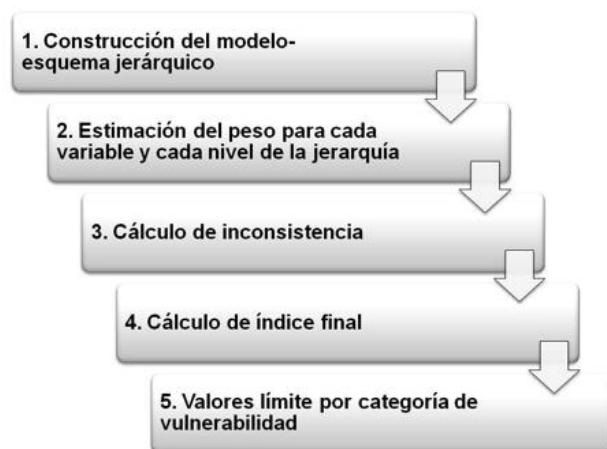


Figura 6. Pasos del Procedimiento de Análisis Jerárquico.

- g. Una segunda opción, fue la propuesta de Dwyer *et al.* (2004) para quienes desarrollan una metodología para cuantificar la vulnerabilidad social ante riesgos y amenazas de origen natural, en este caso, en ciudades urbanizadas de Australia ante la susceptibilidad por inundaciones y otros peligros naturales. Estos autores insisten en la importancia de considerar los aspectos socioeconómicos en la generación de desastres, así como en la mitigación de la vulnerabilidad ante los mismos. Su trabajo se enfoca en la valoración del riesgo por cuatro amenazas (ciclones, terremotos, sequías e inundaciones) y considera parámetros socioeconómicos para estimar la vulnerabilidad humana frente a amenazas naturales.
- h. El riesgo se estimó de manera cualitativa mediante el álgebra de los mapas de amenaza y vulnerabilidad utilizando la aplicación de funciones de cálculo, con operadores boléanos condicionales, a partir de este procedimiento se genera el mapa final en el cual se mostrarán los diferentes niveles riesgo resultantes.

3.4 RESULTADOS

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE PARA IDENTIFICAR LAS PRINCIPALES AMENAZAS Y ZONAS VULNERABLES EN LOS SISTEMAS AGRÍCOLA Y URBANO DE SAN GREGORIO ATLAPULCO

Dr. Mario Arturo Ortiz Pérez (Coordinador); Dra. Silke Cramer Heydrich, M. en C. Oralia Oropeza Orozco, M. en C. María del Pilar Fernández Lomelín, M. en C. Malleyi Hernández Juárez y Geog. Sócrates Carlos Villar Pérez

De la revisión detallada de la información bibliográfica y cartográfica proporcionada por la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal (PAOT) se derivan los siguientes comentarios generales:

- Como se menciona en el Programa Rector de Restauración Ecológica del Área Natural Protegida (ANP), zona sujeta a conservación Ecológica Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco (INECOL, 2002) ya desde hace varios años se cuenta con "diagnósticos válidos" y se señala que es menester pasar a otra etapa en la que se considere todo este trabajo previo y no partir de cero y además, que se debe trabajar para que "se logre contar con un orden y programa integral, aprobado por consenso y ejecutado coordinadamente", situación que no ha logrado llevarse a cabo.
- También es bien sabido desde hace mucho que tanto la restauración ecológica del ANP como la preservación de los servicios ambientales que esta zona de descarga del acuífero proporciona a la Ciudad de México "van de la mano", y que para implementar las acciones se requiere voluntad y decisión política del Gobierno del Distrito federal (GDF) en coordinación con todos los actores involucrados (sociales, académicos, gubernamentales, etc.).
- En el informe de 2002 se elabora una caracterización, en principio, muy completa de la zona de estudio considerando los aspectos físicos, biológicos y socioeconómicos, así como temas relacionados con cuestiones legales y administrativas. También se elabora un diagnóstico que considera la problemática hidrológica, de la flora y de la fauna (tanto terrestres como acuáticas), socioeconómica, etc.; sin embargo, es de

hacerse notar que dicho informe se basa en muy pocos trabajos específicos de la zona, como se ve reflejado en el apartado de Referencias Bibliográficas; otro comentario es que no se reporta la metodología que se siguió para realizar este trabajo que permita validar y darle seguimiento a la información, lo cual demerita la investigación tan completa que al parecer se realizó.

- Por ejemplo, en los diagnósticos (2002 y 2012) se reporta que existe contaminación por uso de plaguicidas, aguas residuales, etc., pero se mencionan pocas citas bibliográficas sobre estudios particulares en la zona y no hay documentos cartográficos que apoyen los análisis espaciales. Asimismo, debe ser rescatable la información sobre quién realizó el estudio, cuándo y cómo lo hizo, en donde se tomaron las muestras (sitios georreferenciados para ubicarlos en un mapa, puesto que no se deben hacer extrapolaciones con base en un muestreo mal diseñado), qué resultados se obtuvieron, etc.
- Dentro del Diagnóstico actualizado y tendencias de la problemática del ANP (INECOL, 2012) se menciona que han sido continuas las denuncias, evidencias y datos que indican la mala calidad y contaminación del agua del lago, canales y pozos y se ratifica que la alteración de la dinámica del agua subterránea y de la permeabilidad y la compactación del sustrato (por extracción y consecuente hundimiento) son causas de contaminación del acuífero, lo cual pone en riesgo la calidad del agua potable y su disponibilidad para el consumo humano a pesar de ser un bien ambiental crítico para la Cd. de México.
- Es importante señalar que para poder caracterizar la amenaza, estimar la vulnerabilidad y calcular la probabilidad del riesgo por contaminación se requiere contar con información de calidad, es decir, se debe partir de estudios confiables, sobre los cuales se construya una base de datos en donde pueda ser rastreable la información recabada. Hay muchos trabajos sobre contaminación que se han realizado en la zona por varios grupos de investigación y que se sabe trabajan en la zona y es necesario rescatar para elaborar el plan de monitoreo como se propone en el estudio de 2012.

Con base en la revisión de información documental y cartográfica referida y de otros trabajos consultados, fue posible la elaborar un primer diagnóstico de las principales amenazas, las condiciones de vulnerabilidad de los paisajes de la zona chinampera y lacustre de Xochimilco en la zona de San Gregorio Atlapulco y los riesgos a los que están expuestos. Asimismo, se hace mención de una serie de propuestas sobre los trabajos que deben realizarse como continuación de lo que ya está hecho, con la finalidad de que la zona de estudio siga manteniendo su categoría de Área Natural Protegida Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco (ANP-EXSGA)).

Como un resultado crítico de su análisis, este grupo de trabajo considera será esencial para la gestión futura del ANP-EXSGA el manejo de un marco conceptual que sea común a todos los usuarios o grupos de trabajo, ya que en el transcurso de la revisión documental no se identifica una integración de la información que se presenta lo cual es parte del discurso en casi todos los trabajos y se presta a confusión porque muchas veces una amenaza actúa como causa, pero es, a su vez, efecto de otra, dificultando su evaluación. Por ello, el grupo de trabajo se propuso tratar primero los componentes del riesgo (amenaza y vulnerabilidad) por separado, y posteriormente integrarlos para identificar el riesgo en el marco conceptual definido como aplicable. En este marco fue necesario discutir y profundizar en quiénes son los objetos de vulnerabilidad ¿los paisajes naturales, los antrópicos y/o el paisaje urbano y su población? ya que de ello dependen las amenazas que deben incluirse.

También fue posible identificar que existe una gran cantidad de información sobre el área, no obstante, ésta no está ordenada, particularmente en lo que concierne a la cartografía; ya que numerosos mapas temáticos sobre los diferentes paisajes, ambientes, o usos del suelo de la zona de estudio de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco, no utilizan la misma clasificación de unidades espaciales de análisis. Lo anterior dificulta realizar evaluaciones comparativas multitemporales pues, por ejemplo, en algunos mapas se considera el ambiente lacustre como una unidad separada del palustre y en otros mapas se presentan como una sola unidad. Por lo que en etapas subsecuentes será indispensable validar la información para seleccionar sólo aquella de relevancia y aplicabilidad para cualquier usuario o grupo de trabajo.

Asimismo el análisis de la cartografía disponible permitió identificar que no en toda es posible determinar las escalas de trabajo y que el nivel de información varía desde lo general y regional hasta lo local, por lo que a futuro será prioritario establecer los criterios comunes para la definición de las unidades espaciales de análisis, sean éstas: paisajes, unidades ambientales, geosistemas, microcuencas, para que puedan ser aplicables por todos los actores involucrados (académicos, gubernamentales, ONGs y sociedad civil). De esta manera, el SIG Participativo constituirá una herramienta de gran importancia para el manejo de la información, de preferencia en tiempo real (bases de datos, documentos, mapas editados, capas espaciales, etc.) por los tomadores de decisiones y los diversos actores sociales. En términos generales se advierte que en la información disponible se tratan cualitativamente las amenazas y la vulnerabilidad de los paisajes, pero, en la mayoría de los casos, no se reporta información cuantitativa y faltan levantamientos sistemáticos para determinar las tendencias y conformar los escenarios de riesgos.

3.4.1 Elementos de Vulnerabilidad

3.4.1.1. Paisajes de San Gregorio Atlapulco y Zona de Influencia

Los paisajes identificados en los estudios previos se reclasificaron en los siguientes:

1. Acuáticos (Lacustre/palustre/canales)
2. Chinampas
 - 2.1. Tradicional
 - 2.2. Con invernaderos/vivienda
3. Terrenos agropecuarios
 - 3.1 Agricultura de temporal
 - 3.2 Ganadería
4. Urbano
 - 4.1. Consolidado (asentamientos regulares)
 - 4.2. No consolidado (asentamientos irregulares)

3.4.2. Factores de Riesgo

Los factores de riesgo identificados en el área (amenazas regionales y locales) fueron:

- Subsistencia
- Inundaciones
- Contaminación
- Variabilidad de aportes hídricos
- Descargas de aguas residuales
- Degradación de canales
- Disposición de cascajo
- Deforestación y pérdida de cobertura vegetal en partes altas y chinampas.
- Tiraderos a cielo abierto
- Salinidad y sodicidad
- Plagas y enfermedades
- Introducción de especies exóticas.
- Proceso de urbanización
- Falta de coordinación entre actores sociales y acuerdos administrativos
- Corrupción y falta de transparencia
- Poco interés de la población en la conservación
- Cambios en las formas de producción agrícola
- Desarraigo de actividades agrícolas tradicionales
- Actividades turísticas
- Cambios de uso del suelo

3.4.3 Análisis del sistema proceso-respuesta

El análisis del sistema proceso-respuesta preliminar de los factores de riesgo (amenaza) del medio biofísico, socioeconómico y socio-administrativo-ambiental, hizo evidente que existe una estrecha relación entre los paisajes acuático, chinampas, terrenos agropecuarios y urbano (naturaleza-sociedad), éstos se reconocen como un sistema complejo si se parte del hecho que sus elementos interactúan y se relacionan entre ellos,

de forma tal que no es posible separarlos, por lo que el conjunto de sus relaciones constituye la estructura que lo hace funcionar como una totalidad. El modelo conceptual presenta los tipos o posibles amenazas más importantes de los medios biofísico, socioeconómico y socio-administrativo-ambiental que se describirán en el reporte final.

A continuación se ejemplifica con el tema de contaminación la forma en que se abordaron las amenazas prioritarias:

La contaminación del agua (superficial y subterránea), del sedimento, del suelo y del aire por efecto de las actividades agrícolas y pecuarias (aplicación de agroquímicos, abonos, agua de riego) y por las actividades urbanas -emisiones sólidas (basura), líquidas (aguas negras crudas y tratadas) y gaseosas (procesos de combustión), trae como consecuencia una reducción de la calidad del agua, sedimentos, suelo y aire y, por ende, afecta a los organismos acuáticos y terrestres, disminuye el rendimiento y la calidad de los cultivos que se producen en las chinampas, y reduce la calidad de vida de la población.

En el estudio del INECOL (2002) se menciona que esta amenaza afecta a todos los paisajes (agrícola, palustre, paisaje urbano pre-existente o incluido en la declaratoria, paisaje urbano no pre-existente o no incluido en la declaratoria); sin embargo, no se ve reflejada en el diagnóstico la magnitud de la contaminación en las diferentes matrices (agua, sedimento, suelo, aire y biota). Entre las fuentes potenciales de contaminación que se enlistan en el documento del INECOL (2002) se encuentran:

- Descargas de aguas residuales municipales, industriales o de asentamientos irregulares que se vierten directamente en el agua de los canales;
- Depósitos de residuos sólidos (tiraderos a cielo abierto) o líquidos (zonas de regadío);
- Aplicación de fertilizantes, herbicidas y pesticidas;
- Depositación atmosférica seca y húmeda (cenizas, polvos, partículas); y
- Salinidad y sodicidad de suelos

Algunas evidencias de contaminación en la zona que se pueden mencionar de la revisión de otras fuentes son:

3.4.3.1 Agua

- Se ha documentado la presencia de plaguicidas organoclorados y fosforados en sedimentos (Alcántara, 2013), de metales en lirio acuático (Carrión *et al.* 2012) y bacterias patógenas (Juárez-Figueroa *et al.*, 2003, Solís *et al.*, 2003).
- Por las entradas de agua al sistema (aguas negras, de escorrentía, lluvia) se espera también la presencia de otros compuestos orgánicos (hidrocarburos aromáticos policíclicos, hormonas y antibióticos, dioxinas y furanos) que se han reportado en aguas residuales de la Ciudad de México (Dalkmann *et al.*, 2012 y otros países (Gharbi *et al.*, 2010).
- Estos contaminantes tienen un impacto sobre la calidad del agua, reduciendo la calidad del hábitat por toxicidad, cambios en el estado trófico, disminución de oxígeno disuelto, salinización, incremento en poblaciones bacterianas patógenas, ciclo del detritus modificado, entre otros, generando efectos adversos sobre la biota como son cambios bioquímicos y fisiológicos en el ajolote (Robles-Mendoza *et al.* 2009), disminución de la respuesta inmune (Robles Mendoza *et al.*, 2012) y bioacumulación de metales (Carrión *et al.*, 2012).
- También reducen la calidad del agua para su uso como agua potable y de riego, por la presencia de concentraciones elevadas de sales y elementos y compuestos tóxicos (Zambrano *et al.*, 2009).

3.4.3.2 Suelo

Se ha detectado la presencia de metales (Ponce de León *et al.*, 2010), plaguicidas (Chávez, 2012) y procesos de salinización y sodificación (Krasilnikov *et al.*, 2001). Ésto reduce la calidad del suelo para la agricultura y puede representar un riesgo de transferencia de contaminantes en la cadena alimentaria (Ponce de León *et al.*, 2010).

Los contaminantes pueden inhibir a la microbiota edáfica (Shivakumar *et al.*, 2011) y con ello alterar procesos como la mineralización de materia orgánica y el del aporte de nutrimentos a las plantas.

3.4.3.3 Aire

Se presume la presencia de contaminantes como ozono, óxidos de azufre, óxidos nitrosos, bióxido de carbono y material particulado que contenga metales e hidrocarburos aromáticos policíclicos, que han sido reportados en el aire de otras ciudades (Emberson *et al.*, 2001). Éstos pueden causar efectos adversos sobre los organismos por depositación seca y húmeda en suelos y cuerpos de agua.

3.4.4 Metodología de desarrollo del modelo conceptual

El modelo conceptual de este estudio se generó con base en una discusiones y talleres en los que ha participado el grupo académico multidisciplinario que ha trabajado en diferentes aspectos del ANP de Xochimilco y/o tiene experiencia en evaluaciones de riesgo en otras áreas. Los pasos para el desarrollo del modelo retoman algunas de las propuestas de Tian *et al.*, 2010, Chávez *et al.*, 2011, entre otros fueron los siguientes:

1. Recopilar y analizar la información disponible histórica y actual del área de estudio.
2. Delimitar la problemática del área de estudio con base en la información disponible y las escalas de trabajo.
3. Definir el enfoque de la evaluación de riesgo y de sus componentes: vulnerabilidad (paisajes) y amenaza (estresores).
4. Identificar las amenazas e indicadores relevantes.
5. Describir las rutas por las cuales las amenazas pueden afectar al sistema e identificar a los receptores.
6. Elaborar un listado de factores de amenaza (físico-biológico, socioeconómico y socioadministrativo-ambiental) que podrían afectar el sistema. Debe hacerse un inventario de los conductores (drivers) naturales y antropogénicos y de las amenazas asociadas.
7. Seleccionar los indicadores o atributos que puedan medirse o monitorearse; esta etapa es crítica para la evaluación del estado del sistema, temporal y espacialmente.
8. Desarrollar gráficamente el modelo conceptual.

3.4.5 Modelos Conceptuales, Matriz y Mapa generados en el estudio

3.4.5.1 Factores de riesgo: amenazas y vulnerabilidad

De acuerdo con los criterios analizados previamente, para los fines de este estudio se elaboró el correspondiente modelo conceptual del sistema Proceso-Respuesta que se muestra en la Figura 7, donde se expresa la retroalimentación de los diferentes factores de amenaza del medio biofísico, socioeconómico y socio-administrativo-ambiental; determinándose asimismo organizar e integrar los factores de riesgo en la correspondiente matriz de factores de amenazas y vulnerabilidad de los paisajes de San Gregorio Atlapulco, la cual se presenta en la Figura 8.

3.4.5.2 Identificación espacial de los factores y caracterización del riesgo

A partir del modelo conceptual generado, de la matriz referida y de los estudios previos proporcionados por la PAOT, Asimismo permitió establecer un primer Modelo Conceptual de Riesgo Ambiental por Contaminación en San Gregorio Atlapulco, que se presenta en la Figura 9 y con base en estos elementos se procedió a la preparación del mapa para identificar espacialmente los factores de amenaza y la vulnerabilidad de los paisajes (caracterización del riesgo). El plano resultante (que se presenta en la Figura 10), se elaboró sobre la capa de paisajes (PAOT, 2012); en su realización se identificaron 44 factores de amenaza, de los cuales nueve son físico-biológicos, 15 socioeconómicos y 20 socioadministrativo-ambientales. Por la frecuencia de los principales factores se estableció un grado de vulnerabilidad aproximada, considerando que a mayor concentración de factores, mayor susceptibilidad de los paisajes de sufrir un impacto ambiental y social, lo cual nos lleva a una estimación preliminar del riesgo. Cabe señalar que, la concentración de factores no determina el grado de intensidad de la afectación, ya que un sólo factor puede causar un gran impacto. Los paisajes con la categoría muy alta de vulnerabilidad pertenecen a los Urbanos (no consolidados o asentamientos humanos irregulares) y a los Terrenos agropecuarios (agricultura de temporal). El resto de los paisajes: Acuáticos, Chinampas (tradicionales y con vivienda e invernaderos) y pastizal/ganadería se encuentran en la categoría alta.

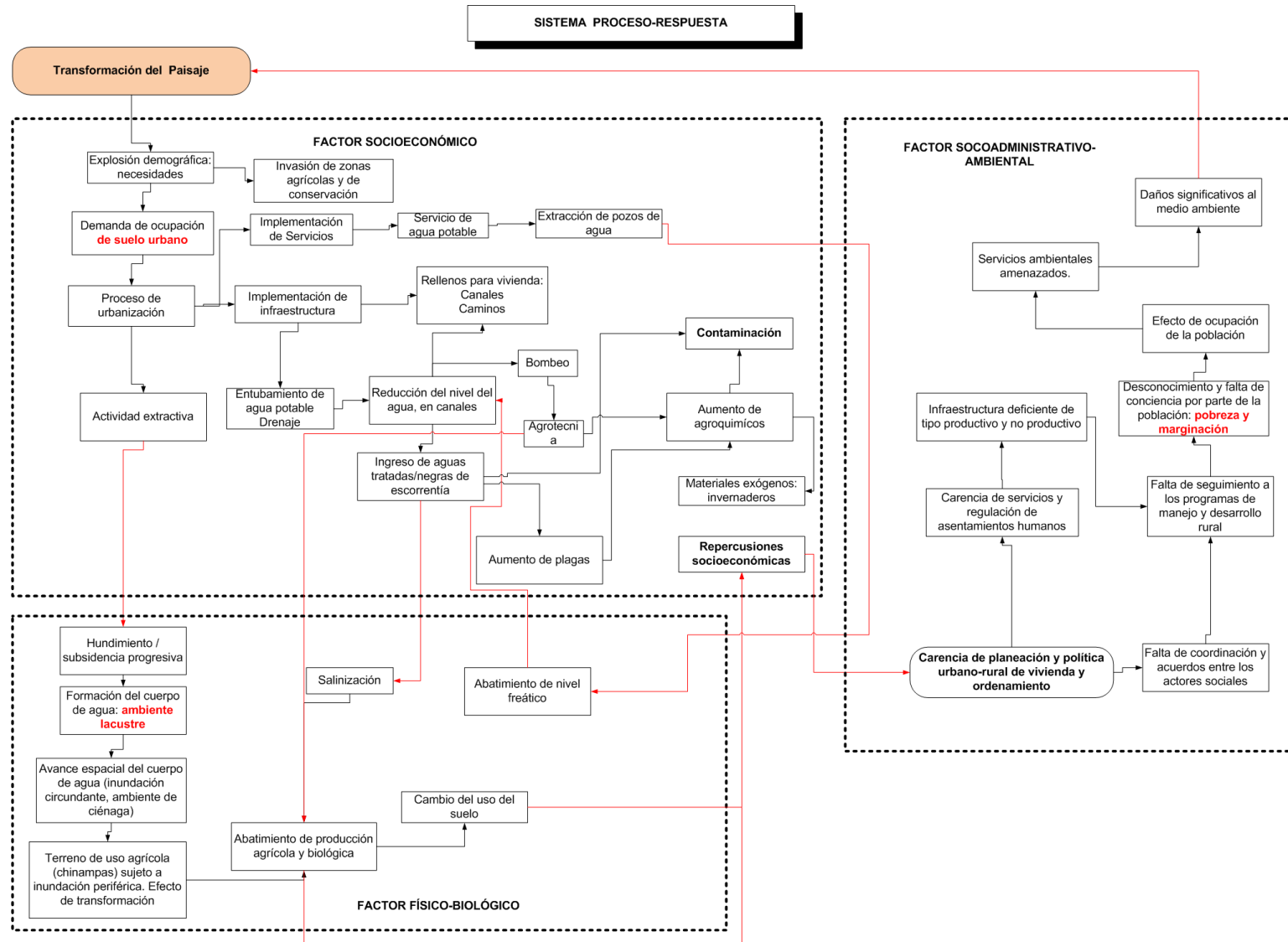


Figura 7. Modelo conceptual del Proceso-Respuesta de los factores de riesgo (amenaza) del medio biofísico,

socioeconómico y socio-administrativo-ambiental.

TIPO DE AMENAZA		PAISAJES "VULNERABLES"						
Paisajes	Amenaza	ACUÁTICO	CHINAMPAS		TERRENOS AGROPECUARIOS		SEDANO	
		Lacustre/superficial	Tradicional	Inundadero / Inundado	Agricultura de temporal	Pastoral/ganadería	Cuantitativa	No cuantitativa
VARIABILIDAD DE APORTES hídricos	Lluvia [excesiva/escasa]							
	Excesiva [excesiva/escasa]							
	Agua negra [localizada y aislada]							
	Disminución del nivel freático							
	Calidad del agua superficial y subterránea							
EXTRACCIÓN DE AGUA	Inundación							
ABATIMIENTO DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA Y BIOLÓGICA	Permanencia de especies nativas							
	Cambio de uso de suelo [Pérdida de paisaje natural y semirural transformado]							
FACTOR SOCIOECONÓMICO								
URBANIZACIÓN	Rellenos: caminos y bordes; parcelas; chinampas; inundaderos; inundado y; canchales							
	Reclamación en zonas de canchales							
	Infraestructura y servicios							
	Extracción de agua de agua							
	Reclamación irregular							
	Disponibilidad de vivienda							
DEFORESTACIÓN	Cambio de forma de producción agrícola: inundaderos							
	Aplicación de materiales sólidos: arena, grava, tierra de monte							
	Pérdida de cobertura vegetal en las parcelas altas y en las chinampas							
CONTAMINACIÓN: agua [superficial y subterránea], suelo y aire	Agua negra [agotamiento]							
	Agua negra [localizada y aislada]							
	Resaca [inundación, quince y auxiliar]							
	Plagas y enfermedades							
	Tiraderos a cielo abierto							
	Salinización y acidificación							
	Desarrollo de aguas residuales							
	Degradación de canales							
DESAPARICIÓN DE CAÑALES	Degradación de canales							
	Extracción de chinampas							
FACTOR SOCIOADMINISTRATIVO- AMBIENTAL								
DESCONOCIMIENTO Y FALTA DE CONCIENCIA POR PARTE DE LA POBLACIÓN	Desarrollo de salinidad agrícola tradicional							
	Cambio cultural							
	Falta de interés por parte de la población a seguir con su conservación							
DISMINUCIÓN DE CALIDAD DE VIDA	Marginación							
	Edificación							
FALTA DE TRANSPARENCIA	Corrupción							
INFRAESTRUCTURA DEFICIENTE	Producción							
	No producción							
CARENCIA DE SERVICIOS Y REGULACIÓN DE ASENTAMIENTOS HUMANOS								
FALTA DE SEGUIMIENTO A PROGRAMAS	Manejo de AMP							
	Desarrollo Rural							
	Política administrativa							
FALTA DE COORDINACIÓN Y REQUERIMIENTO ENTRE LOS USUARIOS	Asedfines							
	Privada							
	Social							

Figura 8. Matriz de los factores de amenaza y vulnerabilidad de los paisajes de San Gregorio Atlapulco, Xochimilco

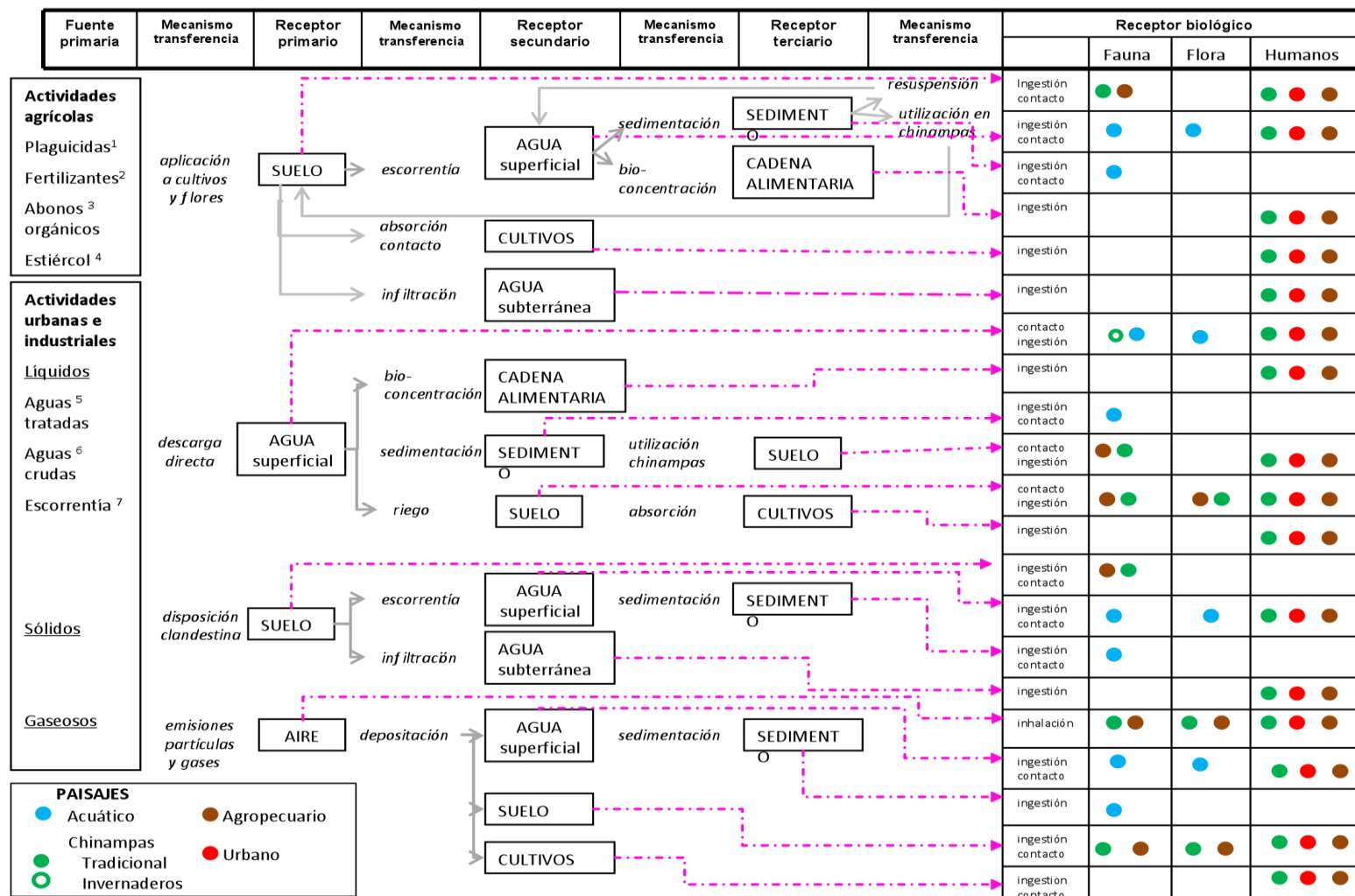


Figura 9. Modelo conceptual de riesgo ambiental por contaminación en San Gregorio Atlapulco, Delegación Xochimilco.

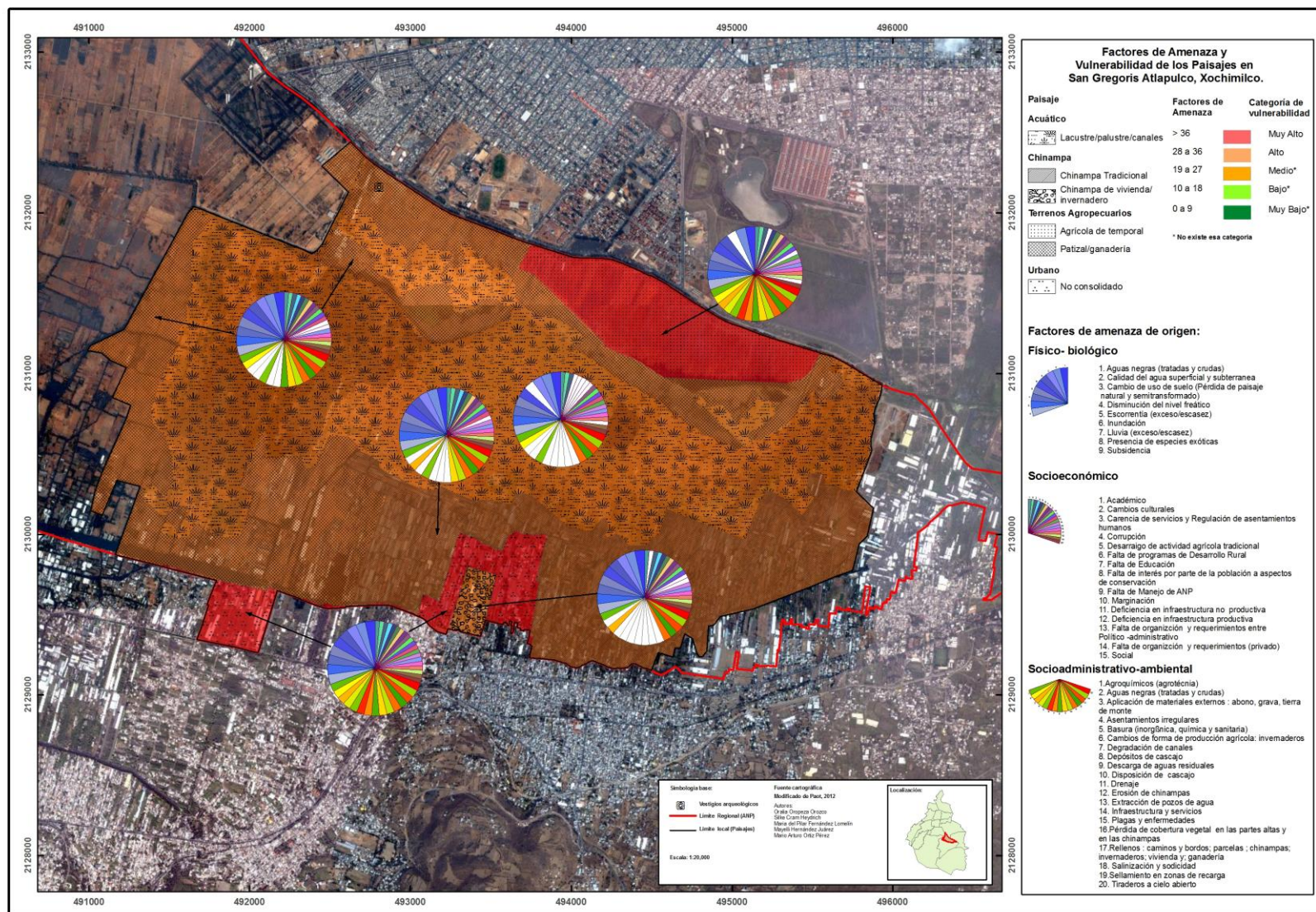


Figura 10. Identificación espacial de los factores de amenaza y la vulnerabilidad de los paisajes (caracterización del riesgo) a partir de estudios previos proporcionados por la PAOT.

En este marco de referencia es indispensable considerar que los modelos conceptuales son herramientas no-cuantitativas que identifican los principales detonantes y factores conductores de cambios en un sistema (Tian, *et al.* 2010). Idealmente se discuten y diseñan en el seno de un grupo multidisciplinario de expertos para proporcionar un marco de referencia, estructurado y bien definido a través del cual se puedan relacionar los diferentes procesos y permitan una retroalimentación.

La utilidad de los modelos conceptuales es que permiten formular propuestas integrales de investigación, para explicar y describir la estructura, el funcionamiento y la dinámica de un sistema; o bien para elaborar una estrategia de análisis para el proceso de evaluación de riesgo y proponer líneas de acción y medidas preventivas, ya que a través del modelo conceptual se establecen las relaciones entre los componentes y facilitan la discusión y debate acerca de la naturaleza y gestión del sistema de interés. Estos modelos son de fácil visualización y sintetizan conocimientos complejos haciéndolos una herramienta útil para el desarrollo de políticas públicas por parte de las autoridades, tomadores de decisiones, académicos y, en general, todos los actores sociales involucrados aunque no tengan un conocimiento profundo de la problemática.

Por ello, se han hecho muchas propuestas de modelos conceptuales para estudiar procesos de construcción del riesgo con el fin de analizar la respuesta de diferentes sistemas a determinados estresores, tanto naturales como antrópicos, considerando los componentes del riesgo (amenaza y vulnerabilidad) (Turner *et al.*, 2003; Miller *et al.*, 2010; Tian, *et al.* 2010; Chávez *et al.*, 2011), porque son herramientas flexibles que reflejan el estado actual y global del conocimiento científico del sistema que se está estudiando.

Dado que cada territorio tiene sus propias características y problemáticas, las cuales deben abordarse de manera particular, este tipo de modelos resultan prácticamente trajes a la medida, pudiéndose ajustar a escalas espaciales y temporales definidas. Además, deben ir evolucionando con el tiempo, a medida que se va generando nueva información que permita actualizar el modelo.

Sin embargo, el modelo conceptual del Sistema Proceso-Respuesta de este estudio difiere de los métodos tradicionales de análisis de información en que no es reduccionista y se puede abordar desde diversos enfoques y disciplinas y una de sus fortalezas es que siempre se establece un haz de relaciones entre los subsistemas (físico-biológico, socio-económico y socio-administrativo-ambiental) que componen el modelo. Si bien, se analiza lo local o focal, no se pierde de vista el contexto regional que puede tener una gran influencia. Este tipo de modelo permite visualizar si un efecto es potenciado o amortiguado por otros factores. Lo anterior implica un manejo de la problemática a diferentes escalas.

3.5.6 Propuesta de Atlas Participativo de Amenazas y Vulnerabilidad

Con base en el diagnóstico realizado, este grupo de trabajo propone la estructura preliminar de un Atlas Participativo, para integrarlo en la parte del SIG-Participativo de la PAOT que corresponde a las amenazas, la vulnerabilidad y el riesgo en la zona de estudio de San Gregorio Atlapulco, Delegación Xochimilco. La estructura, que se presenta en la Figura 11 se podrá integrar a la estructura general del SIG-Participativo una vez que haya sido revisada y aceptada por los distintos grupos académicos que integran el proyecto, así como por los representantes de la PAOT y los diversos actores sociales involucrados.

Para esos fines en la Figura 12, se presenta el modelo lógico espacial del subsistema correspondiente al riesgo de la zona de San Gregorio Atlapulco, indicando la secuencia de las diferentes etapas metodológicas de un ordenamiento territorial y de la gestión de riesgos, con un enfoque integral en el marco del desarrollo sostenible o sustentable, cuya aplicabilidad ha quedado demostrada en los estudios sobre desastres que en su ocurrencia tuvo que ver la ocupación del espacio y su utilización, y como señala Gómez-Orea (2008): *“la mayoría de los desastres tiene en común el hecho de que los riesgos que los precedieron estaban determinados por el uso del suelo, se podían prevenir o mitigar y, por tanto, disminuir sus impactos a través de la planificación territorial”*.

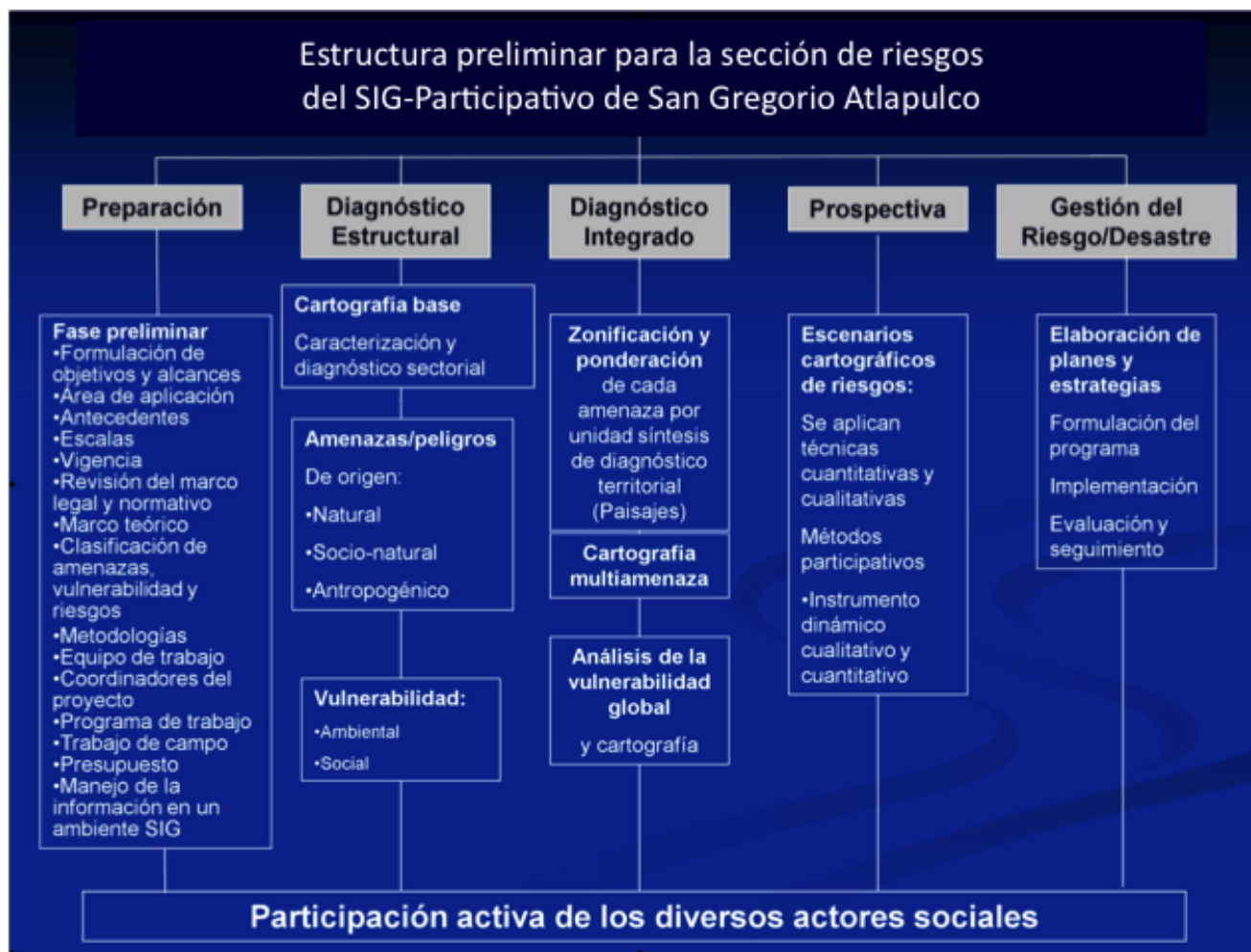


Figura 11. Esquema de la estructura preliminar de un Atlas Participativo de San Gregorio Atlapulco que se propone para integrarse al SIG Participativo de la PAOT.

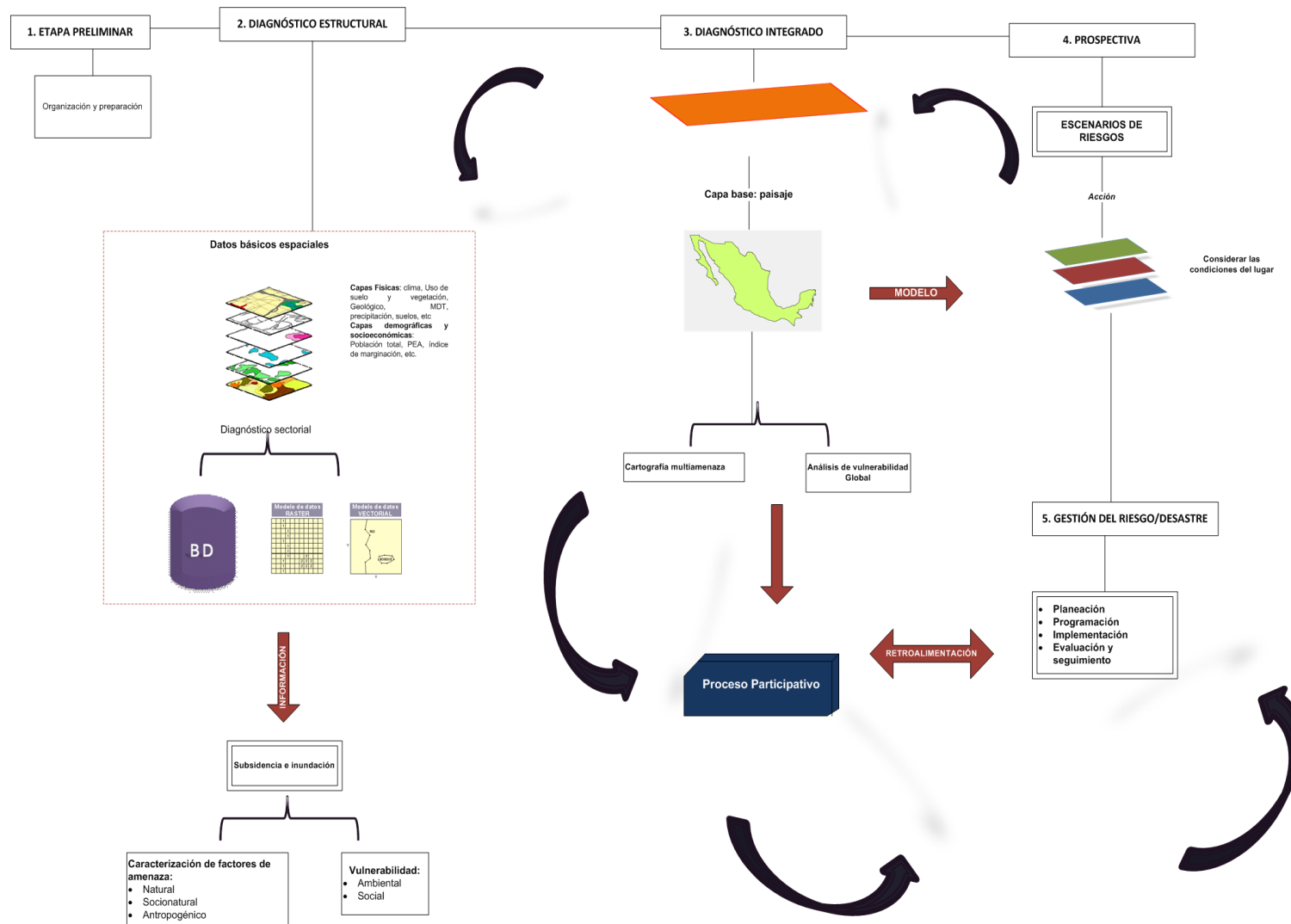


Figura 12. Modelo lógico espacial del subsistema correspondiente al riesgo de la zona de San Gregorio Atlapulco, Delegación Xochimilco.

Por lo anterior, diseñar un Atlas Participativo, desde una perspectiva de ordenamiento territorial y, con orientación hacia la gestión del riesgo, ofrecerá importantes elementos para redefinir los usos del suelo de la zona de estudio, conciliando los diversos intereses y, a la vez, podrá sustentarse en el contexto legal, normativo y programático correspondiente, para facilitar la seguridad y reducir el riesgo. De esta manera, el atlas ayudaría a establecer qué, cómo y dónde llevar a cabo las diferentes actividades para minimizar los riesgos e impactos que pueden generarse por la ocurrencia de algún fenómeno o proceso peligroso, ya sea de origen natural o antropogénico.

En este marco las cinco etapas o fases que se muestran en la Figura 12, coinciden con las que normalmente se utilizan en el ordenamiento territorial:

- Preparación (Fase preliminar);
- Caracterización y diagnóstico estructural; diagnóstico integrado (diagnóstico territorial);
- Prospectiva o diseño de escenarios;
- Formulación del programa de gestión de riesgos, implementación y, evaluación y seguimiento.
- En todas las etapas debe existir la participación activa de los actores sociales que de alguna forma intervienen.

Si bien, todas las etapas son importantes, la de preparación es la más relevante pues de ésta depende en gran medida el éxito o el fracaso del Atlas. Entre los aspectos a considerar en esta fase se encuentran: la formulación de objetivos y alcances; área de aplicación; antecedentes; las escalas; vigencia; revisión del marco legal, normativo y programático; concertación de un marco teórico-conceptual; clasificación de amenazas, vulnerabilidad y riesgos; metodologías; equipo de trabajo; coordinadores del proyecto; programa de trabajo; trabajo de campo; equipo e infraestructura; presupuesto; manejo de la información en un ambiente SIG.

De éstos a continuación se describen brevemente algunos de ellos.

Formulación de objetivos y alcances.

Objetivo general. Elaborar un diagnóstico integral sobre la situación que resguarda la zona chinampera de Xochimilco mediante la integración de información proveniente de diferentes fuentes e instituciones públicas y la que se genere en el presente estudio, con la finalidad que ésta quede compilada dentro de una herramienta informática que sirva para la toma de decisiones y mejore la gestión ambiental y urbana del sitio.

Área de aplicación.

Corresponde a San Gregorio Atlapulco, su entorno local y regional.

Antecedentes

Se refiere a todos los trabajos previos que se han realizado sobre la zona en cuestión. Al respecto, cabe mencionar que existe una gran cantidad de información, pero como ya se señaló en el informe anterior, ésta está dispersa, además no está ordenada, particularmente en lo que concierne a la cartografía, por lo que se necesita recopilarla, organizarla, clasificarla y validarla.

Escalas

Aunque el Atlas permite el manejo multiescalar, las escalas de trabajo son locales y de sitio (1: 2,000, 1: 5,000, 1:10,000, 1:20,000), sin embargo también están contempladas escalas grandes y regionales (1:50,000, 1:250,000) para establecer las relaciones que tienen un ámbito espacial más amplio.

Vigencia de la información

Con frecuencia, en países como el nuestro, se acepta que los Atlas tengan una validez o utilidad aproximada entre dos y cinco años; sin embargo, este atlas ofrecerá la ventaja de su actualización permanente, prácticamente en tiempo real, pues su retroalimentación estará a cargo de la PAOT, esto facilitará a los tomadores de decisiones el diseño de políticas públicas para mitigar y reducir los riesgos en la zona de estudio.

Revisión del marco legal normativo y programático

La gestión del riesgo debe ser congruente con el contexto legal y los programas deben elaborarse en relación con los diversos instrumentos normativos y programas correspondientes a los diferentes órdenes de gobierno y a diferentes escalas de aplicación territorial.

Por ejemplo, el programa o programas de manejo del área de San Gregorio Atlapulco deben estar dentro de un marco legal que se fundamente en: Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Ley de Planeación, Ley General de Asentamientos Humanos, Programa Nacional de Desarrollo Urbano y Ordenación del Territorio, Programas de Ordenamiento Ecológico Regional y Local, Planes de Manejo de Áreas Naturales Protegidas, Plan de Manejo Forestal, Programa para la Acuacultura Ordenada, Programa de Turismo Sustentable, Plan de Desarrollo Delegacional, Plan Delegacional de Desarrollo Urbano, Plan Parcial de Desarrollo Urbano, Reglamento de Usos del Suelo, entre otros.

Marco teórico-conceptual

Si no se cuenta con un marco teórico, por lo menos se deben establecer, por consenso, los principales conceptos que se manejan en la gestión del riesgo, pues es imprescindible utilizar un lenguaje común entre los diversos sectores de la población interesada en su análisis y también para considerar su expresión cartográfica y no confundir la amenaza con el riesgo o con la vulnerabilidad. A este propósito, en el primer apartado de este informe se incluye el modelo conceptual de riesgo (amenaza y vulnerabilidad) en la zona de San Gregorio Atlapulco y área de influencia.

Clasificación de amenazas, vulnerabilidad y riesgos

Permite identificar, crear bases de datos e inventarios, realizar evaluaciones y prevenir, entre otros aspectos. En la Figura 10, se muestra el mapa de factores de amenazas y vulnerabilidad ambiental que se han identificado en el área de estudio.

Por las características intrínsecas del Atlas Participativo, se aplican diversas metodologías, cualitativas y cuantitativas (análisis jerárquico, Análisis multicriterio, método booleano, superposición de mapas, etc.)

Equipo de trabajo

Para desarrollar el Atlas es fundamental un equipo multidisciplinario. Los coordinadores del proyecto deberán ser los representantes de la PAOT en conjunto con diversas instituciones académicas.

La función del Atlas Participativo se vería muy limitada si no se construyera sobre la plataforma del sistema de información geográfica (SIG) participativo de la PAOT, el cual constituye una herramienta esencial para la creación de bases de datos georreferenciados, generación de cartografía base a diferentes escalas y de cartografía temática sobre amenazas, vulnerabilidad y riesgos, realización de análisis espaciales, escenarios, metadatos y la visualización de la información.

Las siguientes etapas: caracterización y diagnóstico estructural; diagnóstico integrado (diagnóstico territorial); prospectiva o diseño de escenarios; formulación del programa de gestión de riesgos, implementación y, evaluación y seguimiento, se ejemplifican en la Figura 12 que corresponde propiamente al diseño del Atlas Participativo.

3.5.7 Referencias clave sobre el Modelo Conceptual

American Society for Testing and Materials International. 2003. *Standard guide for developing conceptual site models for contaminated sites E 1689-95* (reapproved 2003). [Norma Consensual Voluntaria]. W. Conshohocken, PA. 8 pp.

Atlantic Richfield Company. 2009. *Conceptual site model for the Yerington mine site, Lyon County, Nevada (revision 3)*. January 30, 2009. La Palma, CA. [Reporte Técnico] por Brown & Caldwell, Carson City, NV and Integral Counsulting Mercer Island, WA. 97 pp.
<[http://yosemite.epa.gov/r9/sfund/r9sfdocw.nsf/3dc283e6c5d6056f88257426007417a2/439fba9a58394ca0882575610072a061/\\$FILE/Conceptual%20Site%20Model%20%20Revision%203%20%20013009%20\(LS\).pdf](http://yosemite.epa.gov/r9/sfund/r9sfdocw.nsf/3dc283e6c5d6056f88257426007417a2/439fba9a58394ca0882575610072a061/$FILE/Conceptual%20Site%20Model%20%20Revision%203%20%20013009%20(LS).pdf)>.

- Bureau of Land Management. 2001. *Streamlined risk assessment Red Devil Mine Alaska*. [Reporte Técnico] por Karl L. Ford, Ph.D., National Science and Technology Center. Denver, CO. 20 pp.
<http://www.blm.gov/pgdata/etc/medialib/blm/ak/afo/hazmat/RDV_CERCLA_AR.Par.4122.File.dat/RDV%202000-0704%20Streamlined%20Risk%20Assessment%20Red%20Devil%20Mine,%20AK.pdf>.
- Chávez C., Castro J., Díaz-Barriga F. y Monroy M. 2011. Modelo conceptual de riesgo ambiental por arsénico y plomo en el distrito minero de Santa María de la Paz, San Luis Potosí, México. *e-Gnosis*, 9: 1-25.
<http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5133/pdf/sir20105133.pdf>
- Guzmán-Martínez M.C. y Ramírez Romero P. 2004. Modelo conceptual de la evaluación del riesgo ecológico por fototoxicidad de HAPs en el Caribe Mexicano. p. 76. En: *Memorias del 1er Congreso de la Asociación Mesoamericana de Ecotoxicología y Química Ambiental A.C.* 22-26 marzo 2004. Jiutepec, Morelos, México.
- Miller, D.M., Finn, S.P., Woodward, Andrea, Torregrosa, Alicia, Miller, M.E., Bedford, D.R., and Brasher, A.M. 2010. Conceptual ecological models to guide integrated landscape monitoring of the Great Basin: U.S. Geological Survey. *Scientific Investigations Report 2010-5133*, 134 p.
- Pereira R., Ribeiro R., Gonçalves F. 2004. Plan for an integrated human and environmental risk assessment in the S. Domingos mine area (Portugal). *Hum. Ecol. Risk Assess.* 10(3): 543-578.
- Ruíz-Saucedo U. 2006. *Guía técnica para orientar la elaboración de estudios de evaluación de riesgo ambiental de sitios contaminados*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Eds.), Primera Edición, 256-261. SEMARNAT, México, D.F.
<<http://www.semarnat.gob.mx>>.
- Tian, J.H.; Wang, J.H.; Liu, Z.C.; Li, H.C.; Wang, X.Z.; Xie, D.Y.; Tian, Y.K.; Liu, F.C.; Yu, X.J. 2010. A Conceptual Ecological Model of Cangzhou Coastal Wetlands, Hebei Province, China. *Procedia Environmental Sciences* 2: 1002-1011

- United States Environmental Protection Agency. 1989. *Risk assessment guidance for Superfund volume I human health evaluation manual (part A)*, EPA/540/1-89/002. Office of Emergency and Remedial Response (Eds.), 287 pp. USEPA, Washington, D. C.
- United States Environmental Protection Agency. 1991. *Guidance for performing preliminary assessments under CERCLA*, EPA/540/G-91/013. Office of Emergency and Remedial Response (Eds.), 166 pp. USEPA, Washington, D. C.
- United States Environmental Protection Agency. 1991. *Risk assessment guidance for Superfund: volume I - human health evaluation manual (part B, development of risk-based preliminary remediation goals)*, EPA/540/R-92/003. Office of Emergency and Remedial Response (Eds.), 65 pp. USEPA, Washington, D. C.
- United States Environmental Protection Agency. 1998. *Guidelines for ecological risk assessment*, EPA/630/R-95/002F, 188 pp. USEPA, Washington, D. C.
- United States Environmental Protection Agency. 2003. *Conceptual model and RI/FS SOW Callahan Mining Superfund Site, Brookville, Maine*. [Reporte Técnico] por Metcalf & Eddy, Inc., Wakefield, MA and TRC Environmental Corporation, Lowell, MA. 72 pp.
<<http://www.epa.gov/region1/superfund/sites/callahan/44290.pdf>>.
- Van Dam R., Finlayson M., Bayliss P. 2004. *Progress on the development of a conceptual model of contaminant pathways from Ranger uranium mine. Registry File SG2004/0107*. Internal Report 474. [Reporte Técnico] por Environmental Research Institute of the Supervising Scientist, Department of the Environment and Heritage, Australian Government. Darwin, NT. 40 pp.
<<http://www.environment.gov.au/ssd/publications/ir/pubs/ir474.pdf>>.

4. REPORTE DEL GRUPO TEMATICO: DINAMICA HIDRAULICA (Funcionamiento del Agua Subterránea)

4.1 EQUIPO DE TRABAJO

El Dr. Joel Carrillo Rivera coordinó el trabajo con la Doctora en Hidrogeología Samira Ouyse, la cual es especialista en la evolución del clima en el agua subterránea y en la evaluación del funcionamiento del sistema de flujo del agua subterránea en México para reducir los impactos de la sequía. Ambos cuentan con una amplia experiencia y producción de trabajo científico original sobre la dinámica hidráulica y el funcionamiento del agua subterránea, incluyendo la impartición sistemática de cursos de posgrado en los temas relacionados con esa especialidad, como se puede apreciar en el análisis de los Curricula Vitae correspondientes, que se incluyen en el Anexo 1 de este Informe.

4.2 OBJETIVOS DEL EQUIPO DE TRABAJO

- Analizar la información de la región de la planicie lacustre Xochimilco y Tláhuac aplicable al caso que entregue la PAOT y la se encuentre asequible para los fines de este estudio, referente a la explotación de pozos para extracción de agua potable y a la calidad del agua de dichos pozos y/o a la contaminación del acuífero del que se surten.
- Llegar a conclusiones sobre la extracción de agua mediante pozos en la región y si éste proceso puede considerarse un factor determinante del hundimiento dentro del ANP-EXSGA y/o del riesgo de contaminación del agua subterránea.

4.3 METODOLOGIA POR OBJETIVOS ESPECIFICOS

4.3.1 Diagnóstico de la subsidencia

El análisis de la información asequible sobre la dinámica hidráulica, el funcionamiento del agua subterránea, la calidad del agua del acuífero y el hundimiento en la zona de estudio, se realizó considerando que el riesgo por hundimiento y contaminación al agua subterránea se puede resumir en dos rutas fundamentales:

Directa: En el caso del hundimiento en Ciudad de México, las medidas de recuperar el nivel del agua superficial en la zona chinampera con agua contaminada (tratada sólo a nivel secundario) implica el riesgo que ésta puede migrar al subsuelo y de allí a los pozos de extracción de agua para uso potable.

Indirecta: Cuando se extrae agua subterránea en una forma incontrolada, los abatimientos producidos inducen la entrada vertical ascendente de agua alterando la calidad del agua extraída.

Asimismo este equipo de trabajo, consideró crítico definir los procesos y control del hundimiento observado del suelo en la región lacustre de Xochimilco, así como la posible contaminación al agua subterránea, para estar en posibilidad de elaborar el diagnóstico sobre la respuesta de la subsidencia que guarda la zona chinampera de Xochimilco integrando información proveniente de diferentes fuentes e instituciones públicas así como de tesis de grado y la que se genere en el presente estudio.

Se estima que esto permitirá mejorar la toma de decisiones en materia de recomendar cuidar la extracción para que sea acorde con los resultados de este análisis lo que implica al final estar en posibilidad de sugerir una mejor gestión ambiental y urbana de la zona; para lo cual se llevó a efecto la siguiente metodología por objetivo específico:

a. Identificación y compilación de información (en x,y,z,t) de la región de la planicie lacustre Xochimilco y Tláhuac aplicable al caso sobre:

- Evolución del caudal de extracción de pozos de agua potable y otros existentes.
- Evolución de la posición del nivel freático en (los pozos de) la zona.
- Variación de la calidad del agua en lago, canales, y agua subterránea extraída.
- Información generada sobre la subsidencia en la zona.
- Información de la litología del subsuelo.

b. En lo particular se buscó:

- Analizar la información (proporcionada por la PAOT y la obtenida en este trabajo) sobre la evolución del caudal de extracción de agua subterránea, niveles freáticos, calidad del agua, velocidad de subsidencia y litología del subsuelo para identificar la relación entre extracción, hundimiento y calidad del agua.
- Definir el riesgo potencial de contaminación del agua subterránea de acuerdo con la dinámica de manejo de la hidráulica subterránea que se lleva a cabo.
- Elaborar un plan metodológico para proponer el control de la subsidencia bajo condiciones específicas de campo, las cuales estarán dadas en particular por la columna estratigráfica a identificar.
- Establecer limitaciones para efectuar el manejo ambiental de la zona en particular respecto al agua subterránea incluyendo la respuesta hidrogeológica esperada en caso de realizar acciones de recarga artificial al sistema analizado.
- Contar con datos necesarios para establecer recomendaciones sobre la protección de la calidad del agua subterránea a fenómenos de contaminación.
- Analizar la información proporcionada por la PAOT sobre la extracción de agua mediante pozos en la región, y determinar si con base en ella es posible considerar la relación entre extracción y hundimiento; incorporando el riesgo de contaminación al agua subterránea.
- Elaborar nueva información sobre las causas y control del hundimiento y evolución de la calidad del agua de la zona, a partir del procesamiento de información e insumos asequibles, así como imágenes de levantamiento LIDAR, fotografías aéreas, etc.

4.4 RESULTADOS

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DOCUMENTAL Y ESPACIAL DISPONIBLE EN TORNO A LA EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO MEDIANTE POZOS DE EXTRACCIÓN Y CALIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA, DEFINIENDO LOS ALCANCES DE ESTA PARA EL PRESENTE ESTUDIO.

Dr. José Joel Carrillo Rivera y Dra. Samira Ouyse

A partir del análisis de los datos documentales y espaciales disponibles el grupo de trabajo encargado del tema de la dinámica hidráulica (funcionamiento del agua subterránea), determina que la posibilidad llegar a conclusiones sobre la explotación del acuífero mediante pozos de extracción de agua potable, sobre efecto de esta explotación en el proceso de subsidencia regional y sobre la calidad actual del agua del acuífero en la zona de Xochimilco de interés para este estudio, especialmente por sus implicaciones para el Área Natural Protegida “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco” (ANP-EXSGA); depende estrictamente de la cantidad y pertinencia que, para esos fines, tengan los registros que conforman el banco de datos que genera y resguarda el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX).

Hasta el momento del cierre de este informe, la base de datos que proporcionó el SACMEX a petición de la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal (PAOT) para los fines de este estudio, comprende únicamente la localización georreferenciada de los bancos de nivel oficiales distribuidos en el Distrito Federal y los registros de la subsidencia que a partir de los mismos ha recabado el SACMEX, lo cual solo permite el análisis sobre ese tema pero no así sobre los temas de la explotación del acuífero mediante pozos o sobre la calidad actual del agua del acuífero.

No obstante, en el periodo de este informe se realizaron reuniones técnicas entre PAOT, el SACMEX y los expertos de este estudio, para definir términos de referencia que permitan contar a futuro con información específica sobre ubicación de los pozos en activo, pozos cancelados, registros de extracción y de otros parámetros de análisis de agua.

D69304717284

Del análisis correspondiente, se concluye que la base de datos recibida comprende la localización georreferenciada de numerosos puntos distribuidos en todo el Distrito Federal y registros de extracción y subsidencia que entregó el SACMEX referidos a esos puntos específicos, que originalmente se consideró correspondían a pozos de extracción, pero que posteriormente el SACMEX informó que correspondían a los bancos de nivel oficiales.

Al respecto, fue posible determinar que dichos registros no son continuos en el tiempo (por ejemplo se reportan 1983, 1985, 1987, 1989, etc) y asimismo que los datos reportados son los promedios anuales sin incluir los mensuales, por lo que no permiten el cálculo la velocidad de subsidencia, así como otros cálculos indispensables para llegar a conclusiones significativas.

También se determinó en la base de datos, la carencia de registros de años anteriores a los 1983 lo impide determinar la subsidencia total. Por otra parte, la serie de los datos de la subsidencia terminan en el 2007 y los datos de extracción inician en el 2009, por lo cual no hay correspondencia, lo que imposibilita hacer cálculos de la relación entre ambos procesos. Otro obstáculo identificado son las unidades en que se reportan los registros de extracción por ejemplo: anual $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

También a partir del análisis del banco de datos entregado se determinó que los registros de la subsidencia no se localizan en la zona de interés (chinampas y lago) y que el punto más cercano está a una distancia del orden de un kilómetro.

Sin embargo y dando cumplimiento a los objetivos de la licitación, todos los registros de subsidencia en centímetros y de extracción en metros cúbicos por segundo entregados por el SACMEX a la PAOT, ubicados en la periferia del Área Natural Protegida de los Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco, fueron analizados a detalle elaborándose a partir de ellos el plano de localización georreferenciada de cada sitio y el orden de magnitud correspondiente para la extracción y la subsidencia reportadas, así como la ficha de metadatos correspondiente a cada uno, como se muestra en la Figura 13.

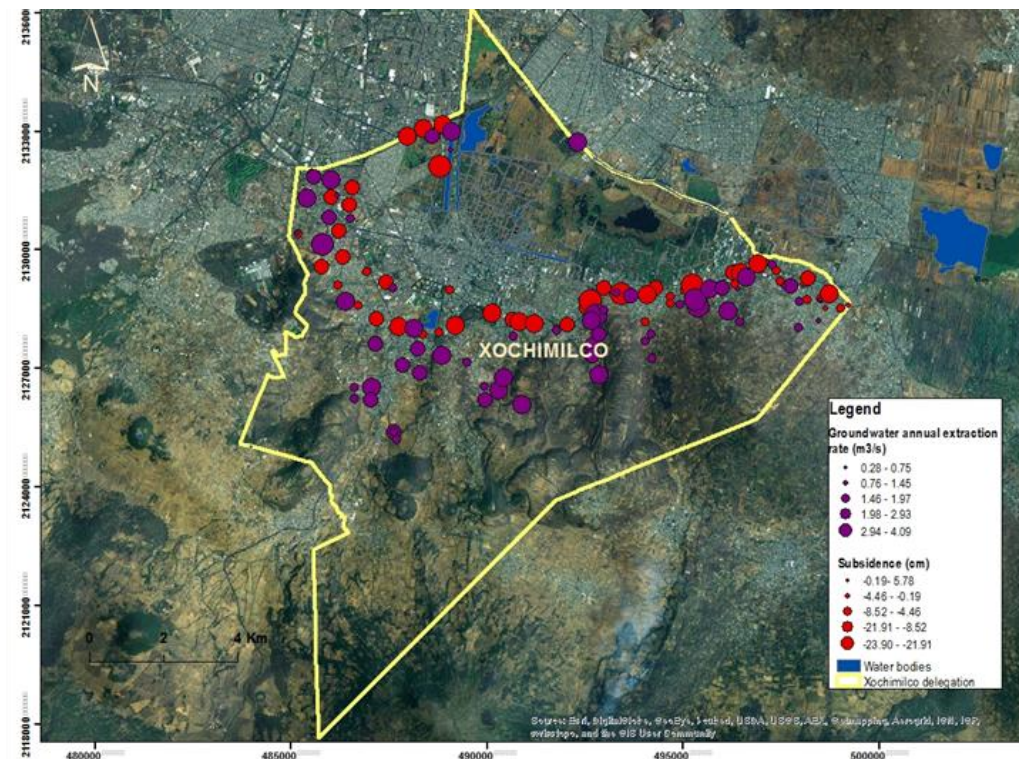


Figura 13. Plano generado en este estudio de la localización georreferenciada de los sitios reportados por SACMEX en el banco de datos entregado a la PAOT, seleccionados por su proximidad al ANP-EXSGA incluyendo los órdenes de magnitud reportada para la extracción y la subsidencia en cada uno.

4.4.1. Consideraciones Críticas

Por lo anterior, este equipo de trabajo aprecia crítico manifestar, describir y precisar en este informe, las bases conceptuales y los procesos que determinan y controlan hundimientos como los que están ocurriendo en el suelo en la región lacustre de Xochimilco, Tláhuac y Chalco, así como la posible contaminación del agua subterránea; a partir de las bases científicas aplicables y del análisis de los datos proporcionados por el SACMEX; cuya integración en este estudio y las preguntas que surgen de su confrontación, se presenta de manera detallada en las siguientes secciones, con la finalidad de fijar las bases para poder dar continuidad al análisis de la extracción, la subsidencia y la calidad del agua, en caso que existan otras bases de datos que lo posibiliten y que puedan ser puestas a disposición por los responsables correspondientes.

4.4.2. Controles del funcionamiento del hundimiento en el D.F. y de la calidad del agua extraída por pozos.

La visión hidrogeológica para definir la dinámica del hundimiento del suelo de la cuenca de México sobre el que se asienta el Distrito Federal y en particular el hundimiento relacionado con el Área Natural Protegida de los Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco, en el marco de este estudio, postula que al establecer el funcionamiento del hundimiento se podrá inferir sus controles y aquellos de la calidad del agua extraída por pozos. Por ello, para entender y tratar de establecer el funcionamiento actual del hundimiento en relación con la extracción del agua subterránea en el ANP-EXSGA, se considera fundamental considerar cuidadosamente los aspectos conceptuales principales, así como los criterios y experiencia internacional aplicándolos específicamente al caso de este estudio como se relaciona a continuación.

4.4.2.1 El Concepto de Hundimiento

La disminución progresiva o repentina de la elevación superficial de tierra, definida como hundimiento del suelo, tiene diversos condicionamientos principalmente relacionados con el ambiente urbano. Estas condiciones implican sobre todo la evolución geológica de una

región que determina el tipo de formaciones de roca y sedimentos, la presencia de la materia prima natural, la morfología, el suelo, la presencia de agua subterránea y la complejidad ecológica donde ciudades como la de México, a menudo se encuentran localizadas. La evolución del ambiente urbano se liga de cerca a la extracción de unas o más materias primas naturales, que bajo situaciones particulares pueden exponer a la población urbana al riesgo asociado al hundimiento del suelo y que afecta negativamente la integridad de la cubierta característica urbana (infraestructura, pública y privada), y también de implicar un costo de los daños asociados del orden de millones de pesos.

El hundimiento es un problema global (Figura 14). Más de 200 casos se han divulgado en el mundo (encuesta internacional del USGS con base en datos del hundimiento del suelo) y es factible que este número puede aumentar mucho más en un futuro próximo, pues las causas y la evolución se entienden mejor.

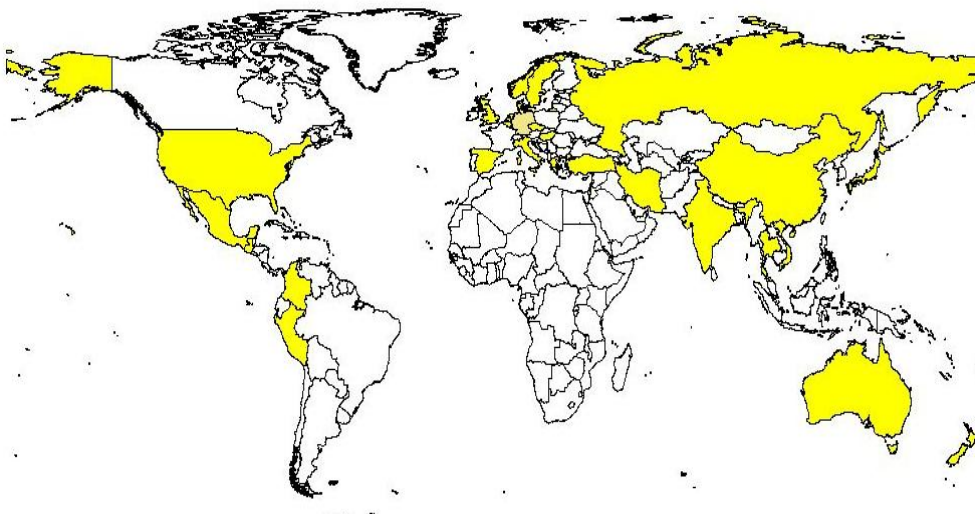


Figura 14. Países con problemas de hundimiento del suelo (USGS).

Debido a la importancia y a las implicaciones del hundimiento del suelo, la organización educativa, científica y cultural de los Naciones Unidas (la UNESCO) incluyó este concepto a estudiar bajo el Programa Hidrológico Internacional (IHP). Cada país tiene la responsabilidad de recoger, de mantener, y de interpretar los datos relacionados básicos

(extracción de agua, características geotécnicas, explotación minera, etc) y las condiciones asociadas del hundimiento del suelo con la participación de organizaciones profesionales de ingeniería representada por las áreas de Ciencias de la Tierra, de Mecánica de Suelos, de hidráulica subterránea, geológica y geofísica, así como compañías consultoras y grupos de investigación de las universidades.

Desde principios del siglo XX en la Cuenca de México se han realizado estudios científicos y técnicos sobre el hundimiento del terreno relacionado con la extracción de agua subterránea destacando investigaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Así mismo, se han escrito trabajos que tratan sobre el material de relleno de la cuenca y que aflora en su parte topográficamente más baja, en especial el acuitardo así como estudios hidrogeológicos que abordan con profundidad la dinámica natural y antrópica del agua subterránea (Durazo y Farvolden, 1989; Ortega y Farvolden, 1989; SMA, 1999; Carrillo-Rivera, et al., 1998; Edmuds, et al., 2002).

Sin embargo, los crecientes impactos ambientales identificados en la cuenca desde los primeros manantiales desecados en la primera mitad del siglo XX (cuya desaparición coincide con un auge en la construcción de pozos en Xochimilco y otros lugares de la cuenca), la consolidación del suelo, o el daño a la salud de la población debido al creciente deterioro de la calidad del agua subterránea que se extrae por medio de pozos, indican que el enfoque disciplinar y fragmentado de los estudios realizados, no ha sido el adecuado.

Existen dos principales causas del hundimiento del suelo: (i) por condiciones naturales (influencia tectónica, respuesta sísmica, relación agua meteórica-roca) y (ii) por influencia antrópica (extracción de petróleo, minerales o agua subterránea). La extracción del agua subterránea puede provocar o activar varios impactos ambientales como son: extensión de fallas geológicas, agrietamiento y/o consolidación del suelo.

La consolidación del suelo es la compactación de una unidad volumétrica de material geológico causada por un cambio de esfuerzos. En este caso la variable de respuesta es un cambio en la presión de poro (P_{poro}) que en cualquier punto de la zona saturada es

usualmente una respuesta de la disminución de la presión hidráulica ($P_{\text{hidráulica}}$) ya que la presión total (P_{total}) ahí sentida se debe mantener constante, de acuerdo a la relación:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{poro}} + P_{\text{hidráulica}}$$

Dado que la presión total se mantiene constante, al disminuir la presión hidráulica la respuesta se manifiesta como reducción del volumen del material poroso afectado, y esto se traduce a su vez como subsidencia o hundimiento del terreno.

Existen cuatro fenómenos físicos ligados al proceso antes descrito, que contribuyen a una reducción de la presión de poro, pero cuyo efecto es frecuentemente subestimado, de acuerdo con Bouwer (1978), estos son:

- a) Reemplazo de agua fría por agua caliente ($P_{\text{hidráulica}}$ es función de la temperatura del agua)
- b) Transferencia de agua a otro estrato geológico.
- c) Cambio de dirección del flujo ascendente (de descarga) a flujo descendente (recarga).
- d) Construcción de infraestructura pesada sobre el suelo.

Los dos primeros fenómenos se vinculan con el manejo local del agua subterránea, ya que la extracción puede inducir localmente el ascenso de agua termal de menor densidad desde unidades geológicas más profundas, lo cual produce una reducción de carga hidráulica, y en consecuencia un aumento en la presión de poro. La segunda, es una respuesta indirecta relacionada con el flujo de agua del acuitardo hacia el material acuífero subyacente, cuando existe comunicación hidráulica entre ambos (condiciones confinadas) ya que al extraer agua un pozo del material acuífero induce un goteo desde el acuitardo hacia la capa acuífera subyacente. Debido a la baja conductividad hidráulica del acuitardo, y a la gran porosidad de este material, éste pierde un volumen similar al

volumen del goteo, el cual no es repuesto en forma natural, pérdida de volumen que se manifiesta como subsidencia.

El tercer fenómeno indica un cambio en la dirección del flujo que se presenta como abatimiento regional del nivel freático, abatimiento que es la sumatoria de varios efectos como el cambio de uso de suelo (y efecto en las condiciones de recarga), así como la extracción de agua subterránea de sistemas de flujo regionales (cuya recarga se genera fuera de la cuenca superficial). Este fenómeno se vincula con excesivo abatimiento de la superficie freática cambiando las condiciones de descarga de una superficie freática somera a una superficie profunda que permite incluir condiciones de recarga, lo que implica por un lado dejar a la vegetación existente fuera del alcance del agua necesaria para su subsistencia y por el otro la desaparición de manantiales que abastecían de agua a los habitantes del vecindario y ecosistemas involucrados. El cuarto es debido a la construcción de infraestructura citadina sobre el suelo lo que produce la compactación del material y esto se manifiesta como hundimiento del suelo.

4.4.2.2 Consolidación y Subsidencia

La *consolidación* también se puede ver como un proceso que define el cambio de volumen de un material (geológico) como respuesta a una acción que permite el escape de una porción del volumen de agua almacenado. En mecánica de suelos, es el proceso de compactación asociado con el drenaje (normalmente) de una capa de arcilla (Freeze y Cherry, 1979). Aunque existen aspectos adicionales que los expertos en mecánica de suelos manejan para casos particulares (despresurización, cambio de temperatura del agua, cambio de dirección de movimiento del agua subterránea, construcción de infraestructura). En general, se puede considerar que los procesos de la migración de agua y la despresurización son los que principalmente controlan la consolidación en la zona de interés. Los otros tres (cambio de temperatura del agua, cambio de dirección de movimiento del agua subterránea, impacto por construcción de infraestructura) han tenido un impacto adicional todavía no cuantificado y que evidentemente es de considerar para entender el funcionamiento de la respuesta a la extracción intensiva que es manifestada como la *consolidación final observada*:

Si en la unidad afectada por la extracción (acuífero), si la carga hidráulica en éste disminuye en una cantidad $-\delta h$, el aumento en el esfuerzo efectivo $d\sigma$, está dado por $\rho g \delta h$, y la consolidación en el acuífero se reflejará como una reducción en el espesor b , que se manifiesta como subsidencia.

$$\delta b = -\alpha b \rho g \delta h$$

dónde:

α , compresibilidad del medio geológico

ρ , densidad del fluido

g , aceleración de la gravedad

En una arcilla (acuitardo) compresible cubriendo una unidad acuífera, al extraer un caudal Q del acuífero, la carga hidráulica en éste disminuirá con el tiempo y como la carga hidráulica en el acuitardo no será afectada directamente por la extracción, esto permitirá que agua fluya del acuitardo (unidad hidrogeológica de material lacustre arcilloso de textura muy fina y de baja conductividad hidráulica) hacia la unidad acuífera.

En el caso de la Subcuenca de la Ciudad de México se han realizado un universo de investigaciones sobre las diversas propiedades de la capa de material arcilloso presente en el subsuelo. De esta información se ha establecido la respuesta de esa capa a la extracción puntual (en la unidad acuífera subyacente por medio de pozos). De acuerdo con Terzaghi (1943) se ha ligado el valor del coeficiente de consolidación, C_v , con la conductividad hidráulica, K , para obtener el valor del coeficiente de almacenamiento específico (unitario), S_s . El valor unitario así obtenido, se usa para calcular el valor representativo del espesor total, b , de la capa de material arcilloso. El coeficiente de consolidación es similar al concepto de difusividad hidráulica, D , de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$D = T/S$$

que es igual a

$$C_v = T/S$$

donde:

$$T = K b$$

$$S = S_s b$$

El parámetro S se usa para calcular la cantidad de agua que puede ceder la capa de material arcilloso hacia el acuífero mientras este último no se encuentre en condiciones libres (no condiciones semi-confinadas). Así, este tipo de relaciones se han usado durante la calibración de modelos de flujo para definir en forma indirecta el coeficiente de almacenamiento del espesor total de la arcilla, por medio de calibrar un modelo del balance hídrico. Aspecto que si bien tiene un uso particular en proyectos de mecánica de suelos, su integración en la problemática del agua subterránea requiere de una concepción más realista de las condiciones en las que se encuentran los materiales de acuífero y capa del acuitardo.

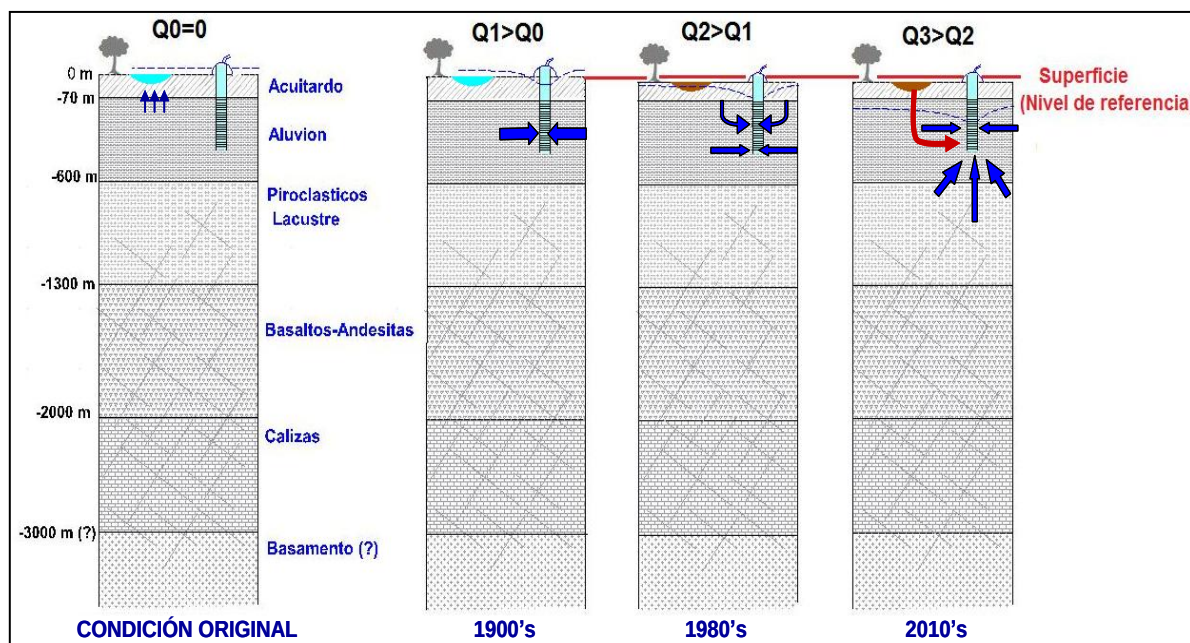
En otras palabras, el valor de S_s es disimilar para todo el espesor del acuitardo, en consecuencia los errores en la medición de S_s representarán un acomodo de las respuestas no incluidas en el hundimiento medido por el cambio de temperatura del agua extraída, por el cambio de dirección de movimiento del agua subterránea, y por el impacto por construcción de infraestructura sobre la ciudad.

En este proyecto es deseable abordar una visión hidrogeológica del sistema en su conjunto para definir y entender la dinámica del hundimiento del suelo del sur de la cuenca de México sobre el que se asienta la zona de Xochimilco, en particular el hundimiento relacionado con el suelo de conservación del Área Natural Protegida de Xochimilco. Se postula que al establecer el funcionamiento del hundimiento se podrán inferir sus controles y aquellos de la calidad del agua extraída por pozos. Adicionalmente, será factible incorporar esquemas de observación enfocados a ratificar los procesos postulados.

Es evidente que para la zona de estudio, se considere fundamental establecer el funcionamiento actual del hundimiento en relación con la extracción del agua subterránea.

En efecto y como se describe en la Figura 15, los primeros cambios al funcionamiento hidrológico original (época con la condición original, $Q_0 = 0$) fue la extracción en condiciones artesianas donde los cuerpos de agua eran resultado de la descarga de flujos de agua subterránea presentes desde antes de fines del siglo IXX y que fue descrita por

el funcionamiento de los primeros pozos profundos construidos a partir de 1847. Así a principios del siglo XX la extracción ($Q_1 > Q_0$) estaba dada por la respuesta de presión hidrostática en la cuenca dada la limitada cantidad de agua subterránea extraída. Posteriormente, el caudal de extracción aumentó ($Q_2 > Q_1$) induciendo agua del acuitardo y produciendo no sólo hundimiento sino el deterioro progresivo de la calidad del agua extraída por pozos para abastecimiento; adicionalmente la extracción por intercepción directa del agua de los manantiales produjo el secado de las lagunas y canales lo que se “resolvió” inyectando agua residual tratada e los cuerpos de agua superficial. En la fase actual se tiene un caudal de extracción definitivamente mayor ($Q_3 > Q_2$) que ha producido un abatimiento del nivel freático por debajo de la base del acuitardo, adicionalmente existe un flujo inducido de agua de los cuerpos de agua superficial hacia los pozos de extracción y la entrada de agua profunda resultado de flujos de tipo intermedio que circulan a profundidad. La entrada de estos flujos ha sido manifiesta por el aumento de la temperatura del agua extraída por pozos.



Nota: Diagrama fuera de escala

Figura 15. Evolución de la extracción del agua subterránea en la Ciudad de México.

Por ello, en esencia se considera factible establecer controles del hundimiento y de la calidad del agua a extraer si se define con claridad la relación sistémica existente entre la respuesta de subsidencia y de la calidad del agua extraída con la cantidad del agua de extracción y la evolución del nivel freático en el tiempo. Información que se estima permitirá lograr clarificar el funcionamiento del sistema y a través de esto proponer formas de control de la calidad del agua extraída y de la velocidad de consolidación del material geológico implicado .

4.4.2.3 Profundidad al Nivel Freático, Evolución y Hundimiento

Un elemento importante desde la perspectiva ambiental es la profundidad al nivel freático, en especial cuando ésta es muy somera o el nivel aflora en superficie, debido a que propicia la presencia y/o permanencia de diversas comunidades de seres vivos. Esta característica indica que el agua subterránea se encuentra en condiciones de descarga, esto es, el flujo es ascendente.

Así, el lago y canales de Xochimilco se originaron por la descarga natural de flujos local e intermedio de agua subterránea. Ángeles-Serrano et al. (2008) señalan que los principales impactos al ambiente allí identificados se deben a la extracción del agua subterránea que ha producido impactos ambientales severos (hundimiento, secado de manantiales, etc) lo cual está ligado a no incorporar el funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea.

La profundidad somera del nivel freático en el tiempo original (condiciones prístinas) puede ser inferida por el aporte continuo de agua de manantiales existentes, ya que estas descargas han producido los ecosistemas particulares y especialmente notorios al sur del DF, donde una de las características es la presencia del “ahuehuate” (*Taxodium mucronatum*) que es vegetación freatofita (toma agua directamente del nivel freático).

Su longevidad de cientos de años sugiere que por tiempos históricos el nivel freático no descendió por debajo de su raíz proponiendo que éste se encontró continuamente a pocos centímetros del suelo.

En tiempo reciente, la forma de extracción de agua subterránea al sur de la cuenca ha ocasionado que el nivel freático haya descendido a más de 70 m de la superficie. Desde un punto de referencia a escala local, los principales impactos directos e indirectos que han sido identificados son los siguientes:

- 1) Manantiales desecados, cuya desaparición coincide con el auge en la construcción de un gran número de pozos que se operan, incluso junto al sitio donde se tenía un manantial; actividad que se desarrolla desde fines de los años 1950's en sitios de la cuenca vecinos a los canales de Xochimilco.
- 2) Una consecuencia del punto anterior es la desecación del lago de Xochimilco, la cual se ha tratado de compensar importando agua residual parcialmente tratada.
- 3) Efectos negativos a la vegetación debido a que sus raíces quedan por arriba y fuera del alcance del agua necesaria para su sustento.
- 4) Consolidación del suelo, la cual, es importante indicar que en el caso de la extracción en la Cuenca, esta no muestra relación directa con el creciente caudal de agua subterránea extraído, depende del sitio de extracción.
- 5) Creciente deterioro de la calidad del agua subterránea que se extrae en los pozos y que es potencialmente dañina a la salud de la población.
- 6) El gasto innecesario de energía usado en los pozos para obtener el caudal extraído.
- 7) Pozos con una vida útil más corta.

En cuanto a los primeros tres puntos, la desaparición de manantiales y desecación del lago se deben principalmente a la extracción intensiva del agua subterránea sin incorporar previamente su funcionamiento, por lo que el diseño, construcción y operación de pozos ha ocasionando el descenso sin control del nivel freático, reflejándose en la consecuente afectación de los ecosistemas que estaban ligados a la manifestación superficial del agua

subterránea. Es decir, el hábitat existente, con presencia de cuerpos de agua y vegetación freatofita cambió a un paisaje más seco, rompiendo el equilibrio previo del sistema y afectando los seres vivos que se beneficiaban anteriormente de ese tipo de ambiente. Debe quedar claro que las condiciones ambientales presentes en determinado lugar son el resultado de una conjunción entre agua (subterránea y superficial), clima, rocas, suelo, relieve, seres vivos y las diferentes componentes de la naturaleza, por lo que cualquier perturbación a alguno de estos repercutirá en su funcionamiento original.

Uno de los resultados más sobresalientes del estudio de Ángeles-Serrano et al. (2008) es el análisis de la relación que se supone directa entre subsidencia del suelo y extracción de agua subterránea en la cuenca; sin embargo, datos obtenidos por la Secretaría de Obras y Servicios del Gobierno del Distrito Federal sugieren que ésta no es lineal, como se aprecia en la Figura 16, los valores de subsidencia disminuyen a pesar del aumento en la extracción de agua en la cuenca. Adicionalmente, Carrillo-Rivera et al. (2002) definen que localmente para el año 2000 se tienen valores positivos de velocidad de “subsidencia” (de 0.02 m/año) sugiriendo un efecto contrario a lo esperado.

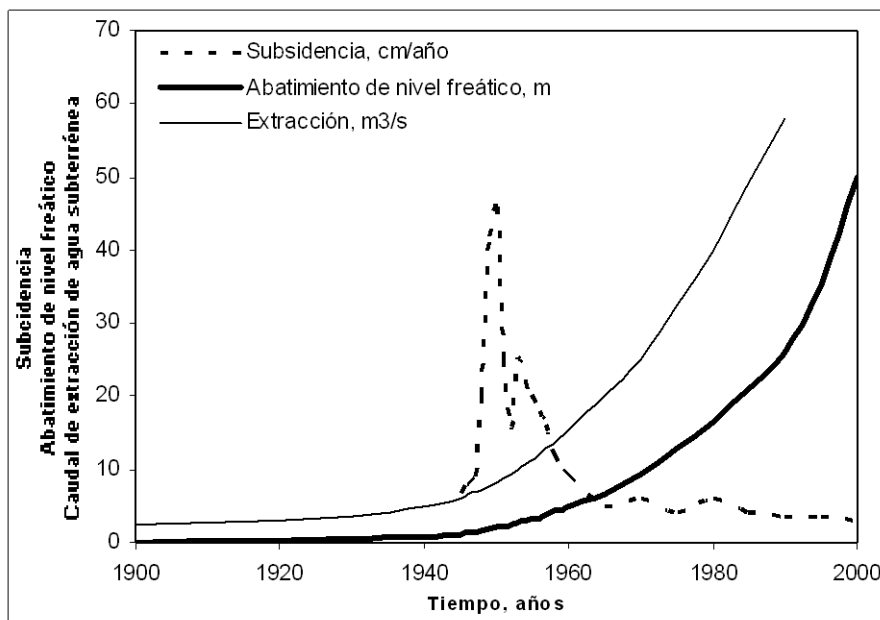


Figura 16. Aumento de la profundidad al nivel freático y del caudal de extracción en la Ciudad de México, así como la respuesta de hundimiento por subsidencia (de Ángeles-Serrano et al, 2008).

De acuerdo con Ángeles-Serrano et al. (2008), la consolidación en la zona sujeta a conservación ecológica Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco se genera principalmente por flujo vertical descendente de agua subterránea que se mueve al acuífero desde el acuitardo. Esto se debe a la disminución de la presión hidráulica en el acuífero por la extracción (la presión se mantiene relativamente mayor en el acuitardo). Notar que la pérdida de agua y el aumento de la presión de poro en acuífero y acuitardo se manifiestan como una compactación del volumen del material afectado.

Una posible explicación que se reporta en tal estudio en cuanto a la disminución en la subsidencia, es que el aumento en la extracción de agua produjo un abatimiento de la superficie freática por debajo de la base del acuitardo, cambiando la condición del acuífero de semi-confinado a uno de tipo libre, situación que limita el flujo vertical descendente del acuitardo al acuífero. La razón es la formación de una zona no saturada de baja conductividad hidráulica (Figura 17) entre el acuitardo y el acuífero, limitando el flujo del primero hacia el segundo, estabilizando, para términos prácticos, el hundimiento del suelo.

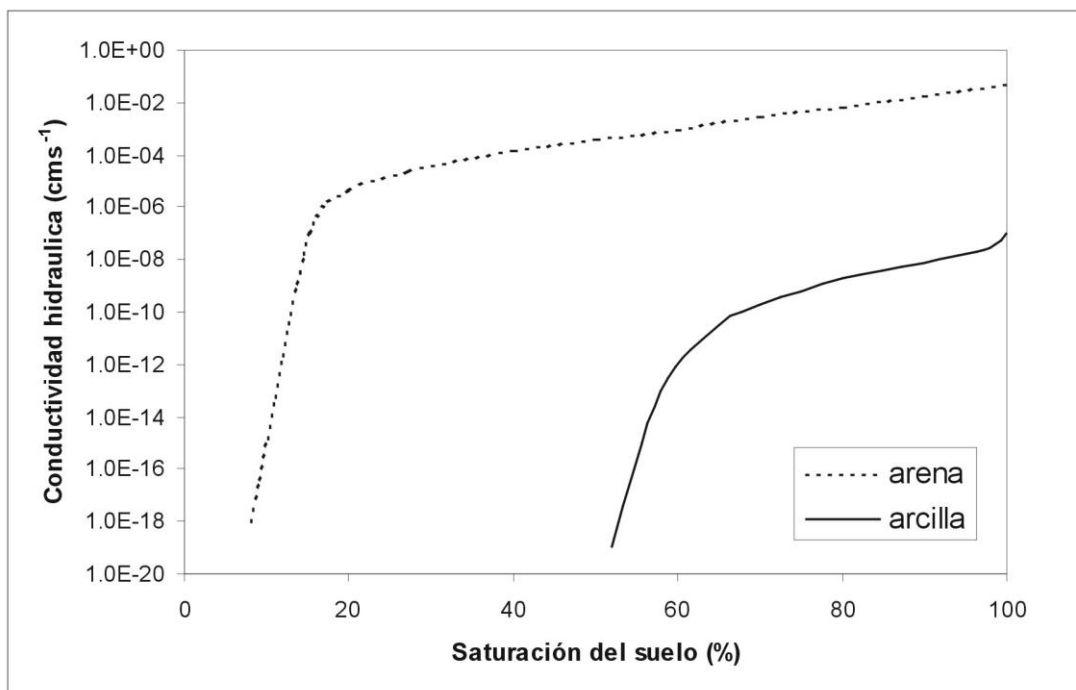


Figura 17. Relación entre el porcentaje de saturación y la conductividad hidráulica de un suelo o material geológico (Stephens BD, 1995)

Con referencia al creciente deterioro de la calidad del agua subterránea que se extrae en los pozos y que es potencialmente dañina a la salud de la población, se insiste que los impactos ambientales identificados en el sur del DF se relacionan con desconocimiento de la respuesta del funcionamiento del flujo subterráneo a la extracción y la consecuente inducción de flujos de jerarquía regional a la calidad del agua subterránea con el tiempo de extracción, cuya visión regional para el Sur de la Cuenca de México se presenta en la Figura 18.

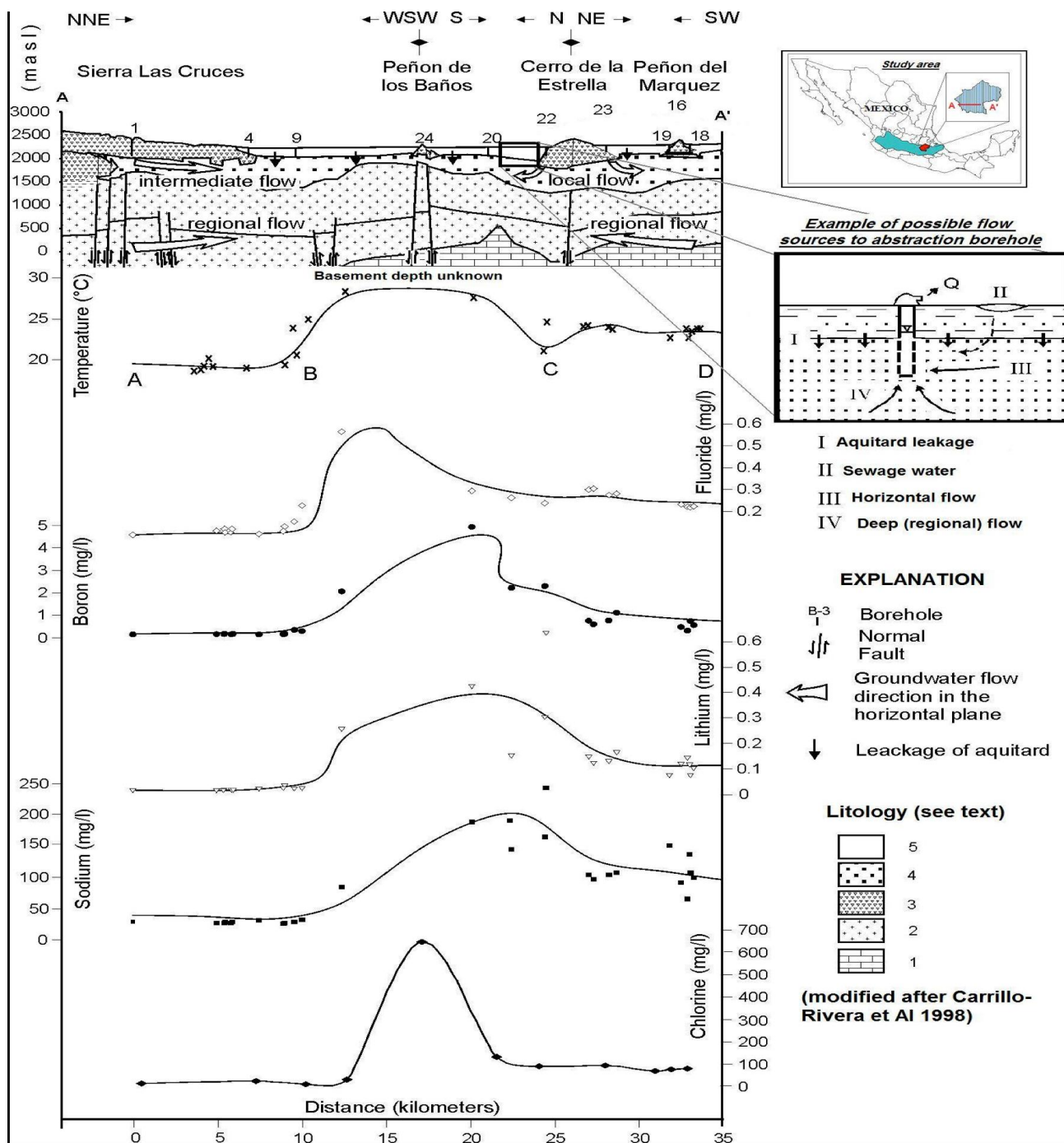


Figura 18. Evolución de la calida del agua subterránea a lo largo de una sección localizada al sur de la Cuenca de México (Carrillo-Rivera y Ouyse, 2011).

Al respecto se debe recordar que se inició la extracción de agua de flujos locales pero su calidad está evolucionando a la de un flujo regional (Carrillo-Rivera y Ouyse, 2011). Efecto que tiene que ver con el gasto innecesario de energía usado en los pozos para obtener el caudal extraído, ya que el abatimiento en el pozo es respuesta de su construcción y operación.

4.4.2.4 Información y su Manejo

Los datos de subsidencia aportados por el SACMEX requieren de un mayor detalle histórico en cuanto a la respuesta aportada. Por ello, lo deseable para estar en posibilidad de dictaminar sobre el tema de la subsidencia, es contar con los valores puntuales de subsidencia de los diferentes años, desde su inicio hasta la actualidad y de todos los sitios monitoreados, así como, con el historial de los datos de consolidación relacionados con cada observación de campo para cada sitio. Solo esto permitirá saber o definir qué respuesta de consolidación es la observada a lo largo del período observado.

En este sentido se pueden plantear varias preguntas al respecto:

- ¿Ha sido la velocidad de consolidación la misma desde que el sitio se comenzó a monitorear?
- ¿Qué efecto tiene la litología del subsuelo en la subsidencia y si ésta marca alguna diferencia en relación con los espesores presentes de diferentes materiales?
- ¿Cómo ha reaccionado el sitio a diversos cambios de extracción y de posición del nivel freático?

Lo requerido por tanto es saber la velocidad de consolidación para los diferentes puntos medidos durante todo el historial de datos almacenado. Esta información en caso de existir disponible en esos términos, sería crucial para su confrontación con datos de

4.4.2.5 Calidad del Agua

Desde la perspectiva de calidad del agua, se considera que como parte del deterioro ambiental producido por la extracción indiscriminada de agua subterránea se tienen dos respuestas de importancia: i) La inducción hacia los pozos del agua importada que ha sido tratada a nivel secundario y que es usada para mantener los niveles de agua en lago y chinampas de Xochimilco, y ii) El ascenso de agua profunda (ie >500 m) al nivel de extracción de los pozos.

En este sentido, se considera fundamental tener acceso a información histórica de: i) Localización de pozos de extracción y su descripción litológica así como el caudal extraído y la respuesta en términos de profundidad al nivel freático; ii) La evolución de la calidad físico-química del agua extraída en los pozos y su comparación con la de canales (Figura 19); y iii) La evolución del hundimiento en los diferentes sitios medidos secuencialmente (bancos). Del análisis de esta información se espera derivar acciones y lineamientos recomendables para lograr un manejo ambiental óptimo que repercuta en el bienestar de las chinampas y de la población relacionada.

A partir del análisis de dicha información, en caso de existir, se pueden obtener conclusiones firmes y hacer recomendaciones específicas sobre lineamientos y acciones para lograr un manejo ambiental óptimo que repercuta en el bienestar de las chinampas y de la población relacionada. En este marco, la determinación de la calidad físico-química del agua obtenida en pozos resulta extremadamente importante debido a que representa la información desde que el agua se infiltró (procesos de recarga), de su paso por los diferentes materiales del subsuelo y de las alteraciones producidas (contaminación) por el medio por donde ha circulado. En este marco el análisis realizado por el Gobierno del Distrito Federal a las muestras de agua de los pozos cubren lo establecido en la norma correspondiente (NOM-127-SSA1-1994) sin embargo para su utilización en el diagnóstico de la subsidencia requeriría que los datos fueran asequibles y colectados en forma cotidiana, no cómo promedio.

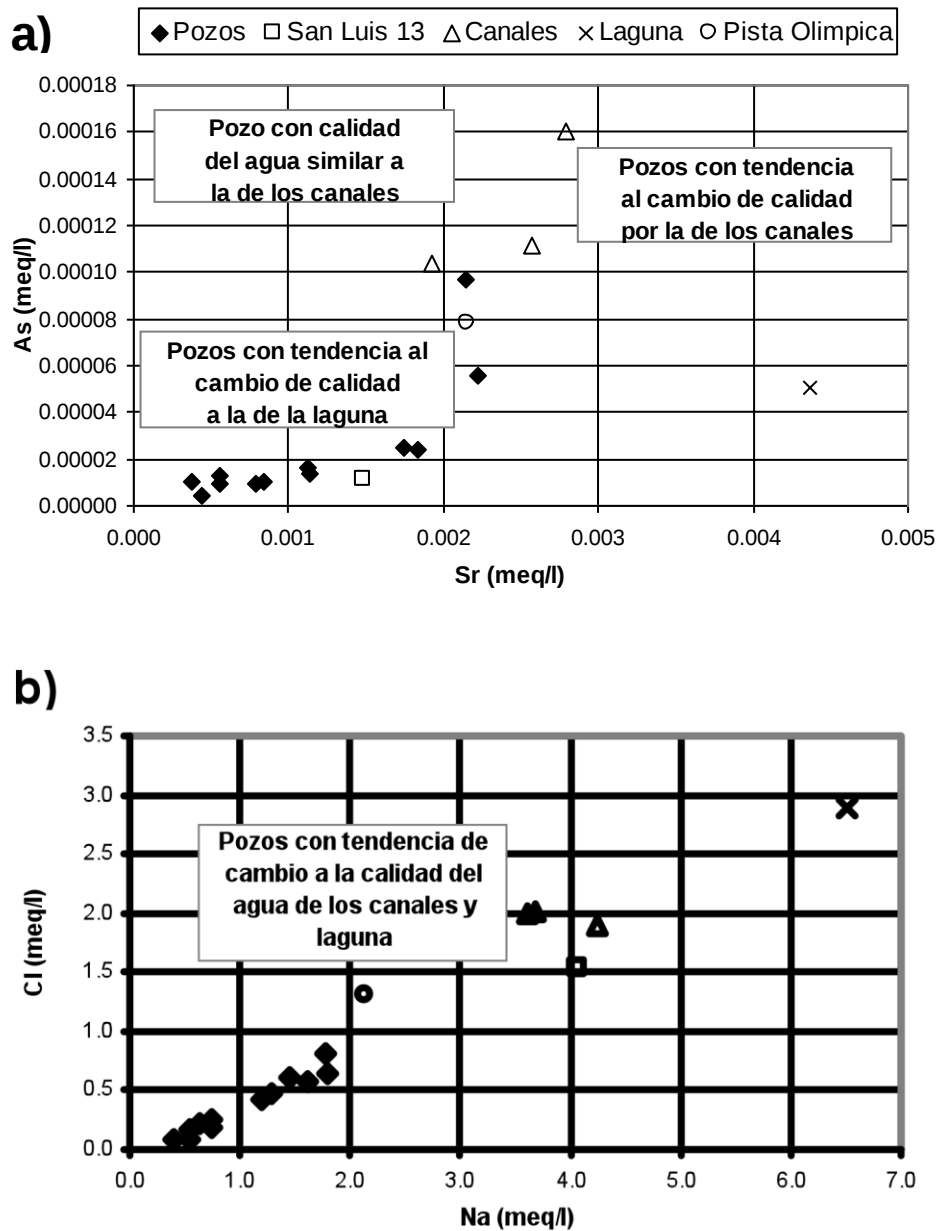


Figura 19. (a) Relación As-Sr, y (b) Relación Cl-Na, de agua de diferentes fuentes localizadas en los alrededores de la ANP-Xochimilco. (Ángeles-Serrano et al 2008)

En este sentido es importante destacar que en el desarrollo de la Norma NOM 127-SSA1-1994, no hubo participación de hidrogeólogos o de organizaciones de profesionales del agua subterránea, lo cual hace que el esfuerzo realizado se vea limitado y/o imperdido no por una acción orientada a ese fin, sino por la falta de datos *ad hoc* que no representarían un costo significativo pero que si posibilitarían contar con información adicional fundamental para establecer el funcionamiento del agua subterránea. De la búsqueda y análisis de ña información en el periodo de este informe, no se puede concluir que dichos datos no existan y aún está vigente la solicitud de que en caso de existir se pueda contar con ellos; sin embargo, dadas las características de la información proporcionada, resultan diversas preguntas derivadas:

- ¿Cuál es el proceso de toma de datos en campo durante la colecta de muestras?
- ¿Qué parámetros se miden en campo?
- ¿Cuál es el proceso de calibración de los aparatos usados en campo?
- ¿Qué es deseable medir en campo? ¿ie temperatura del agua, pH, OD?
- ¿Qué tipo de seguimiento se le da a los resultados analíticos obtenidos?
- ¿Es posible determinar la confiabilidad de los resultados de los análisis químicos mostrados?

4.4.2.6 Cantidad de extracción

Una de las variables que usualmente se ha considerado esta directamente relacionada con el proceso de consolidación en un material granular (el cual se manifiesta como hundimiento), es la extracción del agua subterránea por pozo. Por ello para su diagnóstico certero se requieren los datos de esta variable a través de un historial de su evolución (por pozo) en el tiempo, factor a comparar con la evolución de la calidad del agua obtenida, y la posición del nivel freático. Esta variable se torna crítica si se considera que la mayor parte de la extracción de agua en Xochimilco se realiza por el Gobierno del Distrito Federal, por lo que los datos a aportar serán de gran significación al planteamiento de la respuesta observada en campo (subsistencia).

De estas consideraciones resultan las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles han sido los cambios en los volúmenes anuales de extracción?
- ¿Ha sido el caudal de extracción invariablemente el mismo a lo largo del periodo reportado?
- ¿Los datos reportados de extracción son medidos o estimados, si es el último caso que método se usó para lograr tal aproximación?

4.4.2.7 Evolución del nivel freático

El funcionamiento de la consolidación y de la calidad del agua obtenida en los pozos de la Cuenca de México está relacionada con la posición del nivel freático ya que se tienen al menos un par de condiciones ligadas a su posición: i) el agua del acuitardo subyacente en la cuenca de México fluirá a los pozos de extracción dependiendo del grado de saturación existente entre la posición del nivel freático y la base del acuitardo, y ii) entre más fácil sea este movimiento se producirá mayor consolidación. En este sentido la evolución de la profundidad al nivel freático es de gran importancia para el efecto de la consolidación del suelo,

A lo anterior se debe agregar que la respuesta del proceso de consolidación tiene una escala de respuesta diferente; esto es, se puede detener la extracción pero la consolidación continua por cierto tiempo adicional; lo cual es una respuesta que se debe considerar en cualquier modelo de control o para definir esta condición. En este sentido las preguntas que resultan necesario exponer son las siguientes:

- ¿Cuál ha sido la respuesta, en el tiempo, de la extracción a la posición del nivel freático?
- ¿Cómo ha afectado que la posición del nivel freático esté ahora a unos 70 m por debajo del nivel del suelo?

4.4.3. Propuesta para Monitoreo de la Calidad del Agua Subterránea

Dadas las consideraciones y preguntas establecidas en las secciones anteriores, así como las características de la Cuenca de México y la problemática ambiental relacionada con la extracción actual del agua subterránea, como resultado de este estudio, se propone un programa de monitoreo que incluya conceptos y parámetros que hasta la fecha no han sido considerados, que tienen posibilidad de realizarse sin representar un costo adicional significativo, debido a que el Gobierno del Distrito Federal ya cuenta con un programa de monitoreo que puede adaptarse para incluir características adicionales. Al respecto, sería necesario que la toma de muestras se realice al menos en forma mensual en un el número de sitios que sería definido con antelación de acuerdo con la respuesta observada en campo y se propone que el programa incluya tanto agua subterránea (pozos) así como canales, cuerpos de agua, con la siguiente metodología.

4.4.3.1 Metodología

Desde el punto de vista metodológico, se requiere evaluar la calidad del agua mediante un programa de muestreo cuyo proceso de ejecución garantice mediciones fiables de campo que consideren temperatura, pH, conductividad eléctrica y otros elementos relacionados con el paisaje y el medio drenado; así como un apropiado, claro y cuidadoso almacenamiento y manejo de datos, cuya consulta ágil y oportuna permita estar en posibilidad de definir los flujos de agua subterránea que están incluidos en el subsuelo de la cuenca, así como establecer su alternativas viables para su manejo óptimo. Con ese propósito se considera conducente la siguiente secuencia metodologica:

1. Hacer un estudio del marco geográfico, geológico e hidrogeológico de la región y determinar los sitios a muestrear de manera sistemática, con una frecuencia al menos mensual, con el objetivo de que los datos reflejen el efecto del ciclo hidrológico.
2. Realizar mensualmente durante al menos un par de años, mediciones de temperatura, pH, conductividad eléctrica (de ser posible incluir potencial de oxidación-reducción y oxígeno disuelto); así como determinaciones del CO_2 y de los iones mayores (HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+).

3. Crear una base de datos en Excel e importar los datos al sistema informático “Hidrogeoquim” creando los ficheros de trabajo (txt) con la estructura de este software.
4. Validar de la calidad de los datos (mediante el análisis del balance de aniones y cationes y la comparación de la conductividad eléctrica teórica con la real). Los datos con errores superiores al 10 % no deben ser utilizados en la modelación. Esta última puede realizarse mediante el sistema informático “Hidrogeoquim”.
5. Determinar los patrones hidrogeoquímicos del agua, sobre la base de las relaciones numéricas de números enteros entre 1 y 8: realizando los cálculos mediante el sistema informático “Modelagua”.
6. Establecer los grupos de agua presentes sobre la base de los patrones hidrogeoquímicos y facies hidroquímicas (tipos de aguas según el criterio de clasificación de Kurlov), aplicando “Hidrogeoquim” y “Modelagua”.. Cuando la composición química del agua está controlada por procesos de interacción agua-roca, cada punto de agua presentará uno o dos patrones hidrogeoquímicos y tipos de agua diferentes en caso de tratarse de un flujo local, afectado por el ciclo hidrológico. Los flujos intermedios y regionales tienden a presentar un solo patrón y tipo de agua. Si existen procesos de mezcla de agua, la misma puede presentar numerosos patrones y tipos de agua en dependencia del régimen de lluvia y naturaleza de la mezcla.
7. Determinar el contenido de CO_2 en equilibrio y el estado de saturación del agua con respecto a los principales minerales constitutivos del medio acuífero. En los flujos locales el agua presenta relativamente bajo contenido de CO_2 y suele estar insaturada en los períodos lluviosos, mientras que en los flujos de carácter intermedio o regional, tienden a encontrarse sobresaturadas, con alto contenido de CO_2 disuelto. En los flujos intermedios estas variables toman valores igualmente intermedios. Para este estudio puede emplearse “Hidrogeoquim” u otro sistema informático de que establezca la especiación de los iones libres y complejos y calcule el estado de equilibrio del agua.

8. Determinar cuantitativamente los procesos geoquímicos, que explican el origen de la calidad del agua. Para ello emplear el algoritmo de “Modelagua”, basado en un modelo de balance de masa y mezcla de agua. En casos de mezcla, determinar las proporciones que aportan los miembros extremos de la mezcla.
9. Determinar las ecuaciones de regresión matemática entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica correspondientes a cada grupo de agua. Creando dos tipos de ficheros de datos: uno con aquellos datos que se utilizarán para determinar las ecuaciones matemáticas mediante los diferentes modelos y otro con datos diferentes a los utilizados en la modelación, con el objetivo de validar los correspondientes modelos utilizados. Mediante el uso de índices de similitud, se determina si existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos por los diferentes modelos, seleccionándose los mejores y más sencillos. Para ello se utilizan los sistemas informáticos “Sama” y “Geoquim” u otro de tipo estadístico.
10. En el caso en la composición química varíe sensiblemente con la profundidad, como por ejemplo sucede en los acuíferos costeros y salino, antes determinar los modelos de correlación matemática, se deben separar los datos mediante un sistema de reconocimiento de patrones (sistema informático “Batomet”).

Al final quedaría establecido un sistema de monitoreo de la calidad de las aguas, mediante el cual, con mediciones *in situ* de temperatura, pH y conductividad eléctrica, es posible estimar por modelación hidrogeoquímica, el contenido de cada ión mayoritario; los contenidos de minerales disueltos (TDS), dureza (CaCO_3) y de CO_2 y las relaciones de saturación.

En esta fase metodológica se estudia la posibilidad de integrar las fuentes de aguas (pozos, manantiales, etc.) que presentan similares patrones hidrogeoquímicos y modelos de correlación matemática, con el objetivo de racionalizar una Red de Control de Calidad, con la finalidad de hacer menos costoso el ulterior seguimiento de la calidad del agua de la región y establecer un sistema para su mejor cuidado y manejo.

4.4.3.2 Muestreo de campo

Protocolo para la toma de muestra de agua subterránea para su análisis por aniones, metales (e isótopos estables)

A. Reconocimiento de sitios viables

- Ubicar mediante coordenadas sitios potenciales de muestreo en los cuales se haya observado cambios a la calidad química del agua y/o de temperatura. De preferencia para los sitios propuestos se deberá contar con un historial lo mayor en tiempo posible.
- Fijar diversos canales en relación con su calidad de agua (efecto posible de dilución del agua tratada).
- Definir el tipo de fuente (manantial, pozo, río, canal) y cotejar la posibilidad de poder instalar la celda de aislamiento, así como el desalojo del agua durante los trabajos de colecta de muestra, ubicando la posición apropiada de los aparatos del caso.
- Establecer la información de identificación física del caso (profundidad del pozo, caudal involucrado, material geológico atravesado, tipo de material aflorante, clase de vegetación natural existente y uso de la fuente).

B. Tratamiento de las botellas antes del muestreo

Las botellas para tomar cada muestra (en cada sitio) serán cuatro de 60ml (una para aniones, una para metales, una para isótopos estables y una cuarta como testigo). La preparación de las botellas (nuevas, no reciclar botellas) será el siguiente: Lavar con detergente ligero (incluyendo la tapa y contratapa); enjuagar varias veces con agua simple; sumergir por 30 minutos en una solución diluida de HCl al 10%; enjuagar con agua bi-destilada en tres ocasiones y dejar escurrir y secar a temperatura ambiente; el mismo tratamiento se dará a las contratapas y tapas. En campo debe purgarse en el sitio de toma de muestra tres veces con el agua a muestrear antes de envasar.

C. Toma de parámetros en campo

A través de la celda de aislamiento colocada captando el agua de la fuente se medirán en forma continua hasta su estabilización: pH, alcalinidad, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, así como temperatura.. La temperatura del aire se medirá a la sombra.

D. Celdas de aislamiento

Celda 1:

Debe utilizarse una celda de aislamiento que elimine en la medida de lo posible el contacto permanente del agua subterránea con el aire; esto es, se busca tomar la muestra a las condiciones de su flujo natural. En la celda, mientras el agua fluye a través de ésta, se incorporarán los sensores del potenciómetro (pH), conductivímetro (CE), oxímetro (OD) y termómetro. La celda tendrá una manguera de entrada conectada con el agua de la fuente a tomar muestra, la celda tendrá su salida del agua. En esta celda se insertarán los electrodos de pH, CE, OD y temperatura.

Celda 2:

En esta celda se incorporarán tres contenedores con solución buffer con pH de 4, 7 y 10; dejándose fluir el agua a muestrear hasta que las soluciones se acoplen a la temperatura del agua de la fuente.

E. Mediciones de campo

- **pH:** Una vez que las soluciones estén a la temperatura del agua se calibrará el potenciómetro entre la solución de 7 y la solución (de referencia 4 ó 10). Se usará la solución de referencia que esté acorde con el pH esperado en la fuente, por ejemplo se usará la de 10 si se espera que el agua esté a un pH superior a 7 (ie, agua que tiene cierto tiempo de residencia). Esto se hará usando la Celda 2. La calibración debe hacerse en el momento en que las soluciones buffer se hayan acoplado a la temperatura del agua. Se deberán seguir las recomendaciones de calibración del electrodo de acuerdo con lo indicado en manual del equipo.

- **Conductividad Eléctrica:** El aparato que mide la conductividad eléctrica (CE) debe calibrarse en una solución de CE conocida (a una temperatura establecida) cuyo contenedor se colocará en la celda de aislamiento a lograr en la medida de lo posible la “temperatura establecida”. Es importante que antes de introducir el electrodo a la Celda 1, se deberá verificar el valor de la CE de la solución patrón con el fin de asegurarse que el aparato funciona correctamente.
- **Oxígeno Disuelto:** El aparato medidor de oxígeno disuelto se calibrará antes de que el sensor sea introducido a la Celda 1, para esto se seguirán las recomendaciones de calibración del electrodo y equipo de acuerdo con el manual correspondiente
- **Temperatura:** La temperatura se medirá siempre con el mismo termómetro adjunto al aparato de medición a elegir (de pH, OD, u otro). El termómetro del aparato se calibrará con un termómetro estándar de mercurio.
- **Alcalinidad:** De preferencia la alcalinidad se determinará hacia el final del proceso de toma de muestra, cuando los aparatos estén ya registrando las mediciones estables del flujo de agua a muestrear. En este caso la medición de alcalinidad se hará en forma repetitiva en cada sitio realizando el proceso por segunda ocasión esperando obtener un valor similar al inicial. Caso contrario, se repetirá el procedimiento (teniendo doble resultado) hasta poder lograr la repetición del resultado inicial. El método de titulación será con H_2SO_4 a 0,02N de la siguiente manera:
 - 1) Medición de un volumen de agua de muestra conocido (25 ml)
 - 2) Adicionar 0,15 ml de fenolftaleína
 - 3) Titulación agregando ácido hasta lograr cambio de coloración
 - 4) Cálculo = (ml de ácido consumido * N de ácido * 50000) / ml de muestra
- **Filtración y preservación:** En el caso de la botella cuyo contenido será usado para el análisis de metales, se debe proceder de la siguiente manera:

- El agua a incluir en la botella destinada al análisis de metales se filtrará con un filtro mili-poro 0.45 μm directamente al ir siendo envasada en la botella respectiva. Para esto se asistirá de un dispositivo (jeringa) que permita ejercer presión al agua para que pase el filtro.
- Un poco antes que el agua filtrada haya llenado la botella se le adicionarán 13 gotas de ácido nítrico extra puro (por los 60ml de muestra).
- La botella se llenará evitando dejar la presencia de burbujas de aire antes de ser cerrada para su almacenamiento temporal en el sitio.
- Rotular el envase realizando las respectivas anotaciones en la libreta de campo.
- Llevar las muestras a refrigeración (en hielera con hielo) y mantener las botellas a 4°C hasta su arribo a laboratorio

En el caso de la botella para el análisis de aniones el procedimiento será el siguiente:

- El agua a incluir en la botella destinada al análisis de aniones no se filtrará a menos que ésta contenga sólidos en suspensión visibles, de ser así, se filtrará el agua con un filtro mili-poro 0.45 μm antes de envasarla.
- Al agua de esta botella NO se le adicionarán ácido de ningún tipo y bajo ninguna circunstancia.
- Se tendrá cuidado que la botella no incluya burbujas de aire antes de cerrarse.
- Rotular envases y realizar las respectivas anotaciones en la libreta de campo.
- Llevar las muestras a refrigeración (hielera con hielo) y mantener las botellas a 4°C hasta su arribo al laboratorio.

4.4.4 Fundamentos para considerar a la química del agua como evidencia del funcionamiento ambiental de una Cuenca Unitaria

El agua subterránea ha sido poco comprendida por los tomadores de decisiones y por la sociedad en general. Parte de la falta de entendimiento se debe a una insuficiencia en el conocimiento del tema, pero asimismo por la naturaleza oculta del agua subterránea; lo primero ha repercutido en el limitado número de profesionales que conoce sobre sus manifestaciones, y lo segundo ha ayudado a crear una serie de *hidromitos* ligados que en un sinnúmero de casos han beneficiado a personajes de la vida del país. Por ello, es evidente que el lograr el conocimiento de un ente dado, en este caso el agua subterránea, depende de su cabal entendimiento.

De lograrse este entendimiento, el territorio nacional, incluyendo sus ecosistemas, se beneficiaría al lograr acercarse a comprender el funcionamiento del agua subterránea como elemento articulador del ambiente,. Concepto que se torna fundamental al reconocer que no es factible manejar cualquier ente sin antes tener un conocimiento pleno de cómo funciona.

En términos amplios el agua subterránea es aquella que se encuentra debajo de la superficie del suelo. Incluye el agua que está en tránsito del suelo hacia la superficie freática, y aquella que se encuentra por debajo de este nivel. Así, las zonas donde el agua subterránea se encuentra son conocidas como vadosa (no saturada) y saturada, respectivamente.

Una parte importante de la visión existente en México respecto al agua subterránea se puede concretar en dos enfoques básicos: uno que sugiere que su aprovechamiento está irremediablemente ligado a impactos negativos al resto del ambiente, y la segunda bajo la cual es considerada como un elemento en condiciones de dimensiones finitas restringidas al acuífero.

Sin embargo, una visión más apegada a la realidad de su funcionamiento es, para fines prácticos, inexistente.

En un sentido estricto, la visión que hace énfasis en los impactos que se generan como resultado de la extracción indiscriminada del agua subterránea involucran básicamente: i) el incremento de la profundidad del nivel del agua en los pozos, factor impreciso que sirve de argumento para postular el denominado *balance hídrico deficitario*; y ii) en menor grado cuando se genera una respuesta que involucra la subsidencia del terreno como es el caso de la planicie del Distrito Federal en particular la zona de Xochimilco.

Sin embargo, el efecto manifiesto en la desaparición de los ríos antaño existentes, manantiales como los de Nativitas, y cuerpos de agua (lago de Xochimilco) ha tomado incluso una respuesta considerada como deseable por parte de diferentes entes de gobierno, en especial la desecación de lagunas, dado que la gran extensión de territorio nuevo y asequible, permite un cambio de uso del suelo hacia actividades que sólo tienden a incrementar errores demográficos cometidos.

Curiosamente, la calidad del agua extraída y su deterioro ha sido tema al que se le ha dado menor interés; sólo ha habido cierto reconocimiento en la denominada intrusión de agua de mar y en los llamados programas de agua potable. El primer caso incorpora una respuesta común a muchos pozos que extraen agua en zonas cercanas a una costa donde invariablemente se aduce que el aumento de la salinidad en el agua extraída es producida por la entrada lateral del agua de mar, implicando que el flujo subterráneo viaja horizontalmente desde la línea de costa hasta el pozo de extracción; aspecto usual y erróneamente simplificado al no establecer con claridad la dirección del flujo de agua subterránea hacia el pozo de extracción.

La realidad es que usualmente el agua salada entra en forma vertical y no horizontalmente al pozo, aspecto que tiene serias implicaciones en el manejo eficiente del agua en tales condiciones (Cardona et al., 2004). En el segundo, se reduce al reto de abastecer a la población con agua clorada (para la eliminación de bacterias) donde la definición de la calidad fisicoquímica del agua de abastecimiento, erróneamente, no representa un reto particular, en especial su contenido de elementos naturales presentes en concentraciones traza como el fluoruro, arsénico, manganeso, cromo, por indicar algunos.

Resumiendo, desde el punto de vista del balance hídrico dirigido al agua superficial, se considera que no es posible (ni recomendable) realizarlo para definir volúmenes accesibles de agua (subterránea), fundamentalmente porque la información que se maneja no es suficiente ni en tiempo (sólo hay mediciones en periodos relativamente cortos), ni en espacio (las estaciones están retiradas y se correlacionan valores en forma inadecuada), ni en calidad (existen errores de medición humanos, de método e interpretación), ni en cantidad (usualmente no se toman mediciones en forma continua). Por otro lado, como se ve más adelante, es de enfatizar que en muchos casos los resultados del balance hídrico se usan para deducir (erróneamente) la cantidad de agua que se infiltra al subsuelo, la recarga.

En principio, el interés en México sobre el agua subterránea ha sido en “localizar” pozos que aporten el mayor caudal posible, siendo su calidad, un requisito de menor prestancia. En efecto, el término *cantidad* ha sido el que ha sido acuñado como término sinónimo de agua subterránea accesible desde la primer sinopsis nacional publicada en 1978 por la entonces Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) llamada *Atlas Geohidrológico (Volumen I)*, que básicamente representa un denominado *Banco Nacional de Información Geohidrológica*, donde se presentan datos diversos de pozos, de propiedades de la unidad geológica, del agua subterránea, excepto su calidad, información que incluye el territorio del Distrito Federal.

Así el interés que en México ha existido sobre el tema de la calidad del agua subterránea ha sido general y desde la perspectiva de su aptitud para ser usada en riego, y en abasto doméstico. En partes del país cercanas a la línea de costa se ha incorporado la limitante dada por la intrusión de agua salina, y en menor proporción por cambios por la entrada de sustancias contaminantes provenientes de rellenos sanitarios, y canales que transportan agua residual. Sin embargo, existen otros procesos identificados que *alteran la calidad del agua obtenida por bombeo*. Esta alteración es una consideración tradicional de gran importancia ya que ha sido costumbre considerar que la calidad inicial del agua del pozo, reportada durante el inicio de su fase de operación, permanece para fines prácticos, constante a través de su vida activa.

Esto es, no se considera que el agua cambie su calidad a menos que haya un acto de contaminación por alguna fuente donde la mano directa del hombre ha sido responsable del manejo erróneo de algún residuo o del pozo en turno.

La definición de *contaminación* según la LGEEPA (1988) especifica en su artículo 3° (VI) *Contaminación*: La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico; y (VII) *Contaminante*: Toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural.

En este sentido, esta definición en principio parece estar dirigida a la alteración de la calidad del agua por la llegada (filtración) al agua subterránea de materia en diferentes estados desde la superficie del suelo. Este tipo de procesos se considera fueron una de las causas principales de que se desarrollara el estudio metodológico actual del agua subterránea y cuyos representantes aparecen a fines de la década de 1970's en el libro de Freeze y Cherry (1979), libro donde se reconoce la importancia de aplicar la teoría de los sistemas de flujo en estudios del agua subterránea cuyas bases fueron establecidas por Tóth en forma inicial desde 1962, 1963.

La otra visión que a menudo se desconoce es la que considerada que como el agua subterránea constituye más del 95% del agua dulce asequible en el continente, es un elemento que para fines prácticos puede considerarse como ilimitado en cantidad para ser usado en cualquier acción de desarrollo de la humanidad.

En realidad Vovich *et al.*, (1995) estiman que en el ámbito mundial el abastecimiento de agua hacia áreas urbanas (incluye producción económica ahí realizada) es menor al uno por ciento (0.45%) del total del agua dulce que incluye el caudal de ríos, nieve perenne y flujo de agua subterránea a los océanos. Si se incorporara el gran volumen de agua subterránea almacenada debajo de la superficie del continente (Price, 2003), este valor se reduce en cerca de dos ordenes de magnitud (0.008%) y aún bajo esta cantidad el impacto en el ambiente es manifiesto.

Lo anterior sugiere que científicos, especialistas en ordenamiento territorial, ingenieros en hidráulica, sociólogos, economistas y políticos no han identificado, y resuelto, en forma adecuada la necesidad de entender cabalmente el funcionamiento del agua subterránea para su administración más satisfactoria. En efecto, Graizbord y Arroyo (2004) señalan que el reporte del *World Water Commission* del 2000, llama la atención a la comunidad global señalando que la fragilidad del ingrediente clave de los ecosistemas –el agua– no consigue la suficiente atención, acentuando que está en riesgo el sistema hidrológico global del que depende nuestra supervivencia.

Es evidente la necesidad que en la ciudad más grande del mundo se logre tener conciencia de la importancia de recurrir a una visión de estudio que se caracterice por incorporar, la realidad del funcionamiento del agua subterránea y procesos involucrados, la responsabilidad es tan evidente, que es preciso tener un control de los trabajos a realizar para que cualquier propuesta de funcionamiento pueda ser comprobable por diversas áreas del conocimiento. Este control se estima fundamental, ya que cualquier decisión (correcta o errónea) tendrá resultados en un mediano a largo plazo, por lo que desde una perspectiva científica es necesario establecer la relación *efecto-respuesta ambiental* a una extracción planeada de agua subterránea para evaluar su pertinencia con la confiabilidad requerida.

En este sentido, el paradigma establecido en el Distrito Federal como resultado de la inercia seguida en el ámbito nacional de considerar que usualmente la calidad del agua que se obtiene en un pozo es constante con el tiempo de extracción (excepto en zonas costeras y por contaminación en superficie) está produciendo efectos indeasebles en la salud humana así como en actividades productivas como la agricultura. Más aún, la propuesta oficial de trato al agua subterránea por acuífero ha acelerado más la respuesta de cambio de la calidad del agua obtenida por pozo. Bajo este referente, el objetivo del presente capítulo es demostrar la importancia de flujo vertical ascendente ya identificado en el sur del Distrito Federal (Edmunds, et al., 2002) y generado en muchas partes de la República Mexicana donde se tiene una extracción intensiva como la principal causa de contaminación del agua subterránea suministrada.

En relación con el referente teórico y causas correspondientes Freeze y Cherry (1979) dieron los primeros pasos formales relacionados con una propuesta de índole científico que aborda la identificación de la contaminación del agua subterránea desde la perspectiva de la entrada de material contaminante proveniente de la superficie del terreno, por acción humana. Un efecto de este proceso de contaminación es el cambio de la calidad del agua en el subsuelo. Es evidente que este efecto sólo será percibido por la población cuando el agua contaminada es usada, por ejemplo, para consumo doméstico; esto es, si esa fuente de agua era usada antes de que el evento de contaminación se hiciera patente en los pozos de extracción afectados, se considerará que ahora los pozos están produciendo agua contaminada con el material de caso. Esto sería coherente en forma análoga con la fracción (VI) del Artículo 3° de la LGEEPA (1988) donde la presencia de un flujo de calidad diferente al que inicialmente era usado entra en el ambiente de influencia del pozo, con una o más sustancias contaminantes en cualquier combinación, esto causa un desequilibrio ecológico manifiesto como un efecto negativo a la salud de la población. Desequilibrio que es producido por la extracción indiscriminada y sin control de agua subterránea lo que genera cambio en la calidad del agua obtenida, por lo que se puede argüir que bajo esas condiciones se ha contaminado la fuente de agua subterránea.

Al respecto del flujo horizontal vs flujo vertical en principio, la teoría de solución tradicional que conceptualiza el flujo de agua subterránea hacia un pozo de extracción es publicada por Theis (1935) donde postula que un pozo de bombeo debe, entre otras restricciones para aplicar esta solución, penetrar toda la unidad acuífera en extracción (evaluación) por lo que en consecuencia el flujo de agua subterránea hacia el pozo es en esencia horizontal. Esto en principio parece ser una situación simplemente teórica, donde si el pozo penetra toda la unidad acuífera productora o sólo una parte de ella; así, este criterio pareciera no ser de importancia.

Sin embargo, desde la perspectiva de hidráulica de pozos, si el pozo no penetra toda la unidad, implica que la determinación de la conductividad hidráulica (K) y coeficiente de almacenamiento (S) generará un error en muchos casos aceptable. Mas desde el punto de vista de la calidad del agua que fluye hacia el pozo, es pertinente hacer referencia sobre las implicaciones de no generarse un flujo horizontal al pozo de extracción.

En especial cuando debido a las condiciones geológicas presentes se pueden capturar flujos de agua subterránea que subyacen al pozo en cuestión y que en casos no se identifican claramente en los estados iniciales de extracción. Así, se torna fundamental definir cómo es el funcionamiento del agua subterránea que se captará mediante un pozo, en especial cuando se tiene un referente geológico como el que prevalece en el subsuelo de la ciudad de México donde se tienen unidades geológicas permeables de gran espesor, de diferente origen y contenido mineralógico y por tanto con una composición química diversa.

Para entender el funcionamiento del agua subterránea vs balance hídrico es necesario indicar que desde la perspectiva cuantitativa del agua subterránea (y su vinculación con el agua superficial), la cantidad de agua accesible para ser usada por el hombre ha sido normalmente estudiada mediante el balance hídrico. Sin embargo, se ha comprobado en muchos sitios del mundo (Freeze y Cherry, 1979; Ward y Robertson, 1999) que no es factible definir con ese modelo el buscado funcionamiento del agua subterránea. Las limitaciones del balance hídrico pueden resumirse en cuatro causas fundamentales: i) el balance considera al agua en forma estática (una fotografía), no incorpora el comportamiento del agua subterránea como un componente ambiental; ii) las variables que utiliza para su cálculo son estimaciones generales que adolecen de confiabilidad ya que usualmente no se miden directamente, y sin embargo representan cantidades sustanciales en el balance como por ejemplo, la escorrentía, la extracción de pozos, y la evapotranspiración; iii) cualquier evidencia sobre la presencia o ausencia de agua subterránea no se integra en el sistema de análisis del balance que permita corroborar esa manifestación; y iv) el balance no permite su corroboración por otros medios científicos como las características químicas del agua o el tipo de vegetación o suelo presente.

En relación con las variables de cálculo del balance, no es común que se acepten las limitaciones de su determinación en campo. Por ejemplo, la precipitación es a menudo el único parámetro que se considera que es medido en forma relativamente correcta; sin embargo, en general su registro en espacio y tiempo son insuficientes, lo cual incorpora errores de millones de m³ de agua en los cálculos realizados para una cuenca o acuífero.

La escorrentía es factible medirla, más pero usualmente sólo se estima por medio de índices (un porcentaje de la lluvia acaecida) que no tienen representatividad de las condiciones de campo. De la extracción reportada, es común que se mida sólo entre 20 a 30% de ese valor, el resto se estima con base en diferentes condiciones de uso. La evapotranspiración tampoco es medida, sólo se estima por medio de fórmulas empíricas, lo cual lleva consigo un error sustancial que incluso es difícil de determinar para hacer cualquier corrección al caso.

Adicionalmente a lo anterior, el balance tiene una limitante aún mayor, aunque al final se determinara con un error aceptable, de un 5-10% (que nunca es el caso), bajo ninguna circunstancia los valores obtenidos permiten conocer el funcionamiento del sistema analizado y, por lo tanto, tampoco es posible saber cuál será la respuesta ambiental, y del agua en sí, en caso de que se buscara extraer el “excedente” de agua si el balance apuntara a que hay algún caudal de agua asequible; es obvio que un balance hídrico positivo podría sugerir que es factible extraer un caudal adicional de una área dada; sin embargo, un balance considerado “exacto” o “aceptable”, no permite definir y prevenir las dificultades con la calidad del agua que se obtendría, aspecto que ha sido por demás un impacto de preocupación notable en el país. Así, en otras partes del mundo, desde la década de los años 1970's, debido al manifiesto deterioro de la calidad del agua por manejo indebido de residuos y una mayor necesidad de agua en cantidad y de buena calidad, se comenzó a estudiar el agua subterránea desde una perspectiva particular, desarrollando una metodología que la incorpora como un elemento dinámico, usando una óptica integradora, donde las principales variables del ambiente consideran que la presencia, o ausencia, de agua está íntimamente integrada en evidencia que puede ser definida con relativa facilidad como vegetación, estructura geológica, litología, presencia-ausencia de agua superficial, química del suelo, tipo de suelo, calidad del agua, (Tóth, 2000). Paradigma de análisis integrador de información ambiental que permite plantear propuestas del paisaje bajo las condiciones presentes en campo, se denomina: Teoría de los sistemas de flujo de agua subterránea. Con respecto al análisis de cuenca vs. sistemas de flujo de agua subterránea, la comprensión de los diferentes sistemas de flujo que forma el agua subterránea permite su manejo sustentable y de los ecosistemas asociados.

En otras palabras, es importante definir y comprender el funcionamiento del agua subterránea desde una óptica integrada donde se incorporen diferentes componentes (directos e indirectos) implícitos en su funcionamiento, lo cual incluye la definición de los diferentes sistemas de flujo de agua subterránea presentes, esto implica lograr una caracterización aceptable de la relación entre distintas evidencias de la presencia (o ausencia) de agua en diferentes componentes del ambiente. Es importante recordar que esta metodología implica incorporar en forma explícita al agua superficial, vegetación natural, suelo, geomorfología, características físicas y químicas del agua, así como otras evidencias del agua subterránea. Comúnmente *cuenca superficial* se define como la superficie topográfica de influencia donde la precipitación acaecida fluye hacia un río en común; sin embargo, estudios han demostrado que en muchos lugares del mundo existe dependencia hidráulica subterránea entre cuencas superficiales separadas no necesariamente contiguas. El caso de la Cuenca de México no es la excepción, el referente geológico existente marca una continuidad física con cuencas vecinas; la conexión hidráulica subterránea se torna evidente por la edad del agua profunda captada en el Distrito Federal (Edmunds et al, 2002). Esta vinculación es enmascarada por la respuesta lenta de tipo hidrológico, o de otras componentes ambientales, o porque su relación no se detecta fácilmente; esto ha conducido a errores de interpretación al analizar diversas respuestas, por ejemplo: ¿de dónde viene el agua extraída? ¿qué efectos produce la extracción en un pozo? ¿qué pasa si se foresta o deforesta? ¿qué relación guarda extracción con subsidencia? ¿qué sucede con los manantiales y cuerpos de agua si se extrae agua subterránea? Por supuesto, tampoco se plantea la pregunta sobre ¿qué sucederá en un futuro cercano con la calidad del agua extraída?

Actualmente se aplica el concepto de *continuidad hidráulica regional* en diversos sitios del mundo; así, se reconoce que existen sistemas de flujo de agua subterránea que viajan a escala regional y bajo interdependencia hídrica (subterránea) entre distintas zonas de una cuenca, o entre determinadas cuencas superficiales.

En efecto, los resultados de estos estudios van más allá del balance hídrico usado en forma oficial en México y en el Distrito Federal desde principios de la primera mitad del siglo pasado; sin embargo, ahora en otros países se busca describir el camino de recorrido del agua subterránea y se plantea el uso no sólo del análisis estricto de

características hidráulicas, químicas e isotópicas del agua sino que el análisis se complementa con indicadores indirectos que dan luz sobre la presencia, o ausencia, del agua subterránea identificada; información que en conjunto permite definir los sistemas de flujo de agua subterránea y su funcionamiento.

Así, la *cuenca superficial* se vincula principalmente con el patrón topográfico, mientras que la **Cuenca Unitaria** es la unidad básica de los sistemas de flujo y resulta de la continuidad hidráulica subterránea regional. La última no se define por contraste topográfico sino por contraste hidrogeológico (del subsuelo) que generan flujos que no necesariamente pertenecen (se originaron) en la cuenca superficial de interés, a menudo donde existe la descarga. Este es el caso de los flujos profundos (con alta temperatura) registrados en la cuenca de México que potencialmente se han generado más allá de sus límites superficiales. En contraste los flujos de agua fría, como los que se descargan al pie de la Sierra de Chichinautzin, que si se generan en los límites de la cuenca. En este trabajo se tiene la propuesta de que la *unidad básica de diagnóstico del agua subterránea* sea el **Sistema de Flujo Subterráneo** y que se define como “una unidad natural y coherente, en espacio y tiempo, consistente de agua subterránea de calidad fisicoquímica particular, que circula por materiales geológicos con expresión geomorfológica, con vegetación, y con suelo, particulares”.

Desde un referente práctico de aplicación, los sistemas de flujo subterráneo poseen *zona de recarga* (flujo natural de agua descendente); *zona de tránsito* (flujo natural lateral y horizontal del agua), y *zona de descarga* (flujo natural de agua ascendente). Cada zona posee condiciones físicas, químicas y biológicas donde el agua es el eje articulador ambiental y donde su manifestación es completamente diferente y contrastante.

Asimismo, se reconoce para fines de la caracterización y evaluación del agua subterránea en la región de Xochimilco que existen tres **sistemas de flujo básicos**: *local, intermedio y regional*. (Figuras 20 y 21). Estos quedan definidos por la longitud y profundidad de recorrido del agua que lo forma. Es importante indicar que los flujos mantienen en el medio subterráneo un recorrido separado (igual que las corrientes en los océanos).

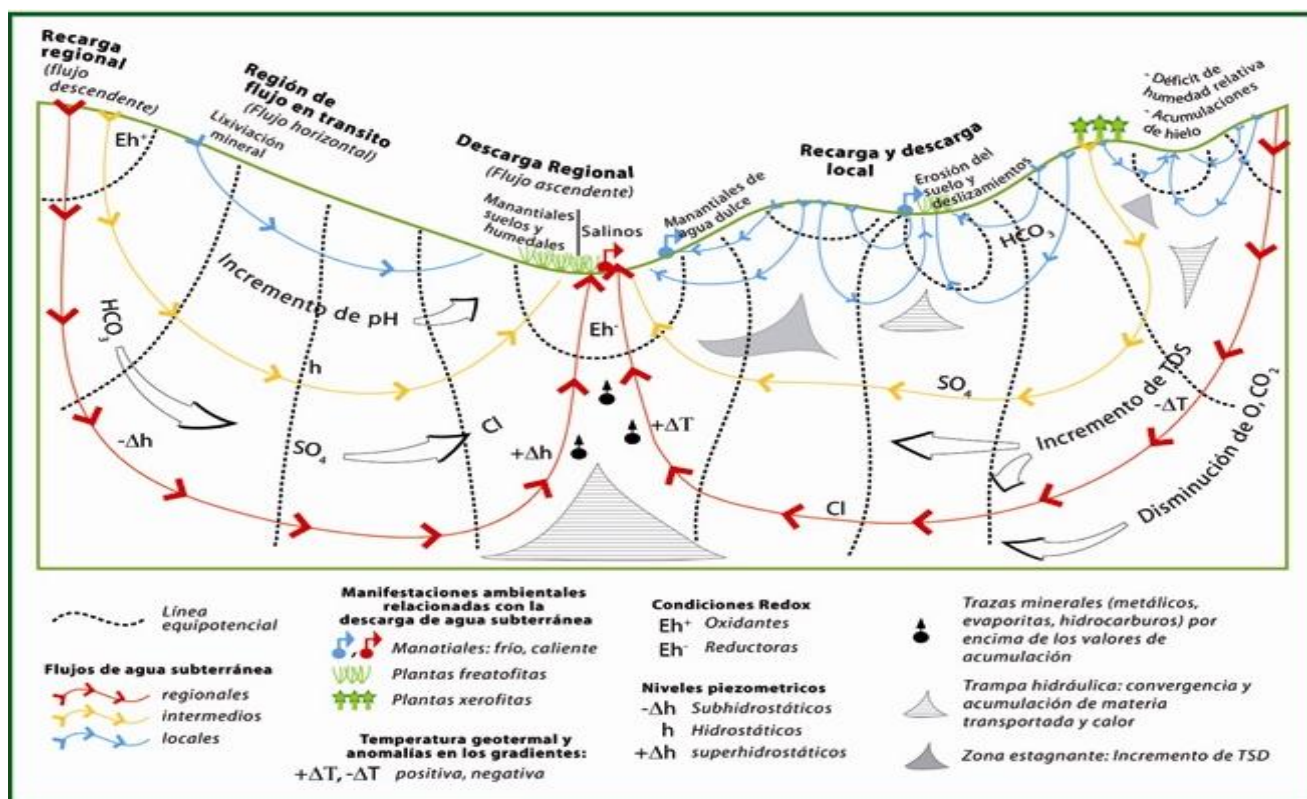


Figura 20. Sistemas de flujo (local, intermedio y regional) de agua subterránea mostrando zonas de recarga, tránsito y descarga, e indicadores ambientales indirectos asociados.

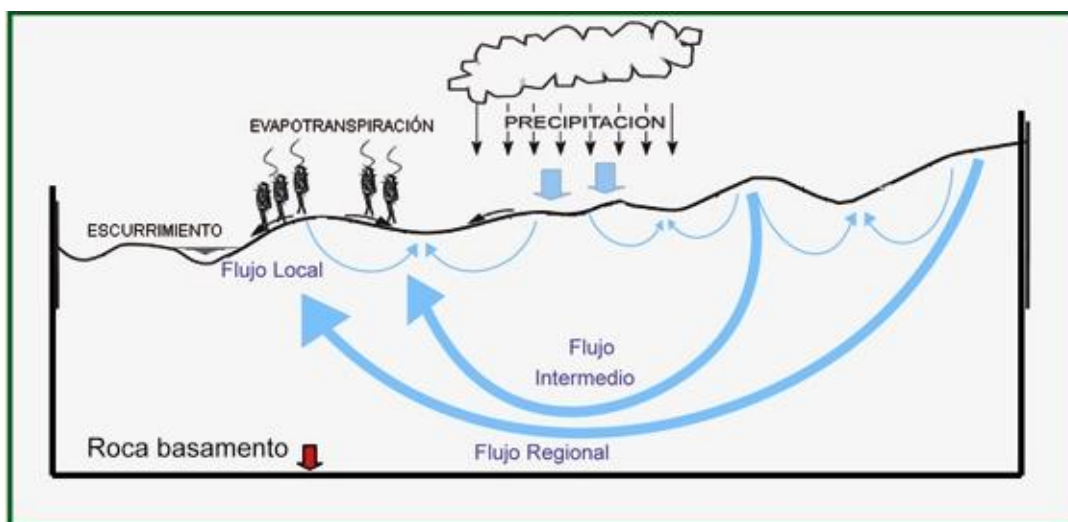


Figura 21. Representación simplificada de sistemas básicos de flujo de agua subterránea: local, intermedio y regional.

Un elemento esencial de análisis es la definición de la *calidad fisicoquímica* del agua para postular el funcionamiento de una *zona de descarga-recarga dentro de un sistema*, así como para definir el *tipo de sistema* al que pueda pertenecer. Esto es posible porque el agua tiene “*memoria de su recorrido en sus moléculas*”: concentración característica de aniones, sólidos totales disueltos, cationes, si es dulce o salobre, si es fría o caliente, si es vieja o joven, si se precipitó a nivel del mar o en la montaña, cuánto oxígeno disuelto contiene, es ácida o alcalina, o si tiene algún elemento contaminante. Es importante enfatizar que el recorrido del agua de cada sistema queda manifiesto en su zona de descarga; ahí también queda impreso el tipo de jerarquía de flujo (local, intermedio o regional) al que pertenece. Esto implica que si bien un sistema es dinámico, su recorrido lo hace siguiendo leyes físicas y termodinámicas que se manifiestan en cambios en su temperatura, pH, Eh, alcalinidad, contenido de elementos traza e isótopos que se incorporan en cada flujo particular (Figura 20). La teoría de los sistemas de flujo, desarrollada en las últimas décadas (Tóth, 2000) ha sido el factor determinante de cambio en la perspectiva tradicional de estudio del agua subterránea, logrando con ésta entender su funcionamiento. Entendimiento que permite planear su manejo, facilitar su protección y proponer controles ambientalmente viables. La visión de enfoque sobre cómo se ha manejado el agua subterránea en el mundo ha ido evolucionando con el tiempo, es notorio que las primeras investigaciones realizadas desde la segunda parte de la década de 1930's estaban dirigidas al análisis de la respuesta cuantitativa del agua producida por una extracción (Theis, 1935) en una unidad acuífera (que no es necesariamente lo mismo que en México se ha llamado acuífero) donde la respuesta entre la superficie freática observada debido a la extracción en el pozo, y su relación con las características de porosidad y conductividad hidráulica de la unidad acuífera era el foco de interés. Así y como una consecuencia de la presencia de las computadoras, fue posible hacer cálculos y simulaciones del flujo de agua subterránea, no sólo de la respuesta de la superficie freática a la extracción de un pozo en una unidad acuífera, sino también de la respuesta de la extracción en un campo de pozos localizados en varias unidades acuíferas. Cálculos en los que el balance hídrico fue base fundamental de los algoritmos utilizados y el referente era únicamente el sitio donde se localizaba el pozo, o campo de pozos, el límite inferior lo constituía la profundidad del pozo, mismo que usualmente debía llegar a una unidad geológica denominada “*impermeable*”.

Hasta estas fechas las características fisicoquímicas del agua sólo son usadas para establecer su calidad con respecto a normas de aplicación para el diferente uso propuesto; el apoyo de datos sobre la vegetación, tipo de suelo, relieve y estructura geológica; el mensaje incluido en las moléculas del agua sobre su recorrido no era incorporado en el análisis efectuado. Es posible que una visión holística existiera desde mediados de los años 1960's cuando a través de estudios que entonces eran relativamente “modernos” (se debe recordar que la aplicación de *pruebas de bombeo* está en el medio desde 1935) donde la aplicación en México del *balance hídrico* no incorporó la visión de *Hubbert* (1940), tampoco los conceptos de *Tóth* (1962 y 1963) y menos se incorporaron avances de *Freeze* y *Witherspoon* (1966 y 1967) contemporáneos a los de *Tóth* (1962 y 1963). Investigadores cuyo trabajo desde esos años sugerían ya la importancia del flujo subterráneo comunicando cuencas superficiales.

En suma, al ver el contenido de las publicaciones internacionales que se realizan a principios de los 1960's sobre el funcionamiento regional del agua subterránea salta la pregunta de ¿por qué en México se establece en forma oficial un análisis tan básico del agua subterránea y con condiciones de frontera irreales?.

Es evidente que estos conocimientos no han sido considerados respecto a la posibilidad e importancia de definir el flujo real del agua subterránea en el Distrito Federal como tampoco de las condiciones reales de frontera al flujo planteadas por investigadores del párrafo anterior. Esto es evidente, cuando se considera la profundidad de los pozos construidos en el Distrito Federal.

4.4.4.1 Referente del acuífero vs sistemas de flujo

Desde esta perspectiva es menester indicar que el manejo de información sobre agua subterránea ha estado caracterizada por el análisis integrado de complejos sistemas hidrogeológicos regionales que incorporaban las aguas superficial y subterránea. En este análisis se deja de considerar al acuífero como el elemento clave para el manejo del agua subterránea y se considera como una variable más del sistema a definir (Rushton, 2003; Price, 2003).

El planteamiento de un enfoque integrado y más completo del manejo del agua subterránea fue introducido en 1986 por *Engelen y Jones*, donde se considera que la visión clásica orientada a la unidad acuífera debe ser replanteada considerando la existencia de flujos de agua subterránea entre diferentes unidades acuíferas, ratificándose el concepto de *sistemas de flujo*.

Es evidente que la unidad acuífera es un componente importante en cualquier sistema ya que es la que almacena, conduce y aporta agua al pozo, pero bajo esta nueva perspectiva, son los sistemas de flujo quienes representan la unidad funcional básica del sistema hidrogeológico. Tóth (2000) ha confirmado mediante el análisis del flujo del agua subterránea en cuencas, que diferentes sistemas de flujo pueden ocupar una misma unidad acuífera; o por el contrario, que un mismo sistema de flujo puede circular por dos o más unidades acuíferas, los trabajos de este investigador se iniciaron en 1963 produciendo importantes y diferentes avances complementarios a través del tiempo.

En este sentido, existen un par de condiciones fundamentales en la cuenca de México por las que se propone la aplicación de la teoría de los sistemas de flujo para identificar y caracterizar la entrada de agua de calidad no deseable: i) la escasa información espacio-temporal en cualquiera de las ramas de la ciencia que se desee aplicar (hidrología superficial, botánica, climatología, hidrogeología, litología, agronomía, edafología o cualquier otra que se requiere considerar) para plantear los procesos involucrados en el cambio de calidad del agua obtenida en pozos de extracción, y ii) la alta incertidumbre que ocasiona carecer de información suficiente y confiable a fin de definir elementos necesarios para corroborar en forma clara variables de respuesta sobre la validez del sistema planteado ya que adicionalmente se magnifica con modificaciones introducidas por actividad humana en tal sistema.

En general la teoría de los sistemas de flujo incorpora las respuestas aportadas por agua superficial, vegetación, clima, agua subterránea, unidades geológicas, uso del suelo, tipo de suelo; y debido a que cada uno de estos componentes es parte del sistema integral de funcionamiento de la región, en consecuencia deben ser congruentes entre sí.

4.4.4.2 Caracterización de los sistemas de flujo

Esta caracterización puede llevarse a cabo con base en métodos de gabinete que incluyen herramientas como el uso de modelos computacionales como Modflow (McDonald y Harbaugh, 1988) para representar el comportamiento hidráulico subterráneo que requiere de un soporte sólido de trabajo de campo. Los modelos PHREEQC y PHREEQC-a son esenciales para el manejo de datos físicos y químicos del agua, los cuales fueron elaborados por Parkhurst, et al. (1980) y Parkhurst (1995) respectivamente.

Estos modelos son de gran ayuda para definir, entre otros aspectos, los grupos (flujos) extremos, la profundidad a la que circularon (con geotermómetros) así como diferentes procesos químicos y físicos que permiten caracterizar el movimiento del agua subterránea. Por supuesto, existen otras herramientas de singular importancia como los sistemas de información geográfica que permiten un manejo eficiente de datos de campo que incluyen imágenes de satélite. Sin embargo, una interpretación clara y realista del significado de la información asequible requerirá de un entendimiento de los procesos relacionados con los diferentes sistemas de flujo que puedan estar presentes.

Los métodos de campo incluyen localización cartográfica de indicadores superficiales de agua subterránea analizados en forma conjunta con la topografía y unidades geológicas del subsuelo. Los indicadores superficiales consisten del resultado de observaciones que se refieren a la presencia de agua subterránea, y que incorporan: i) determinación de flujo base en ríos y humedad en el suelo, ii) presencia de afloramiento de agua subterránea, iii) presencia de vegetación freatofita, iv) características físicas y químicas del agua subterránea, v) datos incorporados en un mapa topográfico, vi) presencia de suelo salino-alcalino, o ácido, vii) registros de perforación, viii) imágenes de satélite, entre otros.

En general la metodología de los sistemas de flujo explica lo que se observaría si se detiene el flujo de agua subterránea un instante, y se visualiza su movimiento en el plano vertical, esto resultará en la definición de sus zonas de recarga y descarga (Figuras 20 y 21) donde con la topografía y el referente geológico presente se pueden lograr definir tres sistemas principales de flujo de agua subterránea: local, intermedio y regional.

En efecto, una topografía abrupta, producirá varios sistemas de tipo local, en cada alto topográfico el agua entra y sale en el mismo valle, su distancia y profundidad de recorrido serán corta y somera, por lo que el agua subterránea adquiere salinidad baja y poca temperatura. Desde el punto de vista de su calidad química, el agua en la zona de recarga tendrá alto contenido de oxígeno disuelto y valor alto de Eh (potencial redox), bajo pH (ácido), baja conductividad eléctrica (CE). La calidad física y química del agua en la descarga de un flujo de este tipo tenderá a manifestarse con cierto contrastante, pero no muy marcado, con aquella de su recarga. Así, si se determina la calidad del agua a la descarga es evidente que ésta tendrá menos oxígeno disuelto, un valor más bajo de Eh (potencial redox), que el valor del pH sea sensiblemente más alto y que la conductividad eléctrica ascienda. Estos contrastes en la calidad del agua serán definitivos para identificar sistemas de flujo de diferente jerarquía, contrastes que se entenderán más claramente al examinar las características de un flujo regional y al compararlos con un sistema de tipo regional.

En algunos casos parte del agua que entra en una zona de recarga podrá descargar en otro valle localizado a un nivel topográfico menor, incluyendo dentro de su extensión la presencia de varios flujos de tipo local, estos podrán ser contenidos por un sistema de flujo que los limita a profundidad (notar que el flujo local no podrá avanzar más hacia abajo ya que el medio está saturado por agua con un recorrido mayor) esto definirá un **sistema de flujo intermedio**. Su profundidad de recorrido será más profunda que la de un sistema local, adquiriendo el agua mayor temperatura que aquel y, comparándolo desde el punto de vista de su calidad físico-química tendrá menor contenido de oxígeno disuelto y un Eh más negativo que un sistema local, así también tendrá un pH más alcalino y una concentración relativamente más alta de sales disueltas (CE) que un flujo local.

Comparativamente el agua de un **sistema regional** circula a mayor profundidad que un flujo local e intermedio y recorre desde la parte más alta, a la zona de descarga con más baja elevación topográfica. Debido a que este flujo tiene gran profundidad de recorrido el agua adquiere mayor temperatura que cualquier otro tipo de flujo.

Desde la perspectiva de calidad química del agua, ésta tendrá el menor contenido de oxígeno disuelto y Eh (incluso negativo), el valor de su pH tenderá a ser el más alcalino, y mayor será la concentración de sales disueltas (CE). Desde la perspectiva de cantidad, es el que comparativamente (con flujos local o intermedio) contiene más volumen de agua subterránea y por tanto está prácticamente fuera de efecto inmediato por cambio en las condiciones del clima (ie, por períodos de sequía). Se enfatiza de nuevo, que las zonas de recarga y descarga están estrictamente controladas por flujo vertical con componentes de movimiento del agua hacia abajo, y hacia arriba, respectivamente. En efecto, el agua de infiltración se mueve hacia abajo en las zonas de recarga; el agua subterránea en la descarga empuja continuamente hacia arriba. Como se trata en este apartado, despreciar estas componentes verticales de flujo del agua subterránea, ha resultado en impactos ambientales serios a la calidad del agua suministrada; así, en sentido estricto la falta de incorporar las componentes verticales de flujo ha resultado en una evaluación errónea de la respuesta del agua subterránea, lo cual incluye el deterioro de la calidad del agua extraída por pozos.

4.4.4.3 Información básica para definir los sistemas de flujo

Si bien todos los aspectos a manejar en agua subterránea no son usualmente abordables por un profesional involucrado en calidad del agua, se tiene la intención de informar sobre los aspectos que es necesario incorporar en cualquier proyecto de calidad del agua a fin de comprender la complejidad del sistema natural y en particular de cómo el funcionamiento del agua subterránea está enlazado con el resto de las variables del ambiente. Así, se pretende que *este profesional*, al menos, de cuenta de la importancia que tienen diversas variables del ambiente, las que se deben incorporar el conocimiento del área y región bajo estudio previo a su intervención.

Es recomendable que estos estudios se realicen por especialistas en sistemas de flujo de agua subterránea coparticipando con especialistas de otros campos del conocimiento como ciencias de la tierra, biología, edafología y química.

Diversos pensadores desde tiempos históricos se han interesado en plantear, entender y definir el comportamiento del agua (subterránea). Durante los siglos IXX y XX se han

realizado innumerables esfuerzos para establecer aspectos metodológicos que han permitido, un cierto grado de exactitud, y bajo condiciones específicas, haciendo posible cuantificar diversas de las variables involucradas, tanto para el agua superficial como para la subterránea. Sin embargo, los métodos que se usan para calcular las diversas variables involucradas con el agua, por un lado no la consideran parte insoluble del ambiente, y por otro lado, se olvida que los métodos aseguibles en la literatura han sido concebidos con una serie de condiciones de control para su aplicación, las cuales se ven adicionalmente complicadas ya que los métodos originalmente fueron concebidos para condiciones climáticas y geológicas particulares y contrastantes con las existentes en México. Esto es, usualmente, y en forma desafortunada, métodos diseñados para zonas de clima templado y húmedo se aplican en sitios áridos y semi-áridos sin mayor explicación, y sin acreditar alguna justificación técnica que valide el ejercicio realizado.

Desde otra perspectiva, el tipo de mediciones deseables a manejar para conocer las variables involucradas en un medio natural tiene que ver con aquellas que permiten definir como funciona el agua subterránea y que dan información sobre su interacción con el agua superficial, con el suelo y con la vegetación, ya que estas características resultan de la presencia particular del agua subterránea. En consecuencia, se considera necesario definir los siguientes puntos y realizar mapas y secciones correspondientes (Tóth, 2000) con las que se logre visualizar el movimiento del agua subterránea en tres dimensiones, definir los flujos presentes, su jerarquía y sus características particulares, esto es factible lograrlo evaluando la siguiente información:

- Profundidad a roca basamento. Se debe determinar para tener control sobre el espesor del material acuífero involucrado (no es lo mismo un basamento a cien metros que uno a dos mil metros de profundidad); y determinar la extensión del flujo de agua subterránea así como el tipo de jerarquía de flujo que se puede desarrollar (en un espesor pequeño sólo se desarrollarán sistemas locales, en uno de mayor espesor se podrán formar sistemas regionales).

- Tipo de material acuífero. Puede ser roca fracturada, o material no consolidado (el flujo es más rápido en fracturas que a través de poros inter-granulares), composición mineralógica (los elementos químicos que se disuelven al agua en un flujo en roca caliza serán contrastantes con los disueltos en una roca volcánica ácida)
- Estructura geológica (control de distancia y profundidad de recorrido del flujo de agua subterránea) a través de la distribución geográfica de unidades litológicas preponderantes (una distribución restringida permite distinguir la presencia de flujos locales; las unidades geológicas con amplia distribución geográfica permite inferir la presencia de sistemas de jerarquía regional y comunicación intra-cuenca).
- Propiedades hidrogeológicas (coeficientes de almacenamiento, dispersión y retardo; porosidad; conductividad hidráulica) permiten definir velocidad de traslado del agua del flujo en cuestión, entre otras determinaciones
- Distribución de calidad química del agua (iones mayores, menores, traza e isótopos) permite separar diferentes sistemas de flujo por calidad química y zona potencial de recarga, así como identificar compuestos o elementos índice que los distingue
- Toma de parámetros en campo (temperatura, alcalinidad, pH, Eh, CE, OD) en agua subterránea (incluye manantiales) aporta información complementaria sobre tipo de flujo y componente de recarga o descarga (un flujo local, comparado con un regional, es más frío, tiene más baja alcalinidad, el pH es más ácido, el oxido-reducción es más positivo, la CE es más baja y el contenido de OD es mayor)
- Presencia de elementos edáfico y biológicos indirectos (un suelo alcalino-salino es característico de zona de descarga de sistema regional; un humedal y la presencia de plantas freatofitas son característicos de aporte importante y activo de agua dulce de un sistema intermedio; la existencia de depósitos de precipitado y manantiales termales permite intuir la presencia de flujo regional)

- Elevación relativa del nivel freático observado en pozos y piezómetros adyacentes a diferente profundidad permite postular la presencia de flujo vertical ascendente (descarga) o descendente (recarga).

En la Figura 20 se representa en forma compacta aspectos que se consideran suficientes para una posible caracterización del funcionamiento del agua subterránea; en forma específica, para delinear sistemas de flujo que caracterizan una región de interés.

Desde esta perspectiva, se incorporan conceptos que es necesario evaluar e incorporar bajo el criterio de que se está analizando un sistema físico cuyos datos representan un ente de tres dimensiones, por lo tanto es deseable realizar una serie de secciones y mapas que deberán, a lo más posible incorporar su variabilidad en 3-D (planos vertical y horizontal), definiendo los siguientes aspectos:

- Distribución del tipo de litología que denote su calidad de acuífero (roca fracturada, material no consolidado) e incorporando su composición mineralógica.
- Distribución de estructura geológica y de formas topográficas.
- Distribución de propiedades hidráulicas de los materiales geológicos (porosidad, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, etc).
- Distribución de calidad química del agua (iones mayores, menores y traza) para las diferentes unidades litológicas, a través de isolíneas u otro diagrama indicativo (como los de Stiff).
- Distribución que incluya el valor individual de temperatura, pH, Eh, CE y OD tomados en campo sobre agua subterránea (datos sobre manantiales se tornan fundamentales).
- Distribución que incluya valores de carga hidráulica donde se proponga la dirección de movimiento del agua subterránea en 3-D.

- Distribución de indicadores indirectos de la presencia de sistemas de flujo –zonas de recarga y descarga– (freatofitas, humedales, suelo alcalino/salino, manantiales termales/fríos, depósitos de precipitado).
- Distribución de topografía, y presencia de litología hasta la profundidad de la roca basamento, mostrando estructura geológica, que incluya diferencia de carga hidráulica en la vertical y horizontal.
- Distribución de características químicas y propiedades hidráulicas proponiendo el tipo y jerarquía del flujo subterráneo presente.

El objetivo fundamental de establecer elementos de sistemas de flujo en un área determinada es conocer la dirección y velocidad de movimiento de las partículas de agua desde su lugar de entrada (zona de recarga) hasta la de salida natural (zona de descarga), donde se incorpore la zona de tránsito que une a las dos primeras zonas. Este análisis desde la perspectiva de los objetivos planteados permitirá definir la calidad del agua de los sistemas de flujo existentes y con base en ello establecer zonas donde la calidad del agua ha cambiado por la extracción presente, así como posibles formas de control natural de la calidad del agua extraída. La teoría general indica que el agua circula a diferente profundidad estableciendo diferentes sistemas de flujo (local, intermedio y regional) que en un sitio particular pueden observarse sobrepuestos en forma estratificada y con diferente espesor. Esto implica que en una región determinada existen diferentes zonas de descarga y también de recarga. Debido a que normalmente no se tiene información discreta (a diferente profundidad) en pozos y con una distribución amplia que permita definir el movimiento de circulación y la calidad del agua en los planos vertical y horizontal, se torna necesario recurrir a elementos tanto directos como indirectos de donde se pueda inferir una serie de mecanismos y procesos que permitan conocer el funcionamiento de los diferentes flujos de agua subterránea; este conocimiento permite hacer factible una toma de decisiones con mayor validez que tendrá un control más positivo sobre los volúmenes de agua involucrados y efectos posibles de cualquier extracción sobre cambio en cubierta vegetal, subsidencia, secado de manantiales, y calidad del agua extraída, entre otros.

En este marco los mapas y secciones del funcionamiento del agua subterránea son los insumos básicos para la comprensión y su manejo siempre y cuando muestren la siguiente información:

- Profundidad a la superficie freática (o potenciométrica)
- Elevación de la superficie freática referida al nivel del mar
- Carga hidráulica (potencial) deducida del peso de la columna de agua
- Posición del potencial en el plano vertical
- Presencia de manantiales, humedales, suelo salino
- Presencia de vegetación xerófila, halófila y freatofita.

En lo concerniente a la hidráulica subterránea, para definir velocidad y dirección de movimiento del agua subterránea, si los pozos no registran cambio en la temperatura del agua extraída, esto es si la temperatura es homogénea a lo largo de la duración de la prueba (varios días), se puede usar la elevación del nivel freático obtenido así como de la presencia de cuerpos de agua y manantiales, los cuales representarán la posición de la superficie freática, de donde es factible establecer la dirección general de movimiento del agua subterránea en el plano horizontal, dirección sugerida por el desplazamiento perpendicular de una partícula de agua de un punto de mayor potencial (elevación) hacia otro de menor potencial. Será necesario incorporar información similar en el plano vertical (en secciones) para evaluar el movimiento del agua subterránea en ese plano de donde sea factible estimar la posición clara de zonas de recarga o de descarga y el movimiento del agua subterránea hacia el pozo de extracción.

De ser necesario se deberá evaluar el diferencial vertical de temperatura (y salinidad) en los aprovechamientos para realizar la corrección correspondiente por efecto de diferencia de densidad del agua y obtener valores representativos de la carga hidráulica real. Las propiedades hidráulicas (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, porosidad) podrán integrarse (en especial) para conocer la velocidad de movimiento del agua subterránea.

En particular, es deseable incluir todos aquellos elementos que denoten **indicios de zona de descarga**, donde el movimiento del agua subterránea tiene una componente vertical ascendente, por lo que también es factible incluir en este concepto la escorrentía superficial y cuerpos de agua perennes. Una razón de hacer esto es que son datos fidedignos de la posición de la superficie freática y del funcionamiento del agua subterránea, que se logran con relativa facilidad y bajo costo. Dentro de esta misma filosofía, otro insumo necesario aconsejable lo representan los datos de indicadores indirectos de características de la presencia agua subterránea a través de:

- Distribución de vegetación freatófita y de *galería*, así como de la xerófita, y
- Distribución de presencia de suelos salinos o/y sódicos y vegetación halófila.

Otra herramienta adicional para lograr llegar a la definición del funcionamiento del agua subterránea es a través de determinar **la jerarquía del flujo** (local, intermedio, regional) a la cual pertenece el flujo de la zona de descarga identificada. Para esto, un insumo fundamental es aquel que representa su calidad fisicoquímica ya que ésta contiene un archivo del camino recorrido por el agua:

- Elevación donde se precipitó el agua de recarga, que es factible identificar con isótopos ambientales ($\delta^{18}\text{O}$ y δD).
- Tipo de roca por donde circuló, que imprimió características químicas particulares con iones mayores, menores y traza disueltos.
- Profundidad de circulación mínima del agua con ayuda de geotermómetros.
- Procesos físicos y químicos que condicionan su calidad, con temperatura, pH, Eh, OD, CE, alcalinidad.

Por lo anterior asimismo es necesario establecer:

- Distribución de calidad físico-química del agua (iones mayores, menores y traza así como isótopos) en las unidades hidrogeológicas, incluyendo parámetros medidos en campo (pH, Eh, CE, OD, alcalinidad y temperatura).

Además, en relación con aspectos físicos se necesita tener información sobre:

- Profundidad a roca basamento (regional), distribución de material acuífero, estructura geológica, propiedades hidráulicas de los materiales geológicos.
- Indicadores indirectos de la presencia de agua (suelo y vegetación).
- Posición y tipo de aprovechamiento de agua subterránea y superficial.

En general, se pueden usar tres tipos de componente para identificar el funcionamiento del agua subterránea i) físico-químico, ii) hidráulico, y iii) indicadores indirectos.

En el caso del primero, la *temperatura* es un excelente indicador de profundidad de recorrido del agua subterránea (además de un indicador básico de campo) ya que es factible estimar esto con el uso de geotermómetros y el gradiente geotérmico. En este sentido, sobresale la diferencia de temperatura del agua de recorrido (flujo) regional de la de un flujo local, la última estaría representada por agua con temperatura más fría.

Otro aspecto involucrado es la cantidad presente de *iones libres de hidrógeno* lo cual manifiesta que entre más ácida sea un agua (mayor cantidad de iones de hidrógeno) más reciente será su origen, en especial cuando se compara con un agua de infiltración más antigua que ha consumido estos iones volviéndose alcalina (con un pH más alto). Por supuesto, en regiones donde se tiene el aporte de CO₂ del manto (magma, como en el caso del centro de México) esto puede cambiar ostensiblemente haciendo más ácido el pH observado en campo, condición que se debe definir claramente con base en el referente geológico.

Desde el punto de vista químico la identificación de sistemas de flujo de diferente calidad química (y jerarquía) se puede realizar usando indicadores como *litio*, *sodio*, *sólidos totales disueltos*, y en su caso, el *cloruro*; cuya concentración se incrementa a mayor distancia y tiempo de recorrido, lo que también puede sugerir que el agua viajó a mayor profundidad.

En forma similar, la secuencia química evolutiva indica que el agua de reciente infiltración tiene un contenido de *bicarbonatos* mayor que *sulfatos* y éstos mayores que los *cloruros*. En cualquier caso, una relación relativamente inversa, sugiere la presencia de agua comparativamente más vieja, en efecto, un *agua con mayor edad relativa* será aquella que tenga una predominancia en concentración de *cloruros sobre los sulfatos y de sulfatos sobre bicarbonatos*.

En forma similar, otro indicador de tiempo relativo de residencia de un agua subterránea en el subsuelo está ligado con la *cantidad de oxígeno disuelto* que contiene, por lo que una agua de reciente infiltración (que ha estado en contacto últimamente con la atmósfera) tendrá mayor cantidad de oxígeno que aquella que lo ha perdido por haber tenido un recorrido mayor en el subsuelo.

En relación con el Eh, éste es más positivo en agua de reciente infiltración y se irá tornando más negativo a medida que el agua circule y pierda el oxígeno que contiene, sobre todo cuando no existe opción de reponerlo porque existieran, por ejemplo, condiciones de confinamiento del flujo en cuestión (por presencia de una capa impermeable superior).

Existen otros indicadores como los *isótopos*, tanto estables como radiactivos, los primeros como el deuterio (δD) y oxígeno-18 ($\delta^{18}O$) son usados para, entre otros objetivos, definir la elevación topográfica a la cual se precipitó el agua de recarga, así como procesos de evaporación (u otros) a que pudo estar sujeta el agua como puede ser el efecto por algún proceso hidrotermal. Los isótopos radiactivos como el carbono-14 ($\delta^{14}C$) permiten calcular, junto con el carbono-13 (^{13}C), la edad relativa del agua, de cuyo resultado se puede comprobar con el conocimiento de su velocidad de movimiento (usando el gradiente hidráulico, la porosidad y la conductividad hidráulica) y la distancia de recorrido del agua desde su sitio de entrada hasta el sitio de muestreo.

Para edades y procesos de menor edad es factible usar elementos radiactivos como el tritio para definir edades de menor lapso.

Un aspecto relevante de *identificar un sistema regional* (cuya agua tiene una edad antigua) es que tiene, *comparado con uno local* (cuya agua tiene pocos años de edad) un mayor recorrido desde su zona de recarga hasta el sitio donde se identificó. Una consecuencia de esto es que el flujo regional involucra y contiene mayor cantidad de agua que uno local, y al estar su zona de recarga usualmente muy distante y a una posición topográfica más elevada, implica que la cantidad de agua que contiene no es sensible a cualquier cambio estacional del clima, así la sequía de varios años no afectará sensiblemente el caudal de agua en la zona de descarga correspondiente. En el caso de un manantial local, se torna evidente que éste será afectado por interrupciones en el ciclo de lluvia.

Indicadores adicionales para la identificación de la descarga de sistemas de flujo pueden ser referidos a elementos indirectos (suelo salino, laguna, humedal, vegetación) que requieren de hacer uso complementario de información pertinente sobre la presencia de agua subterránea. Estos elementos pueden cubrir áreas de gran extensión, y representan información con un alto grado de confiabilidad. Estos datos que se consideran indirectos, no son comúnmente usados en estudios de agua subterránea aunque aporten información fundamental sobre zonas de descarga que debe integrarse al referente conceptual de funcionamiento de la región bajo estudio.

En efecto, la presencia de por ejemplo, un suelo salino indica claramente que ha habido un aporte continuo de descarga de agua subterránea a través del suelo en forma difusa la que al evaporarse ha dejado detrás las sales que se observan superficialmente; es usual que esta condición del suelo esté acompañada de otros indicadores como la presencia de manantiales de agua caliente, superficie freática somera, vegetación halófila, suelo arcilloso con concreciones de hierro-manganeso, entre otros. La presencia de una laguna, o humedal, son coincidentes en corresponder con zonas de descarga ya que en muchos casos éstas se encuentran en zonas donde la poca precipitación local no justifica su presencia y son coincidentes con una superficie freática somera y presencia de vegetación perenne de tipo de la denominada de galería, usualmente referida a plantas cuyas raíz toma agua directamente de la superficie freática (plantas freatofitas).

4.4.5 Conclusiones

Al examinar las actuales consecuencias de la extracción inadecuada del agua subterránea en el país y de la falta de una cabal comprensión del funcionamiento del agua subterránea; se hace evidente el grado de importancia que su mejor manejo tiene y tendrá para el desarrollo del país, ya que por un lado más del 99% del agua dulce asequible en el territorio está en el subsuelo y de ésta fuente dependen más de 70 millones de mexicanos (más del 70% de la población), más del 70% de la industria y más del 20% de la agricultura.

La falta de manejo que ha caracterizado a la extracción la causa principal de los efectos ambientales negativos producidos y que se han transferido al usuario, quien es señalado como el culpable, olvidando que existen autoridades legales responsables de la administración del agua en el país.

En diversas zonas del país, la extracción inadecuada del agua subterránea ha ocasionado, los siguientes efectos: *i)* cambio en las condiciones de recarga, *ii)* impacto extra-cuenca superficial produciendo reducción de la alimentación de agua dulce a lagunas costeras y cuerpos de agua continental, *iii)* incremento innecesario del uso de energía en la extracción por bombeo que resulta en abatimiento excesivo del nivel freático debido a la construcción y operación ineficiente de pozos, *iv)* desaparición de vegetación nativa, *v)* inundación por importación de agua de otra cuenca, *vi)* incremento de la erosión del suelo, *vii)* consolidación del suelo, *viii)* contaminación por inducción, vía extracción, de agua con calidad no deseable. Estos impactos se han caracterizado con base en información limitada publicada y asequible (ver: <http://www.aguasmx.igeograf.unam.mx/>) donde resaltan trabajos sobre procesos de consolidación y calidad (contaminación) del agua.

También es notoria la escasa cobertura nacional de los trabajos realizados, poniendo en evidencia la carencia de programas de observación y evaluación de resultados sobre el comportamiento del agua subterránea y su relación con diferentes componentes del ambiente.

Al tratar de definir la relación que guarda el agua (subterránea) con el ambiente es necesario invocar la definición de este último de acuerdo con la *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente* la cual lo define como “*el conjunto de elementos naturales o inducidos por el hombre que interactúan en un espacio y tiempo determinado*”, esto implica que el agua subterránea es parte indivisible del ambiente.

4.4.6 Curso de Capacitación para tomadores de decisión

4.4.6.1. Fundamentación y descripción general

Considerando el análisis presentado y como parte del “Estudio elaboración de un SIG participativo de la zona chinampera para identificar los riesgos relacionados con la afectación de la calidad del agua y los hundimientos en Xochimilco”, se propone un curso que incluya las preguntas sobre la calidad del agua subterránea establecidas en las secciones anteriores, así como el análisis los factores que condicionan su funcionamiento y su interacción en el referente de una *Cuenca Unitaria*, incluyendo una visión general sobre las restricciones de los modelos hidrológicos superficiales y el establecimiento de una alternativa y viable para obtener un nivel de referencia más confiable del funcionamiento del agua subterránea a largo plazo en este tipo de cuenca. Proporcionará elementos para conocer dicho funcionamiento, a fin de establecer con claridad los impactos asociados como son el hundimiento y el cambio de la calidad del recurso, en los cuales el funcionamiento del agua subterránea juega un papel preponderante. En el curso se mostrarán métodos de aplicación práctica para evaluar indicadores directos e indirectos de dicho funcionamiento y su interacción en la cuenca superficial de Xochimilco. Se buscará que el participante cuente con bases para apreciar la necesidad y posibilidad de integrar dicho funcionamiento a la gestión y manejo de una cuenca, así como a la realización de programas de ordenamiento territorial y ecológico asociados, permitiéndole apreciar el posible significado de la carencia de esta integración y programas. Durante su desarrollo se propondrán herramientas sencillas de análisis e integración de información para que se logre definir el estado básico del agua (subterránea) y su posible relación con bosque y cuenca. Se marcarán limitaciones y bondades de modelos computacionales comúnmente utilizados para estos fines incluyendo sistemas de información geográfica.

En el curso se hará énfasis en la información básica que se deberá incorporar para definir un modelo conceptual que represente el funcionamiento del agua subterránea a escala local y regional, el cual debe contempalr la congruencia entre datos observados en campo y el modelo teórico representado en el modelo de flujo para una cuenca, su cubierta forestal presente y las respuestas ambientales observadas.

4.4.6.2. Objetivos

1. Mostrar que el 95% del agua dulce asequible en el continente, representada por el agua subterránea, está ligada íntimamente con zonas de humedales, y cómo ésta influye directamente en el paisaje
2. Analizar limitaciones de modelos hidrológicos superficiales, en la búsqueda de información para definir impactos ambientales hidrológicos o el funcionamiento del sistema natural.
3. Manifestar la interacción de los sistemas de flujo de agua subterránea (local, intermedio, regional), con el ambiente y sus componentes (recarga, tránsito, descarga).
4. Revelar cómo evidencias superficiales incorporadas con la ausencia o presencia de agua subterránea, permite considerar los sistemas de flujo asociados.
5. Exponer herramientas sencillas para el estudio efectivo del agua subterránea, lo que permite integrar información asequible y aporta criterios para entender evidencias de campo.
6. Demostrar ventajas de entender el funcionamiento del agua subterránea como sistema con base en datos provenientes de distintas disciplinas, los cuales deben ser congruentes entre si.
7. Presentar impactos ambientales identificados por uso particular del suelo, agua, y paisaje.
8. Manifestar que el resultado obtenido de aplicar cualesquier tipo de modelo será una consecuencia directa del entendimiento de la fenomenología en él representada.

4.4.6.3. Contenido

1. Introducción

- 1.1 Conceptos básicos en hidrogeología
- 1.2 Modelos hidrológicos, limitaciones conceptuales
- 1.3 La cuenca hidrológica superficial, y subterránea ¿coinciden? Cuenca Unitaria

2. Consideraciones sobre sistemas de flujo de agua subterránea

- 2.1 Zonas de recarga, tránsito y descarga: diferenciación de componentes físicos, químicos y biológicos
- 2.2 Elementos geomorfológicos, isotópicos, hidrológicos, químicos y biológicos en la definición de zonas de recarga y descarga
- 2.3 Sistemas local, intermedio y regional; diferenciación de componentes biofísicos
- 2.4 Relación entre sistemas de flujo de agua subterránea y cuenca hidrográfica

3. Efectos al agua subterránea por impactos en el medio externo

- 3.1 Cambio inducido a la calidad del agua por extracción; su control (fluoruro, arsénico)
- 3.2 Reducción de descarga subterránea

4. Impactos ambientales por cambio en el régimen del agua subterránea

- 4.1 Vegetación y la descarga subterránea
- 4.2 Consolidación de matriz acuífera y hundimiento del suelo
- 4.3 Consumo innecesario de energía por extracción intensiva
- 4.4. Interacción agua subterránea – ambiente: Hacia un enfoque integrado

4.4.6.4. Profesor: Dr. José Joel Carrillo Rivera

Ingeniero Geólogo del Instituto Politécnico Nacional, posteriormente obtiene un Diplomado en Hidrogeología y Maestría en Hidrogeología del *University College* de Gran Bretaña. Obtuvo el grado de Doctor en Filosofía (Hidrogeología) de la Universidad de Londres, GB.

Una parte importante de su experiencia profesional en materia de agua subterránea la desarrolló en el Gobierno del Estado de Victoria, Australia, y en la Comisión Federal de Electricidad donde inició el *Grupo de Geohidrología*. Su experiencia la reforzó con su participación en el Instituto de Geofísica de la UNAM. Se incorporó al Instituto de Geografía donde es investigador Titular B. Ha participado activamente en investigaciones hidrogeológicas en Latinoamérica.

Su experiencia en docencia se refleja en los 37 cursos impartidos en los posgrados de Geografía y Ciencias de la Tierra, donde ha dirigido siete tesis de maestría, seis de doctorado y siete tesis de licenciatura. Ha sido presidente de varios de los 39 congresos y foros nacionales e internacionales que ha organizado. Forma parte de numerosos comités científicos, es revisor de nueve revistas científicas, evaluador del CONACYT y DGAPA; del 2001 al 2004 fue Editor Asociado del *Hydrogeology Journal*. Es editor invitado de *Balkema*, *Taylor & Francis Group* y entre otras de las revistas *Environmental Geology*, *Geofísica Internacional* y del Instituto Geológico y Minero de España. Ha sido galardonado como Miembro por Vida de la asociación *Ground Water*, es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias. Es Experto Independiente de la Comisión Europea, Miembro (nivel II) del Sistema de Nacional de Investigadores y nivel D del PRIDE. Es fundador: Presidente del Capítulo Mexicano de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos, y Vicepresidente de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo. Ha sido además Consultor para el CONACYT, y Asesor de la LVII Legislatura del Congreso de la Unión.

Sus principales líneas de investigación incluyen el funcionamiento del agua subterránea e impacto socioeconómico vinculado) destacándose las técnicas de aplicación hidrogeoquímica, de hidráulica subterránea e indicadores externos que aportan elementos de su funcionamiento (vegetación, geomorfología y suelo). Su aplicación implica el control a problemas de: calidad del agua obtenida por pozos, hundimiento del suelo, inundación, desaparición de cuerpos de agua superficial y vegetación.

4.4.6.5. Material de Estudio

Agua Subterránea de Mike Price traducido del inglés al español por el J.J. Carrillo y A. Cardona. Se aportará un CD con notas y artículos publicados sobre el tema general del curso.

4.4.6.6. Bibliografía

Appelo, C.A.J. y Posma, D., 1993. Geochemistry, groundwater and pollution. A.A. Balkema, Rotherdam, 536 pp.

Domenico P.A., 1990. Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons Inc. 824 pp

Fetter C.W., 1988. Applied Hydrogeology. 2nd Ed. Merrill Pub. Co. USA. 591 pp.

Freeze R.A., y Cherry J.A., 1979. Groundwater. Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, USA. 604 pp.

Price, M., 2003. Agua Subterránea. Editorial Limusa, SA de CV. 330 pp.

4.4.6.7. Destinatarios

Funcionarios tomadores de decisión y responsables técnicos directos, relacionados con el estudio, uso y conservación del agua subterránea en el Gobierno del Distrito Federal.

4.4.6.8. Modalidad y duración:

Nivel de Maestría. Se trabajará con clases con uso power-point y clases teórico prácticas con discusión de trabajos técnico/académicos. Duración cinco horas

5. REPORTE DEL GRUPO TEMATICO: CONTAMINACION Y CALIDAD DEL AGUA

5.1 EQUIPO DE TRABAJO

Con el Dr. Alfonso Vázquez Botello participaron la Bióloga Susana Villanueva Fragoso cuyas áreas de especialidad incluyen los estudios y análisis de metales pesados en agua, sedimentos y organismos de sistemas acuáticos (lagunas y ríos); así como de hidrocarburos disueltos/dispersos, breas y alquitranes en playas; en estos temas ha sido autora/coautora de artículos especializados publicados en revistas nacionales y extranjeras, en memorias y en libros sobre tópicos de contaminación con énfasis en metales pesados e hidrocarburos del petróleo. En el tema de capacitación ha impartido asesorías y cursos especializados sobre análisis de metales pesados por espectrofotometría de absorción atómica; asimismo contó con el apoyo de la Bióloga Maya Erin Morales McDevitt egresada de la UAM- Xochimilco. Los Curricula Vitae correspondientes, se incluyen en el Anexo 1 de este Informe.

5.2 OBJETIVOS DEL EQUIPO DE TRABAJO

- Identificar y compilar información de la región de la planicie lacustre Xochimilco y Tláhuac aplicable al caso, referente a la calidad del agua y/o contaminación del agua en el lago, los canales, el acuífero y/o los pozos de extracción; y
- Con base en su análisis determinar si existe relación con el proceso de hundimiento y/o de extracción de agua mediante pozos en la región, a partir de la recopilación y análisis de información bibliográfica sobre la calidad y la contaminación del agua en el lago y/o los canales del ANP-EXSGA; y/o del acuífero y/o de pozos de extracción de la región.

5.3 METODOLOGIA POR OBJETIVOS ESPECIFICOS

Para identificar y compilar información de la región de la planicie lacustre Xochimilco y Tláhuac aplicable al tema de la calidad del agua y/o contaminación del agua en el lago, los canales, el acuífero y/o los pozos de extracción; así como para tener una referencia de las condiciones que presenta y presentaba el sitio; la cual estuvo en posibilidad de

solicitar o adquirirse para los fines de este estudio, en instancias gubernamentales, académicas o privadas; el equipo de trabajo sobre contaminación y calidad del agua consideró como premisa principal, determinar si existe relación entre los datos de contaminación válidos identificados a través de la recopilación y análisis de la información y el proceso de hundimiento y/o de extracción de agua mediante pozos en la región; por lo cual y con ese enfoque implementó la siguiente metodología progresiva y sucesiva, por objetivos específicos:

- a. Se realizó la búsqueda bibliográfica de información sobre contaminación y calidad de agua disponible con referencia a la problemática ambiental del lago de Xochimilco y su área de influencia.
- b. Una vez recopilada la información existente se hizo un análisis, valoración y selección de la misma, con referencia a la temática ambiental que nos ocupa considerando como los principales problemas de contaminación y calidad de agua a los siguientes:
 - Microbiología sanitaria
 - Presencia y evaluación los parámetros físico-químicos relacionados con la calidad del agua (DQO, oxígeno disuelto, pH, nitritos, nitratos, nitrógeno total, fosfatos, fósforo total).
 - Presencia y niveles de contaminantes orgánicos e inorgánicos: metales, hidrocarburos del petróleo, y plaguicidas.
 - Evaluación metodológica de los parámetros físico-químicos y los contaminantes, así como su comparación con las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en caso de que existan, si no se hará la comparación de los niveles de contaminantes con normas y criterios internacionales que sean aplicables al caso.
- c. Con base en la revisión de la información existente y en dicho análisis:

- Se elaboró una diagnosis ambiental actualizada que incluyó la evaluación de los niveles de microorganismos patógenos, metales y metales pesados tóxicos, hidrocarburos de petróleo (HAPs) y plaguicidas organoclorados, así como sus posibles fuentes de aporte al lago de Xoxhimilco y su área de influencia..
- Se definieron recomendaciones específicas; basadas en la evaluación de la información ambiental existente.

5.4 RESULTADOS

REVISION Y ANALISIS DE INFORMACION SOBRE CALIDAD Y CONTAMINACION DEL AGUA EN EL LAGO Y O LOS CANALES DEL AREA NATURAL PROTEGIDA EJIDOS DE XOCHIMILCO Y SAN GREGORIO ATLAPULCO

Dr. Alfonso Vázquez Botello (Coordinador), Biól. Susana Villanueva Frago
y Biól. Maya Erin Morales McDevitt

A raíz del rápido crecimiento urbano, la ciudad de México incrementó la demanda de agua para abastecerse. En consecuencia, a partir de 1913, y con mayor intensidad después de 1945, se inició una explotación intensiva de los recursos hídricos del lago de Xochimilco, utilizando pozos y manantiales para el suministro de agua de la ciudad.

El resultado fue que los niveles de agua del lago descendieron de manera considerable y constante hasta que en 1957 ocurrió una descompensación del régimen hidrológico, alterando la agricultura de la región. Para remediar esa situación, entre 1957 y 1959, el departamento del Distrito Federal construyó una planta tratadora de drenaje para reabastecer de agua el lago.

En consecuencia y desde entonces, los canales de Xochimilco han recibido, como suministro principal, desechos orgánicos, detergentes, aguas de desecho urbano incompletamente depuradas (tratamiento secundario) de la planta tratadora de Iztapalapa, al igual que aguas negras y grises de las viviendas instaladas de manera irregular aledañas a los canales. Sólo en 1985, recibió 2500m³ de aguas residuales sin tratamiento.

Esto ha provocado un rápido deterioro de la calidad del agua, del ambiente en general y la hipereutrofización del sistema. Además, éste mal manejo ha ocasionado una peligrosa acumulación de nutrientes, colonias coliformes, virus entéricos, sodio, sales y metales pesados tanto en los suelos de las chinampas como en las aguas de Xochimilco.

Los alcances para esta revisión y análisis fueron los siguientes:

- Identificar y compilar datos científicos metodológicamente confiables publicados sobre la calidad del agua y la contaminación del agua en el lago y los canales en la región de la planicie lacustre Xochimilco-Tláhuac.
- Incorporarlos al SIG-P de la PAOT como parte de una herramienta informática que funcione como facilitador de la información y como una manera de consensar los datos sobre la situación que hay en la zona.

Para estos fines realizaron las siguientes actividades:

- Ubicar y analizar literatura en revistas electrónicas, así como publicaciones científicas, tesis, tesinas y estudios disponibles en bibliotecas de instituciones de educación superior e investigación científica con referencia a la calidad del agua, contenido bacteriológico y contaminación del agua en la región de la planicie lacustre Xochimilco-Tláhuac;
- Realizar búsquedas bibliográficas con énfasis especial en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco (UAM-X), el Centro de Información y Documentación Específica de Xochimilco (CIDEX) y el Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuernavaca (CIBAC) de la UAM- Se diferenció la información publicada de la que no ha sido publicada y la que está respaldada por el uso de las técnicas recomendadas por las Normas Mexicanas e Internacionales.
- Localizar y compilar una base de datos con la información bibliográfica de todos los estudios disponibles referentes a la calidad del agua y diversos tipos de contaminantes (contenido bacteriológico, contaminación por metales pesados, etc.), en la región de Xochimilco-Tláhuac.
- Analizar cada uno de los trabajos localizados, con énfasis en sus objetivos, sitios de muestreo, objetivos del estudio, métodos utilizados, resultados y conclusiones.

- Diferenciar, mediante el análisis de la base de datos localizada, los trabajos específicamente aplicables a los temas y el área de interés de este estudio, identificándose 49 trabajos aplicables, con estas características, cuya lista se presenta adelante (5.5.1).
- Evaluar de entre los trabajos aplicables, 28 cuya lista se presenta adelante (5.5.2), que conforme al análisis especializado correspondiente resultaron relevantes para este estudio por sus objetivos y confiabilidad metodológica, basada en el uso de técnicas recomendadas en las Normas Oficiales Mexicanas y/o internacionales; así como por su localización dentro o en las proximidades del Área Natural Protegida Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco.
- Seleccionar mediante juicio de experto, de entre los 28 trabajos relevantes, los más críticos, resultando cuatro de ellos (5.5.3) y hacer la localización espacial de los sitios de muestreo correspondientes a dichos trabajos sobre mapas satelitales Google Maps de Google, asignando diferentes colores a cada uno, para su incorporación georreferenciada dentro del SIG-Participativo de la PAOT, incluyendo una ficha de metadatos correspondiente.
- Elaborar la primera propuesta de ficha técnica estandarizada para metadatos de trabajos críticos, conteniendo: título, autores, año de muestreo, sitios muestreados, resultados críticos, parámetros medidos y metodología básica utilizada. Al final del estudio todos los trabajos relevantes que a juicio del experto resulten críticos para los fines de este estudio serán motivo de una ficha técnica específica.

5.4.1 Trabajos Aplicables

1. Acosta, J. 1990. Report on sanitary aspects of water quality in Xochimilco-Tlahuac-Chichinautzin. CIDEX-ARCHIVO VERTICAL. UAM-X.
2. Aguayo-Saviñón, M.A. 1993. Aspecto microbiológico y de calidad del agua de cuatro canales de Xochimilco. Primer Seminario Internacional de Xochimilco.

3. Alfaro-Flores, G. Et Al. 1987. Contaminación del lago Xochimilco. CIDEX-REPORTE DE INFORME MODULAR. UAM-X.
4. Altamirano-Méndez, J. Et Al. 1988. Contaminación de los canales y lago Xochimilco. CIDEX-REPORTE DE INFORME MODULAR. UAM-X.
5. Anónimo. 1972. Algunos aspectos del deterioro del agua en los canales del lago de Xochimilco. UNAM.
6. Anónimo. 1987. Contaminación de las aguas de los canales de Xochimilco y su repercusión en la salud de la población.
7. Anónimo. Sin año. Contaminación del lago Xochimilco. CIDEX-ARCHIVO VERTICAL. UAM-X
8. Arana-Magallon, F. 2001. Contaminación por metales pesados en la zona lacustre de Xochimilco. CIDEX-ARCHIVO VERTICAL. UAM-X
9. Arcos-Ramos, R. 1993. La importancia del conocimiento de la calidad del agua de los canales de Xochimilco. Primer Seminario Internacional de Xochimilco.
10. Alva-Martinez, A.F. 1996. La calidad del agua en la pista de remo y canotaje "Virgilio Uribe" México, DF con base en el contenido de nutrimentos y factores físicos. Informe de Servicio Social. UAM-X.
11. Baez, A.; R. Belmont; O. González. 1975. Modificación de la calidad de las aguas del lago de Xochimilco por el uso de aguas negras en su recarga.
12. Baez, A.P.; Belmont, R. 1972. Algunos aspectos del deterioro del área en los canales de lago Xochimilco. UNAM. 5-14.

13. Balanzario Zamorate, J. (Sin año). Contaminación de los canales de Xochimilco y su repercusión en las actividades económicas. UNAM.
14. Balanzario Zamorate, J. 1976. Contaminación de las aguas en los canales de Xochimilco Tesis de licenciatura. UNAM.
15. Benitez-Toledo, A. 2000. Concentración de algunos metales pesados (Pb, Cd y Zn) en el agua y en un invertebrado acuático (*Corixia* sp) de interés ecotoxicológico de la zona lacustre de Xochimilco. Informe de servicio social. UAM-X
16. Bojorquez-Castro, J.L.; L. Olguín-Sanchez; I. Roldán. 1994. Calidad del agua de los canales Aragón de Xochimilco en relación con el proyecto de rescate ecológico. Informe académico. UAM-X
17. Bravo-Rodriguez, G. Et Al. 1988. Contaminación y utilización del lago Xochimilco. CIDEX-REPORTE DE INFORME MODULAR. UAM-X.
18. Camacho-Piña, r. 1985. La problemática actual de la zona chinampera de Xochimilco, Distrito Federal. CIDEX-ARCHIVO VERTICAL. UAM-X
19. Castellanos Páez, M. 1978. Contaminación del agua en los canales de Xochimilco. CIDEX-REPORTE DE INFORME MODULAR. UAM-X.
20. Cepeda-Velázquez, M. J. 1993. Evaluación de la calidad de las aguas renovadas. CIDEX-REPORTE DE INFORME MODULAR. UAM-X
21. Chávez León, L. 2004. Determinación de los contenidos de cadmio, zinc y plomo en agua, sedimento y peces de la zona lacustre de Xochimilco, México. Tesis de licenciatura. UAM-X
22. CONANP. 2004. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar. SMA. 13pp.

23. DDF. Sin año. Plantas de tratamiento de aguas residuales de San Luis Tlaixialtemalco. CIDEX-ARCHIVO VERTICAL. UAM-X.
24. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Sin año. Calidad del agua y plantas de saneamiento. CIDEX-ARCHIVO VERTICAL. UAM-X.
25. Escobedo Flores, M. 1987. Estudio edafológico de chinampas de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco. Tesis de licenciatura. UNAM.
26. Espino-Nieves, M.E. Et Al. 1992. Problemática sobre la calidad y el tipo de agua. CIDEX-REPORTE DE INFORME MODULAR. UAM-X.
27. Espinoza, A.; C. Arias; S. Sánchez-Colón; M. Mazari-Hiriart. 2009. Comparative study of enteric viruses, coliphages and indicator bacteria for evaluating water quality in a tropical high altitude system. Environmental Health. 8: 49.
28. FAO. 1988. Final Report to Fao on Suitability of the Water of Lake Xochimilco-Tlahuac for Irrigation. FAO.
29. García-Olivares, M. Et Al. 1987. Contaminación de las aguas de los canales de Xochimilco. CIDEX-REPORTE DE INFORME MODULAR. UAM-X.
30. Gonzalez-Ramirez, s. Et al. 1990. Contaminación de los canales de Xochimilco. Cidex-reporte de informe modular. Uam-x.
31. González-Vargas, E. 1997. Presencia de metales pesados en *Cambarellus montezumae*, *Ambistoma mexicanum* y *Chirostoma jordani*, especies endémicas comestibles del área lacustre de Xochimilco, D.F. Informe de Serv. Social. UAM-X.

32. Lopez-Hernandez, M; Ramos-Espinoza, M.G.; Figueroa-Torres, M.G.; Flores-Macias, A.; T-Lind, O. 2010. Efecto de agua tratada sobre la biomasa del perifiton de dos sitios del area lacustre de Xochimilco utilizando un microcosmos artificial. Cidex-Archivo Vertical. UAM-X.
33. López-Vázquez, D.F. 1975. Estudio de la calidad del agua del lago Xochimilco para fines de irrigación y recreacionales. Tesis de Licenciatura. U. Veracruzana.
34. Maamir, N. 2010. Diagnóstico de calidad del agua en parte oeste de la zona lacustre de Xochimilco. Tesis de Maestría. Sin institución.
35. Manzur Jasina, K. 1991. Análisis comparativo del nivel de contaminación en tres cuerpos de agua con base en la concentración de oxígeno disuelto y materia orgánica en el sistema lacustre Xochimilco.
36. Martínez-Arroyo, A. y E. Jauregui. 2000. On the environmental role of urban lakes in Mexico City. Urban Ecosystems. 4: 145-166.
37. Mazari-Hiriart, M.; S. Ponce de León; Y. López-Vidal; P. Islas-Macías; R. Amieva-Fernández; F. Quiñones-Falconi. 2008. Microbial implications of periurban agricultural and water reuse in Mexico City. Mexico City Urban Agriculture. 3(5): 1-8.
38. Mazari-Hiriart, M.; Y. López-Vidal; G. Castillo-Rojas; S. Ponce de León; A. Cravioto. 2001. *Helicobacter pylori* and other enteric bacteria in freshwater environments in Mexico City. Medical Research. 32: 458-467.
39. Pineda-Flores, G.; T. Hernández; M. Cruz; T. Gutiérrez-Castrejón. 1999. Aplicación de dos microensayos para evaluar la contaminación presente en las cuencas Xochimilco y Lerma-Santiago. Latinoamericana de Microbiología. 41: 251-258
40. Ramos-Bello, R.; Cajuste, L.; Flores-Romin, D. y García-Calderón, N. (Sin año). Metales pesados, Sales y Sodio en Suelos de Chinampa en México.

41. Ramos-Espinoza, M.C.; Figueroa-Torres, M.G.; Lopez-Hernandez, M; Islas-Grajeda, A. sin año. Bioindicadores ecologicos como herramientas para la calidad de agua en canales de Xochimilco. CIDEX-ARCHIVO VERTICAL. UAM-X.
42. Rangel Morales, M. 1981. Determinación de algunos metales tóxicos; boro, cadmio, cobre, plomo, zinc en aguas del lago Xochimilco para uso agrícola. Tesis de licenciatura. IPN.
43. Rios-Reyes, p. 1999. Mejoramiento de la calidad del agua y reproducción del ajolote. CIDEX-ARCHIVO VERTICAL. UAM-X.
44. Robles-Mendoza, C.; C. García-Basilio; S. Cram-Heydrich; M. Hernández-Quiroz; C.Vanegas-Perez. 2009. Organophosphorus pesticides effect on early stages of the axolotl *Ambystoma mexicanum* (Amphibia: Caudata). Chemosphere. 74: 703-710.
45. Rodríguez-García, L. 1980. Estudio de la calidad sanitaria de agua de la delegación Xochimilco. tesis de licenciatura. IPN.
46. Rosas, L.; Baez, A.; Medina, A. 1975. Efectos de la contaminación del agua del lago de Xochimilco sobre la fauna bentónica. Congreso Iberoamericano del Medio Ambiente.
47. Roure Cane, M. 1969. Contribución al conocimiento de los protozoarios (Ciliata; Suctoridae) del lago de Xochimilco, D.F. Tesis de licenciatura. UNAM.
48. Solis, C.; J. Sandoval; H. Pérez-Vega; M. Mazari-Hiriart. 2006. Irrigation water quality in southern Mexico City based on bacterial and heavy metal analysis. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 5: 1-4.
49. Zambrano, L.; V. Contreras; M. Mazari-Hiriart; A. Zarco-Arista. 2009. Spatial heterogeneity of wáter quality in a highly degraded tropical freshwater ecosystem. Environmental Management. 43: 249-263.

5.4.2 Trabajos Relevantes

1. Anónimo. 1972. Algunos aspectos del deterioro del agua en los canales del lago de Xochimilco. UNAM.
2. Anónimo. 1987. Contaminación de las aguas de los canales de Xochimilco y su repercusión en la salud de la población.
3. Baez, A.; R. Belmont; O. González. 1975. Modificación de la calidad de las aguas del lago de Xochimilco por el uso de aguas negras en su recarga.
4. Balanzario Zamorate, J. (Sin año). Contaminación de los canales de Xochimilco y su repercusión en las actividades económicas. UNAM.
5. Balanzario Zamorate, J. 1976. Contaminación de las aguas en los canales de Xochimilco Tesis de licenciatura. UNAM.
6. Benitez-Toledo, A. 2000. Concentración de algunos metales pesados (Pb, Cd y Zn) en el agua y en un invertebrado acuático (Corixia sp) de interés ecotoxicológico de la zona lacustre de Xochimilco. Informe de servicio social. UAM-X
7. Bojorquez-Castro, J.L.; L. Olguín-Sanchez; I. Roldán. 1994. Calidad del agua de los canales Aragón de Xochimilco en relación con el proyecto de rescate ecológico. Informe académico. UAM-X
8. Castellanos Paez, M. 1978. Contaminación del agua en los canales de Xochimilco. Tesis de licenciatura. UAM-X.
9. Chávez León, L. 2004. Determinación de los contenidos de cadmio, zinc y plomo en agua, sedimento y peces de la zona lacustre de Xochimilco, México. Tesis de licenciatura. UAM-X
10. CONANP. 2004. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar. SMA. 13pp.

11. Escobedo Flores, M. 1987. Estudio edafológico de chinampas de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco. Tesis de licenciatura. UNAM.
12. Espinoza, A.; C. Arias; S. Sánchez-Colón; M. Mazari-Hiriart. 2009. Comparative study of enteric viruses, coliphages and indicator bacteria for evaluating water quality in a tropical high altitude system. *Environmental Health*. 8: 49.
13. González-Vargas, E. 1997. Presencia de metales pesados en *Cambarellus montezumae*, *Ambistoma mexicanum* y *Chirostoma jordani*, especies endémicas comestibles del área lacustre de Xochimilco, D.F. Informe de servicio social. UAM-X.
14. Manzur Jasina, K. 1991. Análisis comparativo del nivel de contaminación en tres cuerpos de agua con base en la concentración de oxígeno disuelto y materia orgánica en el sistema lacustre Xochimilco.
15. Martínez-Arroyo, A. y E. Jauregui. 2000. On the environmental role of urban lakes in Mexico City. *Urban Ecosystems*. 4: 145-166
16. Mazari-Hiriart, M.; S. Ponce de León; Y. López-Vidal; P. Islas-Macías; R. Amieva-
17. Fernández; F. Quiñones-Falconi. 2008. Microbial implications of periurban agricultural and water reuse in Mexico City. *Mexico City Urban Agriculture*. 3(5): 1-8.
18. Mazari-Hiriart, M.; Y. López-Vidal; G. Castillo-Rojas; S. Ponce de León; A. Cravioto. 2001. *Helicobacter pylori* and other enteric bacteria in freshwater environments in Mexico City. *Medical Research*. 32: 458-467.
19. Mazari-Hiriart, M.; Y. López-Vidal; S. Ponce de León; G. Castillo-Rojas; C. Hernández-Eugenio; F. Rojo. 2003. *Environmental Health*. 58(4): 233-237.

20. Pineda-Flores, G.; T. Hernández; M. Cruz; T. Gutiérrez-Castrejón. 1999. Aplicación de dos microensayos para evaluar la contaminación presente en las cuencas Xochimilco y Lerma-Santiago. *Latinoamericana de Microbiología*. 41: 251-258
21. Ramos-Bello, R.; Cajuste, L.; Flores-Romin, D. y García-Calderón, N. (Sin año). Metales pesados, Sales y Sodio en Suelos de Chinampa en México.
22. Rangel Morales, M. 1981. Determinación de algunos metales tóxicos; boro, cadmio, cobre, plomo, zinc en aguas del lago Xochimilco para uso agrícola. Tesis de licenciatura. IPN
23. Robles-Mendoza, C.; C. García-Basilio; S. Cram-Heydrich; M. Hernández-Quiroz; C. Vanegas-Perez. 2009. Organophosphorus pesticides effect on early stages of the axolotl *Ambystoma mexicanum* (Amphibia: Caudata). *Chemosphere*. 74: 703-710
24. Rodríguez-García, L. 1980. Estudio de la calidad sanitaria de agua de la delegación Xochimilco. tesis de licenciatura. IPN.
25. Rosas, L.; Baez, A.; Medina, A. 1975. Efectos de la contaminación del agua del lago de Xochimilco sobre la fauna bentónica. Congreso Iberoamericano del Medio Ambiente
26. Roure Cane, M. 1969. Contribución al conocimiento de los protozoarios (Ciliata; Suctoridae) del lago de Xochimilco, D.F. Tesis de licenciatura. UNAM.
27. Solis, C.; J. Sandoval; H. Pérez-Vega; M. Mazari-Hiriart. 2006. Irrigation water quality in southern Mexico City based on bacterial and heavy metal analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 5: 1-4.
28. Zambrano, L.; V. Contreras; M. Mazari-Hiriart; A. Zarco-Arista. 2009. Spatial heterogeneity of water quality in a highly degraded tropical freshwater ecosystem. *Environmental Management*. 43: 249-263

5.4.3 Localización Espacial de los Trabajos Críticos

Para este análisis fueron considerados como trabajos críticos los siguientes cuatro:

Martínez-Arroyo, A. y E. Jauregui. 2000. On the environmental role of urban lakes in Mexico City. *Urban Ecosystems*. 4: 145-166.

Solis, C.; J. Sandoval; H. Pérez-Vega; M. Mazari-Hiriart. 2006. Irrigation water quality in southern Mexico City based on bacterial and heavy metal analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 5: 1-4.

Mazari-Hiriart, M.; S. Ponce de León; Y. López-Vidal; P. Islas-Macías; R. Amieva-Fernández; F. Quiñones-Falconi. 2008. Microbial implications of periurban agricultural and water reuse in Mexico City. *Mexico City Urban Agriculture*. 3(5): 1-8.

Zambrano, L.; V. Contreras; M. Mazari-Hiriart; A. Zarco-Arista. 2009. Spatial heterogeneity of water quality in a highly degraded tropical freshwater ecosystem. *Environmental Management*. 43: 249-263

En la Figura 22 se muestra el mapa de la región lacustre de Xochimilco incluyendo los sitios de muestreo de cada una de cuatro trabajos relevantes seleccionados diferenciados por colores de la siguiente manera:

- Sitios color amarillo: Martínez-Arroyo y Jauregui en el 2000.
- Sitios color azul: Solís *et.al.* (2006) (Anexo 3).
- Sitios color rojo: Mazari-Hiriart *et.al.* (2008)
- Sitios color verde: Zambrano *et.al.* (2009).

Como parte integral de este análisis, en las Figuras 23 y 24 se muestran las fichas técnicas correspondientes a estos cuatro trabajos.



Figura 22. Mapa satelital de la región lacustre de Xochimilco con los sitios de muestreo de los cuatro trabajos relevantes seleccionados para este estudio.

5.4.3 Fichas Técnicas

SITIOS COLOR AMARILLO		SITIOS COLOR AZUL	
TÍTULO	ON THE ENVIRONMENTAL ROLE OF URBAN LAKES IN MEXICO CITY	TÍTULO	IRRIGATION WATER QUALITY IN SOUTHERN MEXICO CITY BASED ON BACTERIAL AND HEAVY METAL ANALYSES.
TIPO DE PUBLICACIÓN	REVISTA CIENTIFICA INTERNACIONAL ARBITRADA	TIPO DE PUBLICACIÓN	REVISTA CIENTIFICA INTERNACIONAL ARBITRADA
AÑOS	2000	AÑOS	2006 (2003-2004)
AUTORES	MARTINEZ-ARROYO, A. y JAUREGUI E.	AUTORES	SOLÍS, C.; SANDOVAL, J.; PÉREZ-VEGA, H.; MAZARI-HIRIART, M.
METODOLOGÍA BÁSICA	CUATRO CAMPAÑAS DE CINCO DÍAS CONSECUTIVOS EN LOS QUE SE MIDIERON VELOCIDAD DEL VIENTO, TEMPERATURA DEL AIRE Y HUMEDAD, TEMPERATURA DEL AGUA, OXÍGENO DISUELTO, PH, RADIACIÓN FOTOSINTÉTICA ACTIVA. LAS MUESTRAS DE AGUA SE LLEVARON AL LABORATORIO PARA EL ANÁLISIS DE CLOROFILAS, NUTRIENTES Y FOTOSÍNTESIS-IRRADIANZA.	METODOLOGÍA BÁSICA	APHA, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION. 1998. STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTE WATER. TECNICA DE PRECONCENTRACIÓN BASADA EN EL USO DE COMPLEJOS CARBONATADOS
RESULTADOS CRÍTICOS	BAJA DIVERSIDAD DE ALGAS, ALTAS CONCENTRACIONES DE CLOROFILAS Y NIVELES BAJO DE OXÍGENO ENCONTRADOS EN EL FONDO DEL LAGO SUGIEREN UN ALTO CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA Y BAJA EFICIENCIA DE DEGRADACIÓN.	RESULTADOS CRÍTICOS	LOS NIVELES DE COLIFORMES FECALIS MEDIDOS EN SECAS Y LLUVIAS EXCEDEN LOS 1000CFU/100ML RECOMENDADOS POR LA NOM; EN TODOS LOS SITIOS DE MUESTREO EL Fe, Cu, Zn y Pb NO REBASARON LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMITIBLES DE LA NOM
PARÁMETROS MEDIDOS	VELOCIDAD DEL VIENTO, TEMPERATURA DEL AIRE Y HUMEDAD, TEMPERATURA DEL AGUA, OXÍGENO DISUELTO, PH, RADIACIÓN FOTOSINTÉTICA ACTIVA.	PARÁMETROS MEDIDOS	ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO, ANÁLISIS DE METALES PESADOS
SITIOS DE MUESTREO	CANALES DE XOCHIMILCO	SITIOS DE MUESTREO	URRUTIA (A), URRUTIA (B), BORDO, PASO DEL ÁGUILA, TEZHUILLO, COTETEXPAN, TORO, HUETZALI, JAPÓN APATLACO, SEMINARIO, CUEMANCO, ZACAPA, PIZOCOPXA, DRAGA, TRANCATITLA, SANTÍSIMA, XALTOCAN, FERNANDO CELADA, SAN DIEGO

Figura 23. Fichas técnicas propuestas para los metadatos de los sitios señalados en la figura 22 con los colores amarillo y azul, correspondientes a dos de los cuatro trabajos críticos seleccionados para este ejercicio.

SITIOS COLOR ROJO		SITIOS COLOR VERDE	
TÍTULO	MICROBIOLOGICAL IMPLICATIONS OF PERIURBAN AGRICULTURE AND WATER REUSE IN MEXICO CITY	TÍTULO	SPATIAL HETEROGENEITY OF WATER QUALITY IN A HIGHLY DEGRADED TROPICAL FRESHWATER ECOSYSTEM
TIPO DE PUBLICACIÓN	REVISTA CIENTIFICA INTERNACIONAL ARBITRADA	TIPO DE PUBLICACIÓN	REVISTA CIENTIFICA INTERNACIONAL ARBITRADA
AÑOS	2008 (2000-2001)	AÑOS	2009 (2000-2001 y 2004)
AUTORES	MAZARI-HIRIART, M.; PONCE DE LEON, S.; LOPEZ-VIDAL, Y.; ISLAS-MACÍAS, P.; AMIEVA-FERNÁNDEZ, R.; QUIÑONES-FALCÓN, F.	AUTORES	ZAMBRANO L.; CONTRERAS, V.; MAZARI-HIRIART, M.; ZARCO-ARISTA, A.
METODOLOGÍA BÁSICA	NOM-003-ECOL-1997; RECOMENDACIONES DE LA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS), AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION.	METODOLOGÍA BÁSICA	APHA, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION. 1998. STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTE WATER.
RESULTADOS CRÍTICOS	ALTA PRESENCIA DE COLIFORMES FECALIS, STREPTOCOCCI FECAL Y ENTEROCOCCI QUE SON CONSIDERADOS INDICADORES DE CONTAMINACIÓN HUMANA Y ANIMAL. ESTO ES DEBIDO A LAS AGUAS TRATADAS QUE SE VIERTEN A LOS CANALES Y LAS DESCARGAS DE DRENAJE DE ASENTAMIENTOS IRREGULARES DE HUMANOS Y GANADERÍAS	RESULTADOS CRÍTICOS	LOS ESTUDIOS BACTERIOLÓGICOS REVELARON CONTAMINACIÓN EN EL 90% DE LAS MUESTRAS ALTOS CONTEOS BACTERIOLÓGICOS ATRIBUIBLES A DESCARGAS HUMANAS Y GANADERAS
PARÁMETROS MEDIDOS	PARÁMETROS AMBIENTALES, ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS, NUTRIENTES Y CARBONO TOTAL	PARÁMETROS MEDIDOS	CONDUCTIVIDAD, PH, TEMPERATURA, PROFUNDIDAD, OXÍGENO DISUELTO, TURBIDEZ, CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES, ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO.
SITIOS DE MUESTREO	CANALES DE XOCHIMILCO	SITIOS DE MUESTREO	ALMOLOYA, APATLACO, ATIZABA, CERCA DRAGA, COMPUERTA, COMUNIDAD, COSTETEXPA, CUEMANCO, EL BORDO, JAPÓN, NATIVITAS, PASO DEL ÁGUILA, PIZOCOPXA, SAN DIEGO, SEMINARIO, TEZHUILLO, TULAC, URRUTIA, XALTOCAN

Figura 24. Fichas técnicas propuestas para los metadatos de los sitios señalados en la figura 22 con los colores rojo y verde, correspondientes a dos de los cuatro trabajos relevantes seleccionados para este ejercicio.

5.5. Conclusiones

La región lacustre de Xochimilco ha sido objeto de numerosos estudios por parte de instituciones gubernamentales y académicas. Sin embargo, a la fecha la información que se ha generado por más de dos décadas se encuentra dispersa, ninguno de los trabajos se realizó en series largas de tiempo, sus metodologías no son estandarizadas, en muchos casos resultan no confiables y los resultados muy pocas veces son publicados, generando una gran cantidad de “información gris” de la cual no se pueden hacer aseveraciones confiables.

Hasta este informe los trabajos relevantes identificados se concentran en la zona de los canales de Xochimilco, lo que imposibilita conocer el estado y la evolución de la calidad del agua y/o de su contaminación en el lago y/o los canales en la zona del hundimiento de San Gregorio Atlapulco; así como precisar qué tipo de estudio o temática falta por explorar, como una contribución efectiva y eficiente ante el riesgo potencial de contaminación del acuífero regional. También los avances alcanzados reflejan la inexistencia de una entidad gubernamental o académica responsable de un monitoreo continuo y sistemático de la calidad del agua y la contaminación en los cuerpos de agua localizados dentro del ANP-EXSGA.

Para hacer una valoración con cierto grado de confiabilidad, se hace necesario plantear establecer una Estrategia Ambiental Integral (EAI) mediante la cual se implementen las siguientes recomendaciones que resultan del análisis y valoración de los documentos consultados:

1. Realizar muestreos integrales en la cuenca del lago y los canales de San Gregorio Atlapulco sobre calidad de agua y que estén apegados a la normatividad nacional vigente. Estos muestreos deberán de considerar al menos una periodicidad cuatrimestral y tomar en cuenta los parámetros indicados en Documentos Internacionales (UNESCO, EPA) para valoración de calidad del agua en sitios impactados por la actividad humana.

2. Implementar estudios continuos para determinar la presencia de bacterias entéricas, virus y parásitos que afecten la salud humana de los habitantes de la región del Lago de Xochimilco y áreas adyacentes.
3. Efectuar análisis trimestrales de metales, plaguicidas, aceites y grasas y sustancias activas al azul de metileno (detergentes) en agua, sedimentos y organismos, que puedan incidir en la calidad del agua y que representen un factor de riesgo a la población humana.
4. Realizar toma de núcleos sedimentarios en los sitios más contaminados y datarlos para obtener información histórica sobre los procesos de contaminación del lago y canales adyacentes.
5. Considerar que esta estrategia ambiental integral funcionará siempre y cuando su ejecución sea a mediano y largo plazo (5 y 10 años), con la finalidad de observar la tendencia en tiempo del comportamiento de la contaminación.

6. REPORTE DEL GRUPO TEMATICO: INFORMATICA Y SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA

6.1 EQUIPO DE TRABAJO

El Biólogo Armando Peralta Higuera coordinó el equipo de trabajo integrado por los siguientes especialistas: a) Maestro en Sistemas de Información Geográfica José Antonio Quintero Pérez; b) Geógrafo Miguel Ángel Ramírez Beltrán y el Ing. Alberto Ríos Rico. Su experiencia en implementación de sistemas de información geográfica y en cursos de capacitación en ese campo, como se puede apreciar en el análisis de los Currícula Vitae correspondientes, que se incluyen en el Anexo 1 de este Informe.

6.2 OBJETIVOS DEL EQUIPO DE TRABAJO

1. Desarrollar una herramienta informática que permita publicar y descargar información de la zona chinampera de Xochimilco, adecuado a la infraestructura y plataforma sistemática interna de la PAOT, donde se incorpore la información con la que se cuenta y la que se genere posteriormente; como un medio para apoyar una mejor planificación, gestión y manejo de la zona, así como para sensibilizar a las autoridades y a la sociedad de lo que sucede en el sitio con un lenguaje visual.
2. Elaborar con técnicas de percepción remota, a partir del archivo tipo shape de canales de la zona chinampera con que cuenta la PAOT, un mapa actualizado de los canales existentes que represente las condiciones del sitio y permita dar una visión de los cambios acontecidos en los usos de suelo.
3. Identificar y compilar información espacial digital disponible: levantamiento LIDAR (Light Detection and Ranging) y fotografía aérea anterior a 1998 a escalas de vuelo 1:20,000 o mayor (1:10,000, 1:5000); de la región de la planicie lacustre Xochimilco y Tláhuac aplicable al caso, para tener una referencia de las condiciones que presenta y presentaba el sitio; la cual esté en posibilidad de solicitarse o adquirirse para los fines de este estudio, en instancias gubernamentales, académicas o privadas.

4. Analizar la información de tecnología LIDAR de la PAOT, a fin de evaluar sus características en la zona de estudio e identificar si es una alternativa para monitorear el proceso de hundimiento o en su caso, determinar sus alcances.
5. Identificar los cambios drásticos de usos de suelo y la tendencia de la desaparición de los canales y apantles a partir de imágenes aéreas históricas de la zona de interés y el mapa actualizado de canales que se genere de este Estudio

6.3 METODOLOGIA POR OBJETIVOS ESPECIFICOS

6.3.1 Herramienta informática (Memoria Técnica)

El diseño e implementación de la herramienta informática compatible con la plataforma de la PAOT se basó en la disponibilidad del acervo disponible y equipo y software necesarios para la manipulación y procesamiento de cartografía digital, fotografías aéreas y datos LIDAR, lo que permitió cumplir con los productos especificados en la licitación de este estudio, para ello el Grupo de Informática y Sistemas de Información Geográfica desarrollo las siguientes actividades técnicas:

- a. Utilizando la metodología WBS (Work Breakdown Structure) y mediante la elaboración de diagramas de Gantt, se analizaron todas las actividades necesarias para desarrollar el proyecto y en coordinación con personal del área de la PAOT responsable de la gestión del SIG institucional y del manejo de los datos geoespaciales se estableció el plan de trabajo y el cronograma correspondiente.
- b. Se revisó la información disponible en la PAOT sobre la zona de estudio, y se consultó sobre la disponibilidad de información a otras dependencias locales y federales relacionadas con la gestión ambiental y territorial del área de estudio. Asimismo se realizó una búsqueda de fotografías aéreas históricas en los acervos del INEGI y de empresas dedicadas a la aerofotografía.

- c. Se desarrolló una aplicación para la consulta Web tomando en cuenta el análisis de factibilidad realizado por la PAOT y ajustado a sus estándares técnicos para hacerla compatible con su plataforma de informática. El sistema permite la visualización de la información que se generó en este estudio, así como consultas técnicas básicas y datos tabulares relativos a las capas que integran la leyenda. Asimismo, el sistema permite el trabajo colaborativo y participativo entre investigadores y funcionarios, a través del análisis de líneas, polígonos, puntos, imágenes y datos tabulares. La información puede ser visualizada por dichos usuarios y por el público general, con base en privilegios de acceso. La información incorporada fue validada y su formato y estructura se ajustaron a los establecidos por el área responsable de la gestión de sistemas de información geográfica de la PAOT. Finalmente, de acuerdo con lo establecido en la licitación, se llevaron a cabo reuniones técnicas con el personal de la PAOT para definir las fuentes de información que se incorporaron al SIG, los mecanismos de registro de usuarios y estadísticas de consulta, la plataforma de publicación digital y los alcances en cuanto a la elaboración automatizada de mapas.
- d. Utilizando la banda del infrarrojo cercano, tanto en imágenes satelitales como en fotografías aéreas que contenían dicha banda espectral, se obtuvo una primera delimitación de los cuerpos de agua, incluyendo la red de canales actual de la zona chinampera del ANP-EXSGA. Para identificar los canales con presencia de agua oculta bajo vegetación flotante o de ribera, que no resultaron evidentes en la banda infrarroja, se realizaron visitas de campo. Se cruzaron los archivos vectoriales obtenidos mediante los procesos anteriores, con el archivo SHP de los canales proporcionado por la PAOT, para detectar diferencias en la extensión espacial y en las condiciones de funcionalidad de los canales. A partir de esta comparación, se realizó la interpretación de los cambios, en conjunto con el personal técnico de la PAOT se elaboró la leyenda adecuada y se produjo el mapa del estado actual en formato electrónico en formato SHP.

- e. Se interpretaron las fotografías aéreas más recientes y se compararon con fotografías históricas, con los mapas disponibles y con el mapa de canales obtenido como parte de este estudio, para identificar los cambios más relevantes en el uso del suelo. Se definió la leyenda correspondiente con base en los tipos de cambio y en las condiciones de funcionalidad de los canales y las chinampas, y con base en ello se produjo la cobertura cartográfica en formato SHP.
- f. Se procesaron los datos LIDAR disponibles, en particular los proporcionados por el INEGI y se determinó para cuáles temas esta información es suficiente y para cuáles se requiere de una mayor densidad de puntos. Para dicha evaluación, se realizaron las siguientes actividades:
- f.1) Se obtuvo el valor promedio de la densidad de puntos sobre el terreno, y una estimación del porcentaje de puntos incidentes en la vegetación y en el suelo.
 - f.2) Se verificó la calidad de los datos a partir de un conjunto de mediciones con GPS diferencial, para determinar la exactitud del levantamiento, midiendo la desviación en la ubicación XYZ de los puntos respecto de su posición real.
 - f.3) Se obtuvieron modelos de elevación del terreno a partir de los datos LIDAR y se evaluó si eran suficientes para detectar diferencias de elevación y rasgos relevantes para caracterizar la hidrología de la zona.
 - f.4) Se evaluó la utilidad de los datos LIDAR para la detección de vegetación, el conteo de árboles y la medición de la altura de la vegetación. Se analizó de elevación de la vegetación, determinándose que los datos no permiten obtener un modelo de alturas de la vegetación sobre el terreno.
 - f.5) Se definieron recomendaciones sobre el uso adecuado de estos datos y la pertinencia de contar con levantamientos de mayor densidad.

6.3.2 Capacitación

Para el uso de la herramienta informática especificada en la licitación de este estudio, se impartió la capacitación a los usuarios iniciales que fueron seleccionados por la PAOT para ello, el Grupo de Informática y Sistemas de Información Geográfica se basó en la premisa: *para lograr los objetivos esperados, la capacitación debe desarrollarse en tres ejes principales, dos de ellos dirigidos a los administradores del sistema y otro a los usuarios finales*; para lo cual desarrolló las siguientes actividades específicas:

- El primer eje fue dirigido al personal especializado que dentro de la PAOT tendrá a su cargo la administración y actualización del sistema desarrollado. Los especialistas con que cuenta la institución demostraron un nivel de conocimientos importante sobre el manejo de datos de percepción remota, sistemas de información geográfica y administración de servicios web, por ello, como primer paso fue necesario ajustar el nivel del temario a sus necesidades específicas.
- El segundo eje fue orientado al procesamiento de los datos geográficos que se recopilaron e incorporaron en el sistema ya que por la diversidad y el grado de especialización que requiere su manejo, se consideró necesario incluir en los temarios la georreferencia y ortocorrección de imágenes, así como el manejo de datos LIDAR y sus productos, sobre los cuales aún hay poca experiencia en México y buena parte de la cual se encuentra en manos de los especialistas del Grupo de Informática y Sistemas de Información Geográfica que desarrollaron este estudio .
- Debido a la ventana de tiempo dentro de la cual se desarrolló el presente estudio, de común acuerdo el alcance de la capacitación se limitó al grupo principal de funcionarios técnicos de la PAOT responsables del sistema (cuya lista se presenta en el Anexo 2).

Para el mejor desarrollo de la capacitación y a fin de fortalecer la capacidad de análisis de la PAOT se le entregó, en donación, un programa y un equipo de cómputo así como un set de fotografías aéreas, con características a establecidas de común acuerdo.

6.4 RESULTADOS

Biól. Armando Peralta Higuera (Coordinador); M en SIG José A. Quintero Pérez;
Geóg. Miguel Ángel Ramírez Beltrán e Ing. Alberto Ríos Rico.

6.4.1 Análisis, estandarización y procesamiento de información espacial y de fotografías aéreas; y generación de cartografía de cambio de uso de suelo

Para los fines del “*Estudio elaboración de un SIG participativo de la zona chinampera para identificar los riesgos relacionados con la afectación de la calidad del agua y los hundimientos en Xochimilco*”, se procesaron, analizaron y estandarizaron las siguientes capas de información georreferenciada:

- Imágenes satelitales: Landsat de 1970, 1980, 1990 y 2010, GeoEye de marzo de 2012, SPOT de 2006 y 2012, varias más.
- Mosaicos a partir de ortofotos producidas por el INEGI en 2007 y en color de 2010, E14A39F1, E14A39F2, E14A39F3, E14A39F4, E14A49C1 y E14A49C2.
- Aerofotografías ortocorregidas proporcionadas por la PAOT producidas por empresas aerofotográficas de 2008 y 2012, por el Instituto de Geografía UNAM de 2001 y 2010 y por el Instituto Federal Electoral de 2000, y fotografías históricas de 1974.
- Fotografías oblicuas obtenidas mediante sobrevuelos del ANP-EXSGA proporcionadas por la PAOT, no georreferenciadas, pero útiles para incrementar el nivel de referencia durante la interpretación de fotos verticales.
- Mapa de puntos de descarga de aguas tratadas proporcionado por la Dirección de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) del DF, principalmente provenientes de la planta Cerro de la Estrella.
- Cartografía INEGI 1:50,000 y 1:250,000 en temas de manzanas urbanas, topografía, uso del suelo y vegetación, climas, geología y otras.

- Mapas preliminares proporcionados por los especialistas y expertos participantes en el presente estudio, sobre cambios en la configuración de los cuerpos de agua, hundimientos, distribución de puntos de muestreo de calidad del agua y otras referencias espacializadas sobre la problemática de la zona.
- Información del Censo de Población y Vivienda 2010 a nivel de AGEB y solicitud de información a nivel de manzanas.
- Modelo digital de elevación con celdas de 31 metros producido durante las misiones SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de la NASA y disponibles públicamente como servicios WMS. En general equivalente a las curvas con separación vertical de 20 metros del INEGI.
- Recorte para el área de interés de la rejilla (grid) de elevaciones producido por el INEGI para el Distrito Federal a partir de datos lidar, con tamaño de celda de 5 metros.
- Modelo digital del terreno detallado producido por GPPA para el presente estudio a partir de las nubes de puntos lidar proporcionadas por el INEGI, generando una rejilla con celdas de 1.075 x 0.0.784 y resolución vertical igual o mejor que 20cm.
- Mapa de canales producido por GPPA a partir del archivo vectorial (shapefile, *.SHP) proporcionado por la PAOT y del análisis de una imagen satelital GeoEye de marzo de 2012, en particular la banda del infrarrojo cercano.
- Polígono del Área Natural Protegida bajo la categoría de Zona Sujeta a Conservación Ecológica “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio. Atlapulco”, (ANP-EXSGA) según decreto del 11 de enero de 2006.
- Polígono del Área de “Patrimonio Natural y Cultural de Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta” inscrito en el Catálogo del Patrimonio de la Humanidad, por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) en 1987.

- Polígonos de las unidades de usos del suelo identificadas en el estudio: *Programa rector de restauración ecológica del Área Natural Protegida Zona de Conservación Ecológica “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”. Informe Final*. Instituto de Ecología A. C. 568 p. elaborado en el año 2002
- Polígonos de uso del suelo y unidades ambientales dentro del ANP producidas en 2012 a través del “*Taller Seminario Temas Ambientales: Tendencias y propuestas sobre el hundimiento de la zona del ANP “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”*”.
- Polígonos de uso del suelo y vegetación producidos en 2008 y proporcionados por la PAOT.
- Polígonos del suelo de conservación del Distrito Federal.
- Polígonos de invasiones al Suelo de Conservación por vivienda hasta 2012 proporcionados por PAOT y producidos por el Instituto de Geografía UNAM.
- Información del Censo de Población y Vivienda 2010 a nivel de AGEB. Se ha solicitado a nivel de manzanas.

Independientemente de haberse cumplido el procesamiento, análisis y estandarización del material enlistado antes, es preciso considerar que la incorporación de otras aerofotografías, imágenes satelitales o bases de datos, será un proceso abierto durante este estudio, porque no siempre existe información que permita determinar su existencia o ubicación, o cuya adquisición o entrega es compleja incluso para las propias autoridades.

6.4.2 Revisión y análisis de la información LIDAR generada por el INEGI y proporcionada por la PAOT, para identificar sus alcances y aportaciones potenciales para este estudio.

La información LIDAR (Ligth Detection and Ranging) producida por el INEGI, y entregada a GPPA por la PAOT, fue adquirida por medio de sus equipos propios del Instituto y mediante los servicios de empresas especializadas contratadas, que cumplieron con las especificaciones establecidas por dicha institución. Los datos originales fueron obtenidos en diciembre de 2007 y los productos derivados se generaron en 2010. Conforme el análisis del levantamiento de datos, la información proporcionada por el INEGI comprende:

- El modelo de superficie (incluyendo vegetación y edificios) en forma de rejillas (grids) de elevación con celdas de 5 metros, para toda la superficie del Distrito Federal. Divididos en cuadrantes, según la nomenclatura de la cartografía de la zona.
- Los puntos XYZ para la primera superficie, que es la representada por el grid mencionado en el punto anterior. Organizados en cuadrantes denominados según las cartas de la zona.
- Los puntos XYZ correspondientes al suelo desnudo, obtenidos tras la clasificación de los puntos mediante programas especializados y edición manual. Organizados en cuadrantes.
- Las nubes de puntos lidar originales, organizadas según los barridos aéreos realizados durante su adquisición. Los puntos tienen información de intensidad del retorno, pero no de número de retorno ni clasificación en terreno, vegetación, edificios, etc.

Este material fue motivo de diversos procesos de análisis especializado para, por una parte, proporcionar elementos de juicio sobre su pertinencia a la PAOT y por otra, contar con información más detallada sobre la topografía de la zona disponible a la fecha.

6.4.2.1 Características de la nube de puntos originales y de los archivos XYZ

Las nubes de puntos fueron proporcionadas en dos formatos, con distintos niveles de procesamiento y que para los fines de este proyecto son complementarios. Uno es el formato *.LAS, que contiene los puntos obtenidos directamente del levantamiento, con la corrección de la posición XYZ ajustada mediante la corrección diferencial de los datos del GPS portado en la aeronave, junto al LIDAR. Se determinó que estos datos aún no representan alturas ortométricas, sino geodésicas, por lo que para su uso es necesario tomar en cuenta esta corrección.

Estos archivos contienen también información sobre la intensidad de los retornos, es decir, de la intensidad con la que los distintos materiales presentes en el terreno reflejan o absorben la radiación infrarroja.

Esta información es relevante para identificar cuerpos de agua y visualizar rasgos que no pueden ser apreciados a partir de la información de elevación, como pueden ser los señalamientos pintados sobre el pavimento, las variaciones en tipos de vegetación o en la humedad de suelos, entre otros.

Asimismo los archivos LAS incluyen los puntos ordenados secuencialmente según el momento de su adquisición. Esto significa que no están organizados como una rejilla regular, sino que corresponden al punto donde cada pulso láser hizo contacto con el terreno u otros objetos. Si bien el barrido se realiza de forma regular, tanto transversalmente como a lo largo de la línea de vuelo, no es posible prever la ubicación que tendrá cada punto y en ello el azar juega un papel importante.

El conjunto de puntos, describe la zona de barrido cubierta durante el vuelo y refleja el desplazamiento de la aeronave, y no se agrupa en cuadrantes definidos. Los archivos LAS contienen los puntos ordenados secuencialmente según el momento de su adquisición.

Esto significa que no están organizados como una rejilla regular, sino que corresponden al punto donde cada pulso láser hizo contacto con el terreno u otros objetos.

Si bien el barrido se realiza de forma regular, tanto transversalmente como a lo largo de la línea de vuelo, no es posible prever la ubicación que tendrá cada punto y en ello el azar juega un papel importante. El conjunto de puntos, describe la zona de barrido cubierta durante el vuelo y refleja el desplazamiento de la aeronave, y no se agrupa en cuadrantes definidos. Cabe mencionar que se entregó a GPPA la nube de puntos original, sobre la cual aún no se había realizado una clasificación en terreno, vegetación, edificios y otras clases.

Hacer esta clasificación escapa a los objetivos del presente proyecto y se requiere software especializado y muy costoso con el que generalmente sólo cuentan las empresas que realizan levantamientos. Esto hace imposible determinar qué porcentaje de puntos corresponden al suelo desnudo y cuál al resto de los objetos presentes, pero considerando que la zona no está cubierta por vegetación abundante, es posible suponer que la mayor parte de los puntos corresponden al terreno y a construcciones.

En la literatura científica y técnica especializada, se considera que, en presencia de vegetación sólo llegan al suelo entre un 10 y un 30% de los pulsos láser. Dada la densidad relativamente baja de puntos de estos levantamientos, se encontró que es mejor utilizar tanto los puntos, como los modelos derivados de ellos, correspondientes a la superficie total, es decir, sin excluir vegetación y otros objetos.

Ello se debe a que, al eliminar los puntos de vegetación, quedan muy pocos puntos del terreno, que por la ausencia de datos pueden confundirse con cuerpos de agua o producir errores de interpretación. Si se contara con una densidad mayor, sería posible obtener modelos detallados del suelo y la vegetación.

Para la obtención de productos, el INEGI sí reporta haber realizado la clasificación, que es un proceso muy laborioso que requiere de mucha intervención manual.

Como resultado de ello, produjo conjuntos separados de archivos, unos para los puntos XYZ correspondientes al suelo desnudo y otros para la primera superficie, es decir, aquellos que describen la superficie envolvente total del terreno y los objetos que se encuentran sobre él.

Este es el segundo formato de puntos proporcionado por el INEGI, en archivos ASCII con extensión *.XYZ, que contienen una serie de puntos caracterizados por pares de coordenadas y elevación. Sin embargo, estos puntos no corresponden a los retornos originales del láser, sino a nodos de una rejilla regular interpolada a partir de éstos.

Como consecuencia de este tratamiento, los puntos han perdido el atributo de intensidad del retorno láser, ya que este valor sólo es válido para la ubicación original del punto en el archivo LAS. Este formato de archivo sí está organizado en cuadrantes cuya nomenclatura coincide con las rejillas de elevación producidas por el INEGI, referidas a la de la cartografía 1:50,000. En virtud de su espaciamiento regular, los archivos XYZ facilitan la creación de rejillas de elevación y su cruce con otras capas de información.

Sin embargo, tienen menos utilidad que los archivos LAS para algunos análisis, ya que no contienen información sobre los retornos intermedios que definen la estructura de la vegetación y permiten visualizar la relación espacial entre elementos que se encuentran unos sobre otros, como es el caso de árboles cuyo follaje se encuentra sobre los canales.

La densidad promedio de puntos estimada por el INEGI para estos levantamientos es de 0.433 puntos/m², con una separación a lo ancho del barrido de 2.90 metros y de 3.10 a lo largo, es decir, entre líneas sucesivas de barrido.

Según nuestras estimaciones, la densidad de puntos para el área de interés es de 0.402 puntos/m², valor que coincide cercanamente con estimado por el INEGI. El amarre a la red geodésica nacional fue realizado por el INEGI a través de las estaciones base instaladas durante los levantamientos, lo que garantiza la exactitud posicional en X, Y y Z del levantamiento, por lo que no es necesario realizar comprobaciones adicionales.

Sin embargo se corrobora actualmente el ajuste del levantamiento por medio de una serie de puntos obtenidos mediante GPS estático diferencial.

Dado el carácter masivo de los datos LIDAR, que es de millones de puntos en cada archivo, fue necesario separar sólo los datos correspondientes a la zona, para facilitar su organización, visualización y análisis. Se crearon índices de las líneas de barrido correspondientes a los archivos LAS, y también de los cuadrantes de los archivos XYZ y de rejillas de elevación.

En diversas ocasiones se ha planteado la necesidad de realizar levantamientos LIDAR más detallados de esta zona, que permitan caracterizar mejor los rasgos del relieve plano, y caracterizar otros elementos como vegetación y construcciones.

Para aportar elementos de juicio a la PAOT, se realizó una comparación de los datos de la misma campaña del INEGI con los de un levantamiento de alta densidad (40 puntos/m²). Esta comparación se realizó en un sitio fuera del área de estudio y se ubica en la Ciudad Universitaria de la UNAM.

De esta comparación se desprende que, si bien los datos del INEGI permiten evaluar los hundimientos generales en la zona y son un aporte invaluable, carecen de la resolución necesaria para caracterizar la vegetación, identificar rasgos finos como bordos, canales y otra infraestructura, así como para modelar la inundación producida por el hundimiento al nivel de chinampas individuales.

En las Figuras 25, 26, 27, 28, 29 y 30 que se muestran a continuación, se ejemplifica de manera secuencial los diversos tratamientos realizados al banco de datos original y sus transformaciones para los fines de visualización en un Sistema de Información Geográfica.

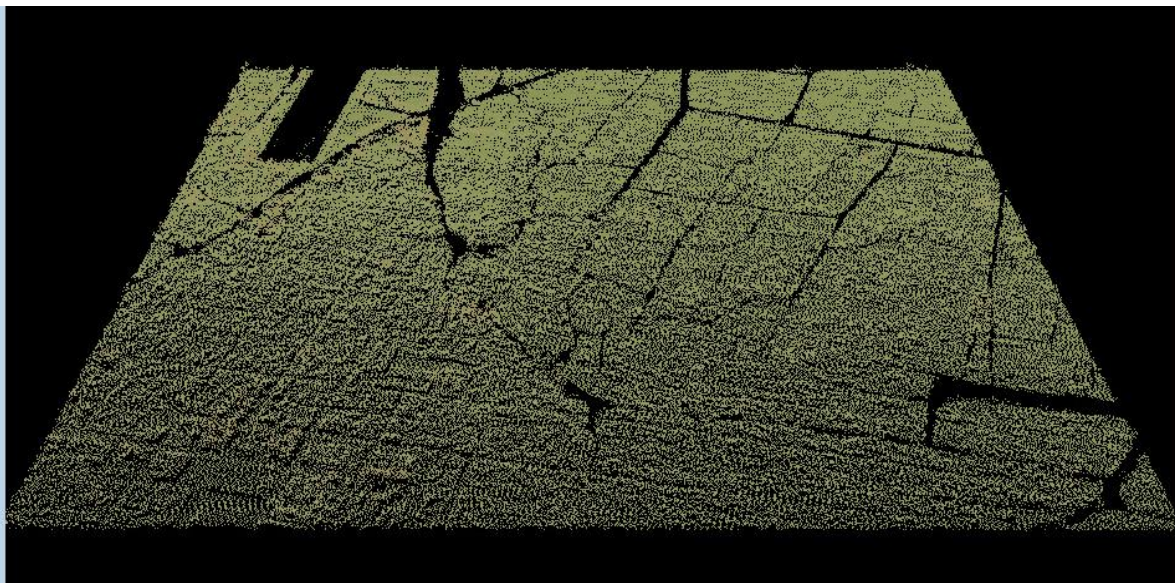
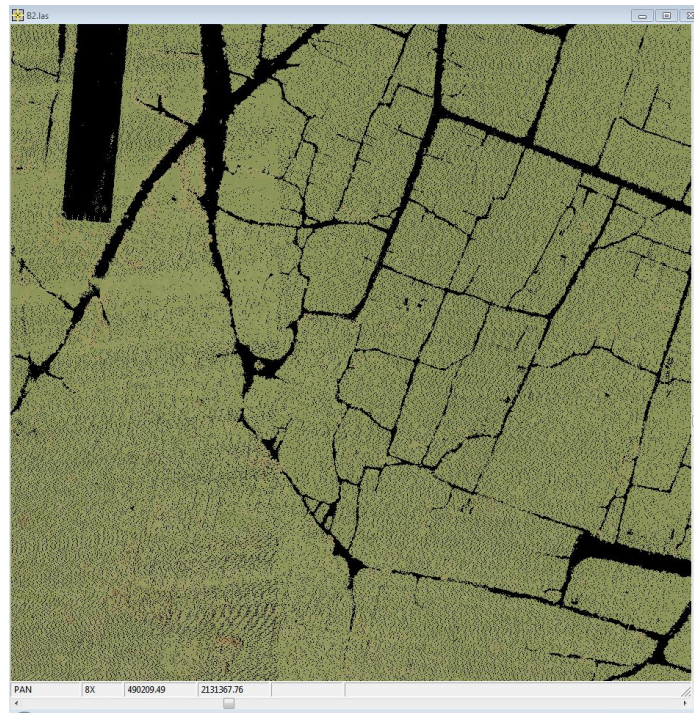


Figura 25. Nube original de puntos LIDAR, que contienen información de la primera superficie y del suelo, pero también de los retornos intermedios que pueden mostrar la forma y elevación de la vegetación. El láser infrarrojo utilizado para levantamientos lidar aéreos es absorbido por el agua, por lo que en los canales y cuerpos de agua no existe información, es esta la razón por la cual aparecen como zonas oscuras.

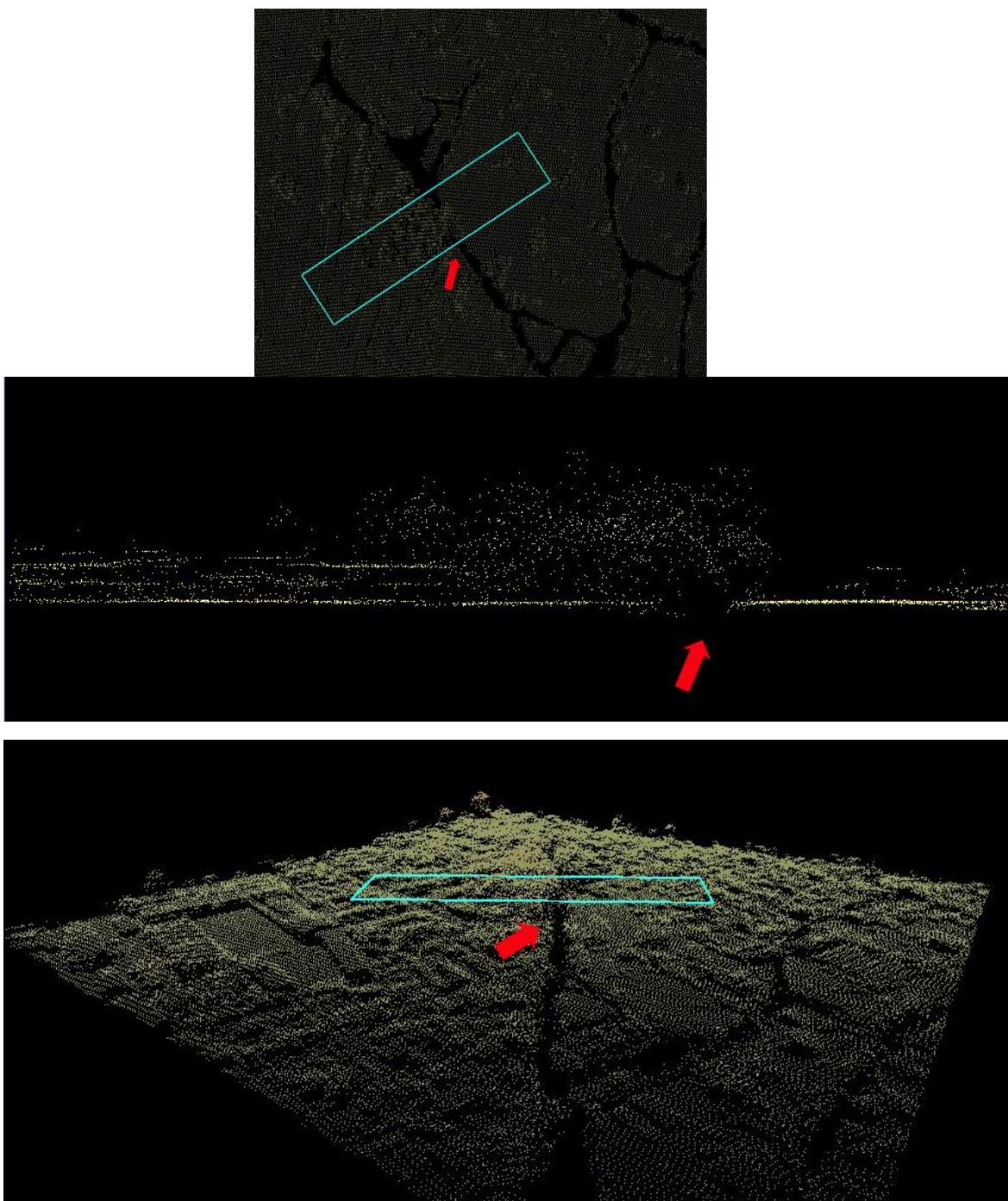
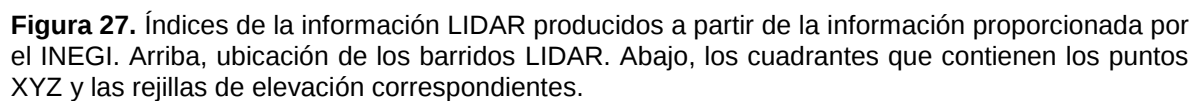


Figura 26. A partir de la nube LIDAR original, es posible interpretar la relación espacial tridimensional entre objetos y obtener perfiles de la nube. En este caso puede apreciarse un canal, aún por debajo del follaje de un árbol.



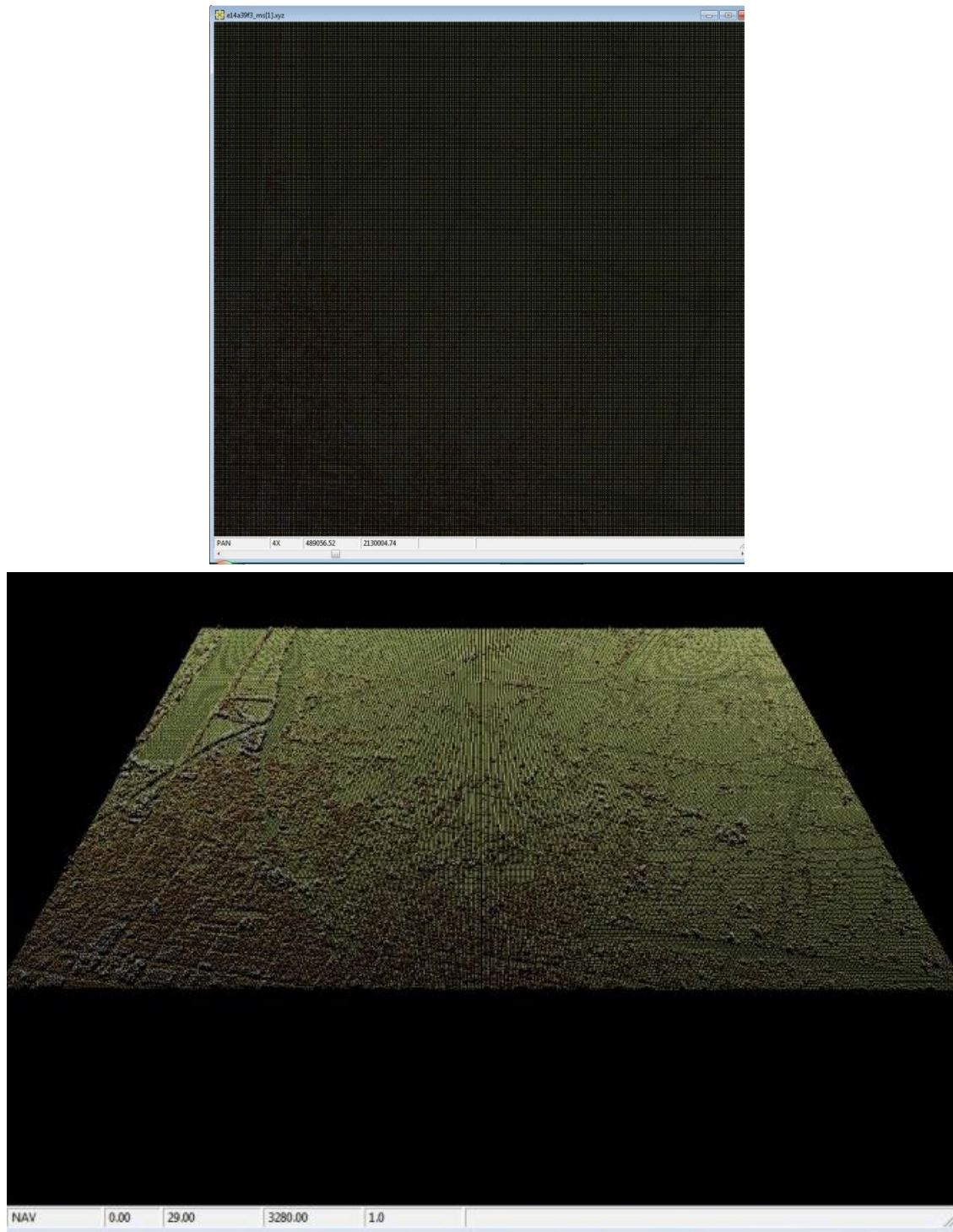


Figura 28. Archivo de puntos XYZ correspondientes a la primera superficie, espaciados regularmente. Se aprecian los objetos sobre el terreno, como estructura urbana, canales y vegetación, pero no hay información de su estructura tridimensional.

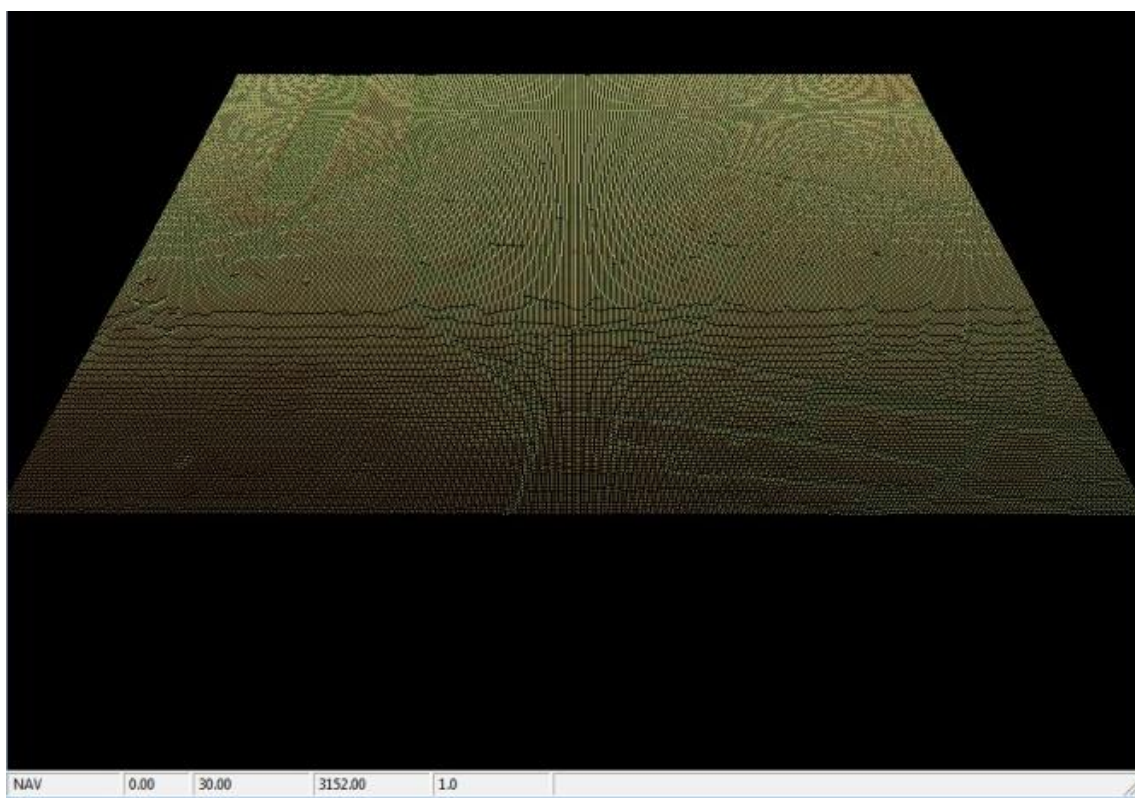
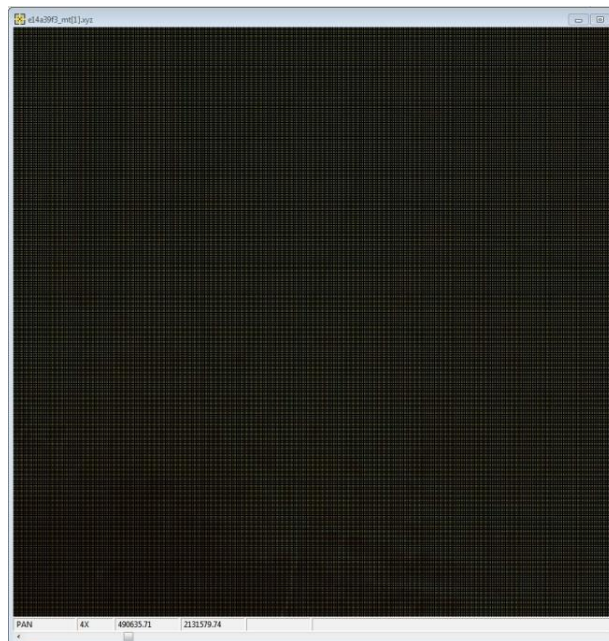


Figura 29. Archivo de puntos XYZ correspondiente al terreno, o suelo desnudo. Debido al escaso relieve en la zona, no es fácil visualizar los rasgos, pero esto también se debe a la baja densidad de puntos del levantamiento.

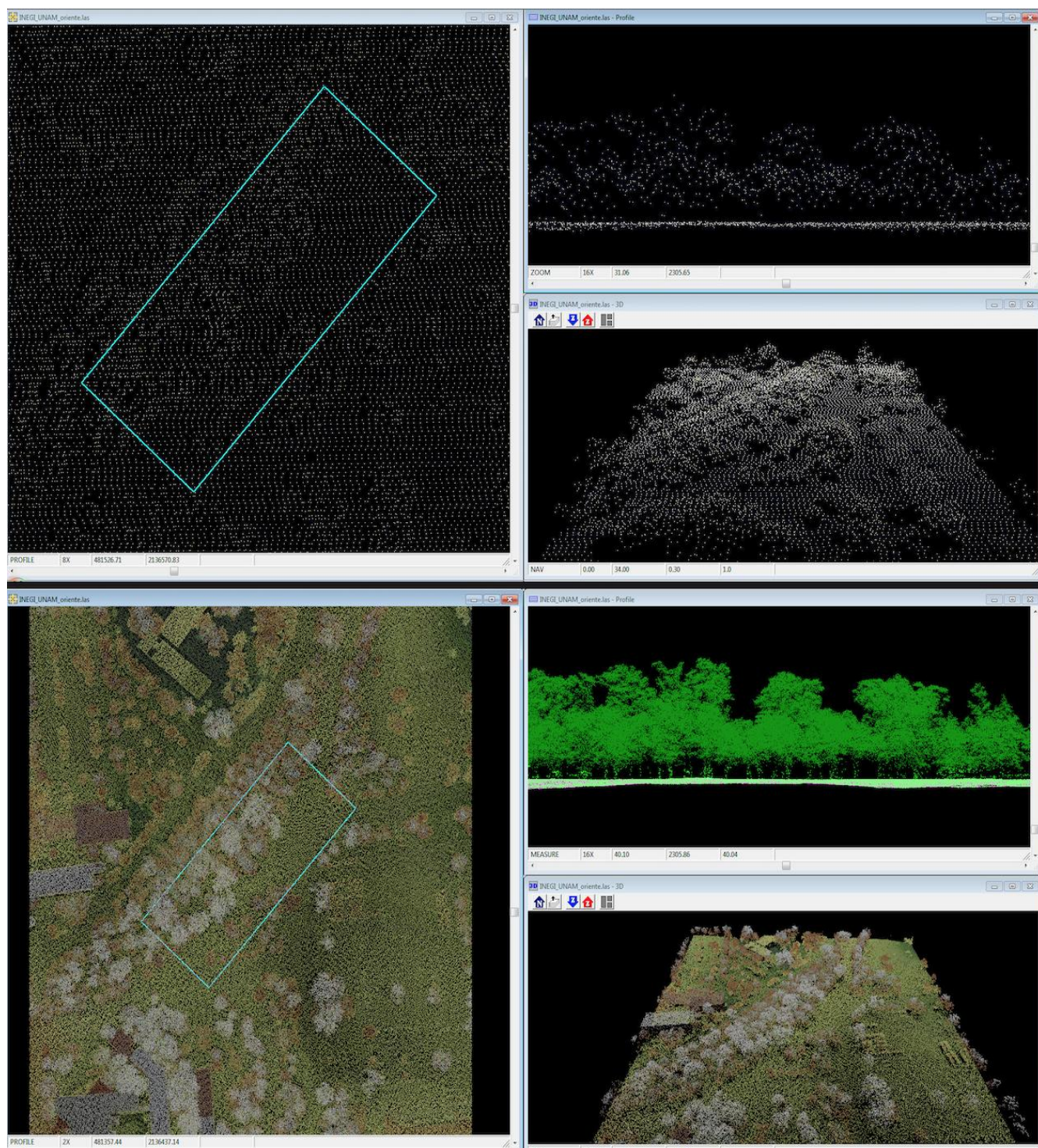


Figura 30. Superposición de los puntos LAS del INEGI (arriba), con los de un levantamiento de alta densidad en la Ciudad Universitaria de la UNAM (abajo). Es evidente la diferencia entre el grado de definición de una baja y una alta densidad de puntos levantados.

6.5.3 Modelos de elevación del terreno

A partir de los puntos LAS y XYZ el INEGI obtuvo modelos digitales de elevación estructurados como rejillas regulares, para la superficie del Distrito Federal, que nos fueron proporcionados. Dada la gran extensión y la densidad de los datos, el INEGI elaboró un modelo de uso general con celdas de 5 metros, que son de utilidad para la mayoría de los usuarios.

Del cubrimiento total del DF, se seleccionaron los cuadrantes correspondientes a la zona de estudio y su entorno inmediato y se unieron en un solo mosaico, que se integró a las capas disponibles para el SIG.

Este material también tiene el propósito de apoyar a los grupos que participan en el presente proyecto con una referencia de elevación más precisa que los modelos disponibles anteriormente, que tenían celdas de 30 metros. Junto con los modelos más detallados que se describen a continuación, este modelo es uno de los principales elementos para el análisis del hundimiento en la zona. La rejilla mencionada tiene celdas de 5 metros, pero tiene una precisión menor que la que es posible extraer de la nube de puntos.

Por ello, a partir de las nubes de puntos originales LAS se generó un nuevo modelo de elevación con celdas de 1.075 x 0.0.784 metros que muestra con mayor detalle rasgos relevantes como bordos, caminos, casas, invernaderos y el relieve de las chinampas y terrenos agrícolas.

Esta rejilla fue corregida posteriormente para obtener alturas ortométricas, que no habían sido aplicadas a los datos lidar originales. La diferencia entre la altura geodésica y la del Geoide Gravimétrico Mexicano oscila entre los -4.85 y los -5.50 metros (es decir, que se suman a la altura lidar). Con estos modelos es posible modelar escenarios de inundación y delimitar las zonas más vulnerables.

En conclusión, es posible decir que los datos proporcionados por el INEGI son una fuente invaluable de información para visualizar los hundimientos generales y para hacer trabajo detallado, cuando se cuenta con los datos originales. Es imposible que el INEGI produzca información a la medida de cada usuario, pero el hecho de que nos haya proporcionado los datos originales ha facilitado que se generen los productos más adecuados. Sin embargo, el análisis de la zona y el seguimiento del hundimiento se verían beneficiados por la realización regular de levantamientos LIDAR de alta densidad, cuyo costo decrece paulatinamente. También debe considerarse el uso del LIDAR terrestre y de mediciones GPS recurrentes, a través de un programa de monitoreo de largo plazo. Con estos modelos es posible modelar escenarios de inundación y delimitar las zonas más vulnerables. Como se explica en otras partes de este documento. En conclusión, es posible decir que los datos proporcionados por el INEGI son una fuente invaluable de información para visualizar los hundimientos generales y para hacer trabajo detallado, cuando se cuenta con los datos originales.

Es imposible que el INEGI produzca información a la medida de cada usuario, pero el hecho de que nos haya proporcionado los datos originales ha facilitado que se generen los productos más adecuados. Sin embargo, el análisis de la zona y el seguimiento del hundimiento se verían precisados con la realización regular de levantamientos LIDAR de alta densidad, cuyo costo decrece paulatinamente. También debe considerarse el uso del LIDAR terrestre y de mediciones GPS recurrentes, a través de un programa de monitoreo de largo plazo.

En las Figuras 31, 32 y 33 que se muestran a continuación, se ejemplifica de manera secuencial los diversos tratamientos realizados al banco de datos original y sus transformaciones para los fines de su visualización en forma de un modelo digital de elevación del terreno dentro de un Sistema de Información Geográfica, así como la simulación de escenarios actuales potenciales de inundación dentro del ANP-EXSGA y zonas circundantes, a partir del modelo de elevación del terreno elaborado para este estudio (Figuras 34, 35 y 36).

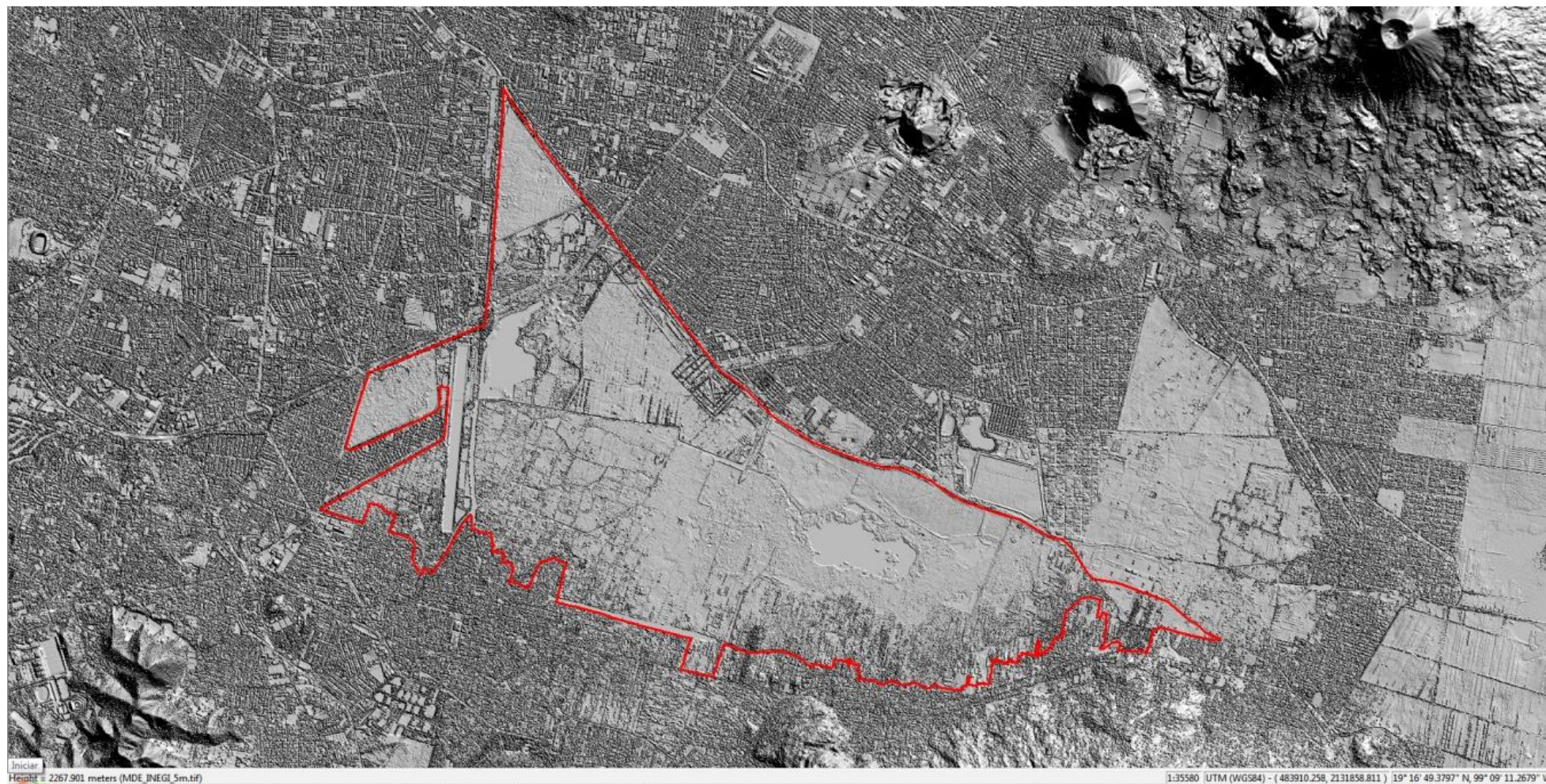


Figura 31. Modelo de elevación del terreno del ANP-EXSGA elaborado para este estudio, integrado por varias rejillas proporcionadas por el INEGI, con celdas de 5 metros.

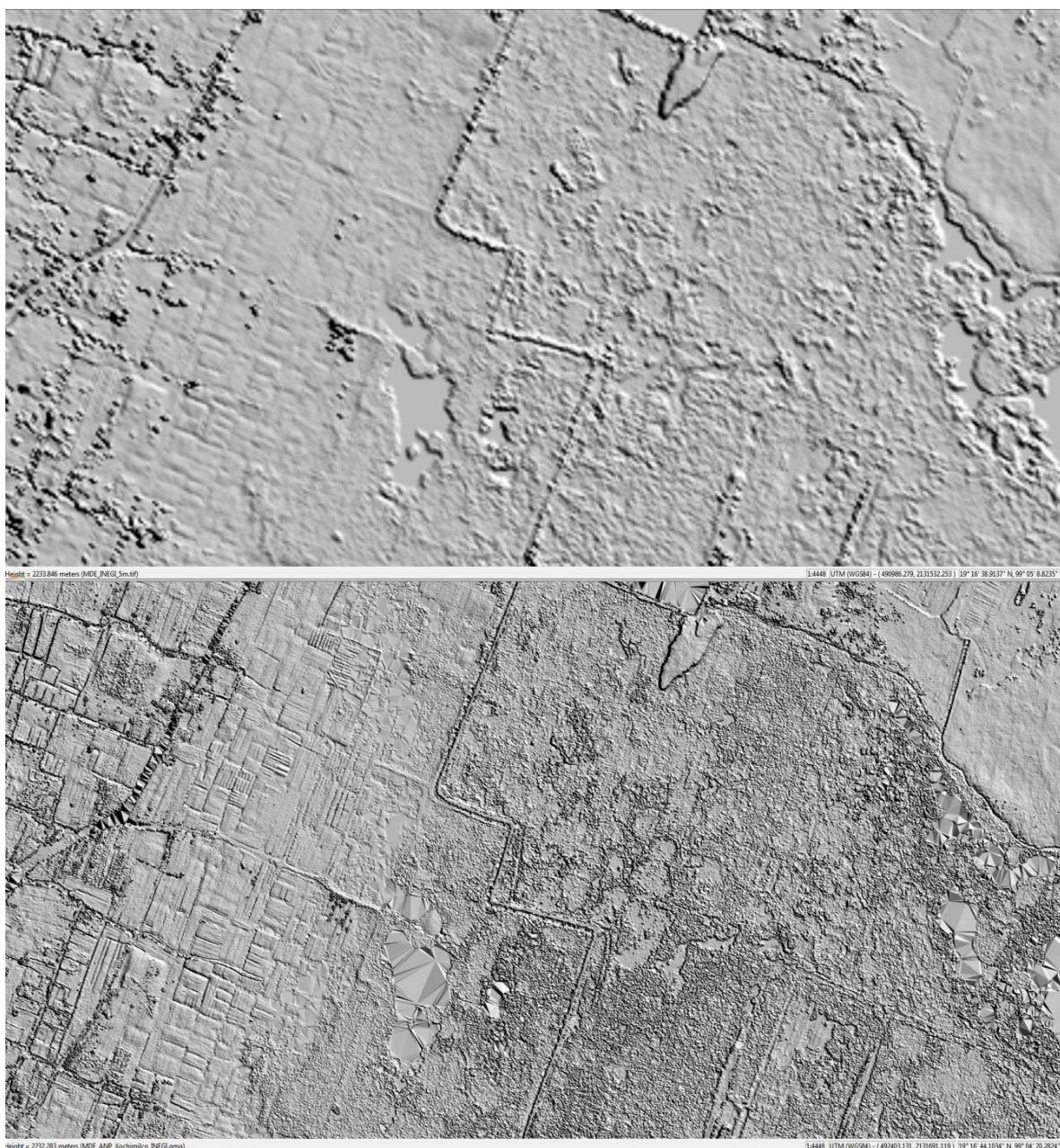


Figura 32. Comparación entre el modelo digital del terreno con celdas de 5 metros proporcionado por el INEGI (arriba) y el modelo obtenido directamente de los archivos LAS, con celdas de 1.075 x 0.0.784 (abajo).

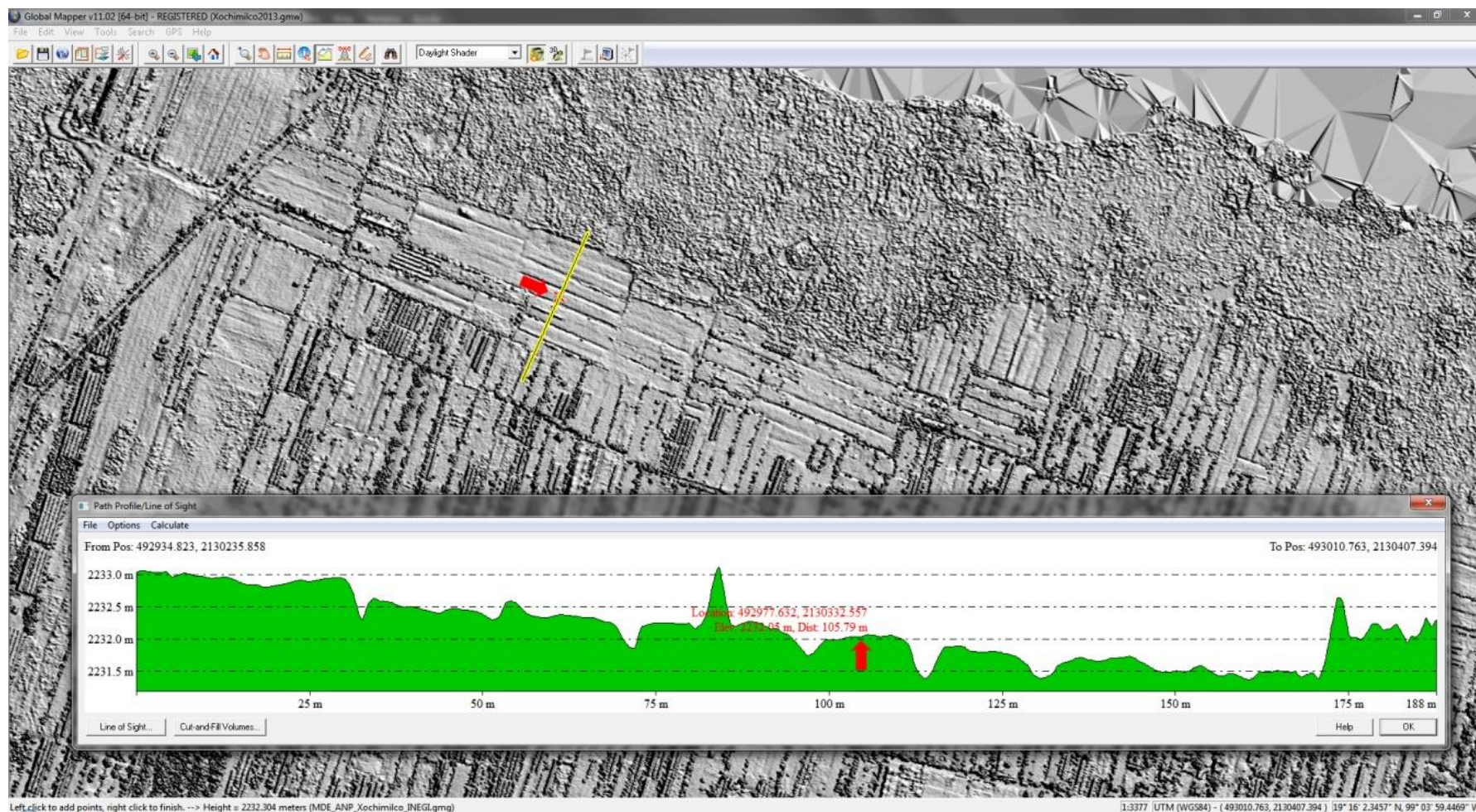


Figura 33. Perfil de un grupo de chinampas del ANP-EXSGA, utilizando el modelo de elevación generado a partir de los datos LAS originales. Es posible medir los desniveles entre chinampas e identificar las zonas propensas a inundación.

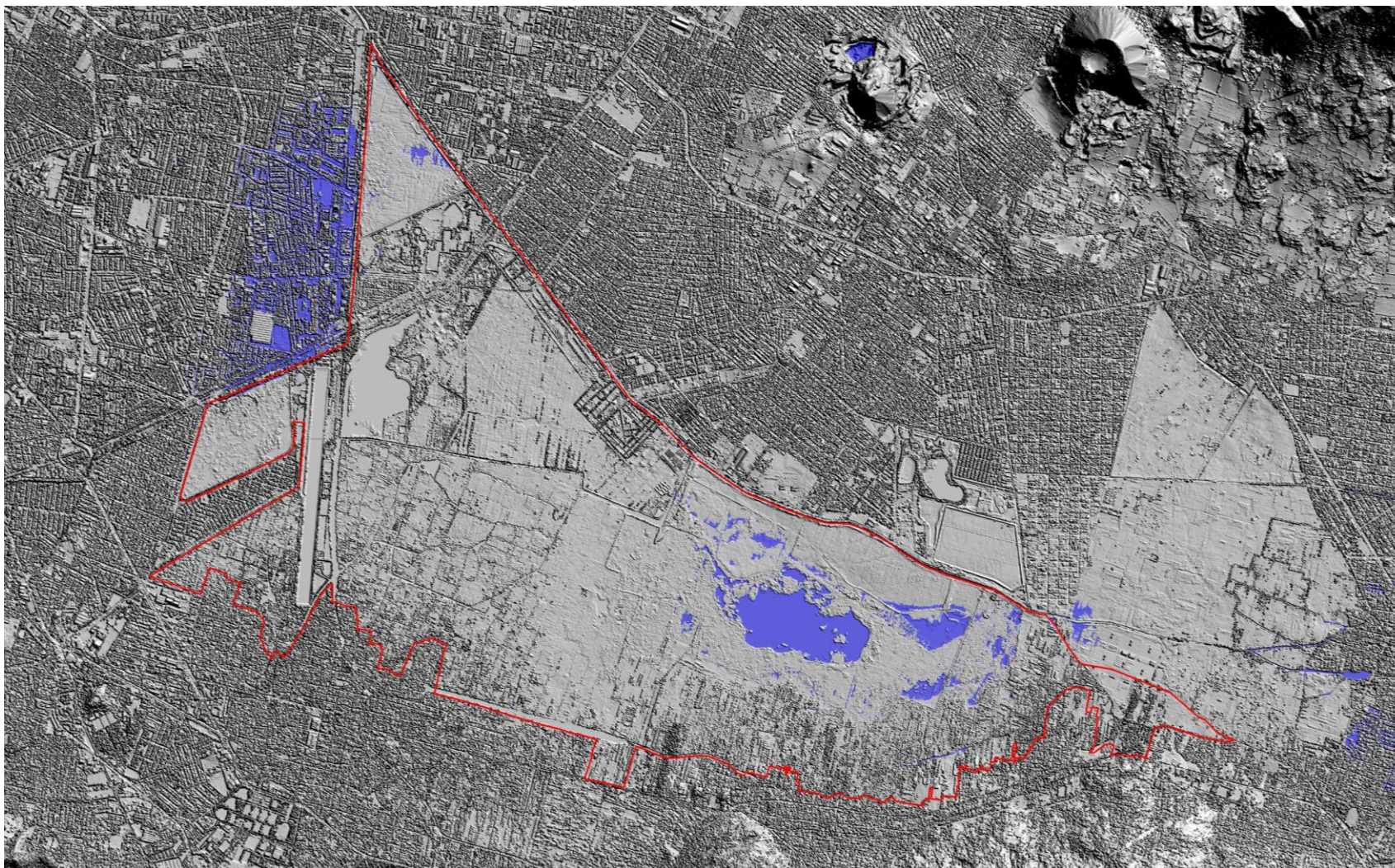


Figura 34. Simulación de las condiciones actuales de inundación e inundabilidad del ANP-EXSGA y zonas circundantes a partir del modelo de elevación del terreno elaborado para este estudio, integrado por varias rejillas proporcionadas por el INEGI, con celdas de 5 metros.

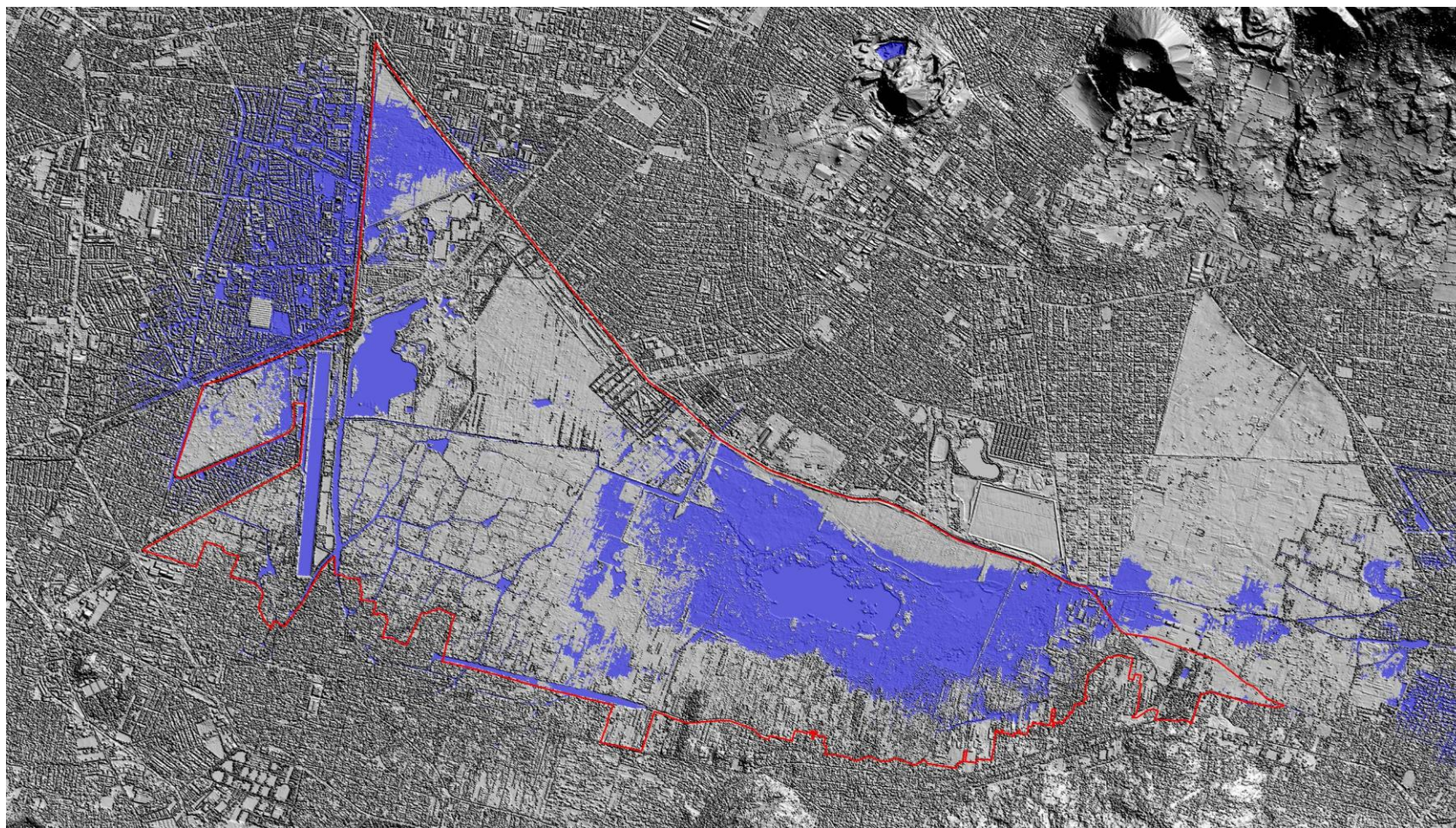


Figura 35. Simulación de escenarios potenciales de inundación del ANP-EXSGA y zonas circundantes sobre el modelo digital de elevación del terreno, para identificar zonas vulnerables a estos eventos.

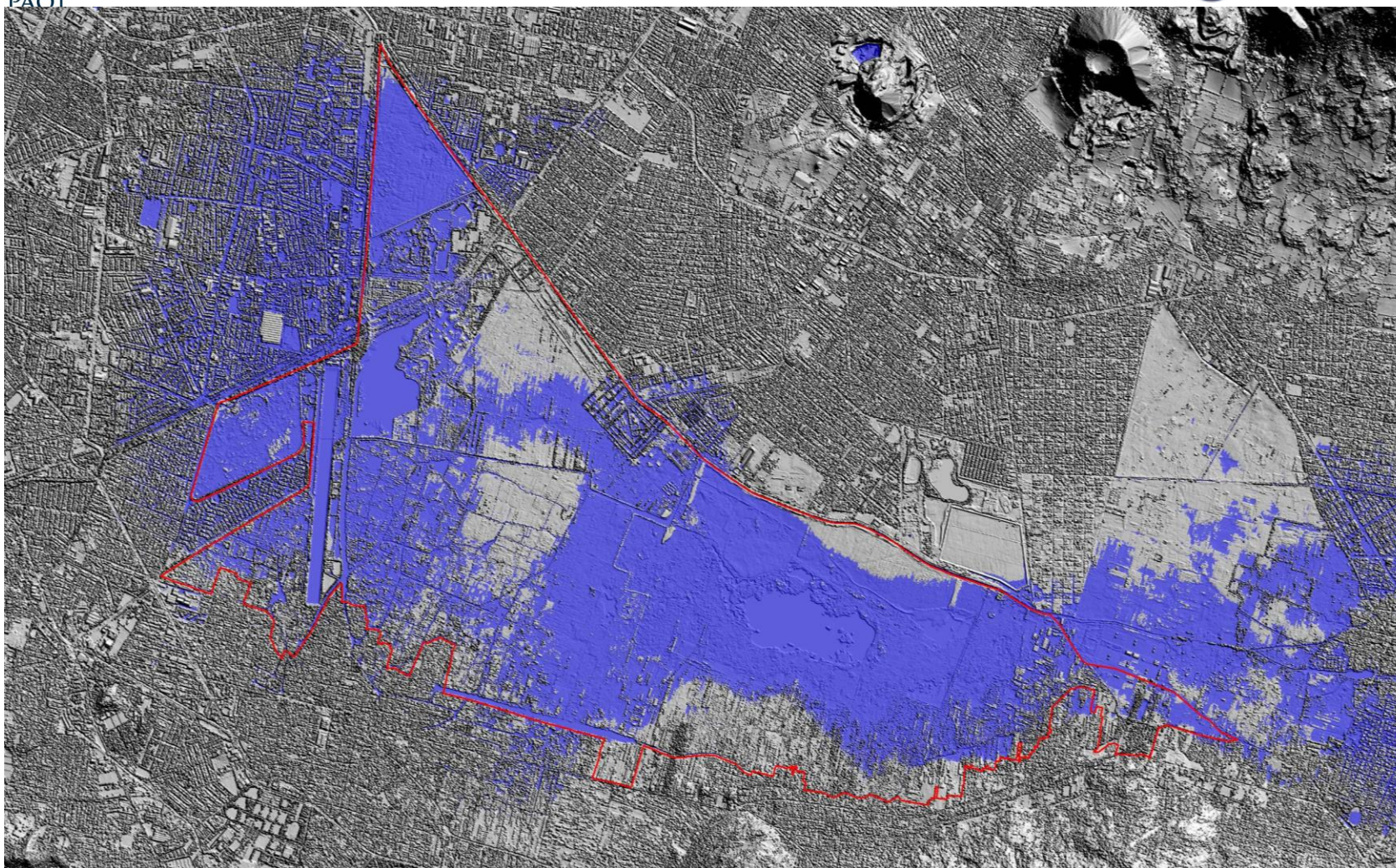


Figura 36. Simulación de escenarios potenciales de inundación del ANP-EXSGA y zonas circundantes sobre el modelo digital de elevación del terreno, para identificar zonas vulnerables a estos eventos..

6.4.4 Análisis para la construcción del mapa de canales a partir del archivo vectorial (shapefile, *.shp) proporcionado por la PAOT

Como insumo para llevar a cabo esta actividad, se utilizaron imágenes satelitales GeoEye-1 de alta resolución (po_4211117_1, 2 y 3) del 12 de mayo de 2012, con un tamaño del píxel en el terreno para las bandas multiespectrales de 1.65 metros. Se eligió esta imagen debido a que combina la presencia de un canal en el infrarrojo cercano, con una alta resolución. Las fotografías aéreas disponibles con esta banda datan del año 2010 y la imagen utilizada permite obtener información más actualizada.

El infrarrojo cercano es absorbido casi en su totalidad por el agua, por lo que permite visualizar los cuerpos de agua como superficies negras que contrastan con los rasgos circundantes. En esta banda los suelos saturados aparecen en tonos de gris oscuro y es posible que algunos cuerpos de agua con abundantes sedimentos, también aparezcan en tonos de gris oscuro en lugar de negro.

Sin embargo, es posible distinguirlos con base en su forma y en la interpretación de los rasgos circundantes. También se utilizó como base una capa vectorial de los canales proporcionada por la PAOT, en la que éstos están representados por polígonos. El propósito es actualizar esta capa con lo identificado en la imagen satelital.

La metodología consiste en manipular el histograma de la imagen para incrementar el contraste entre el negro del agua y el resto de los materiales, y posteriormente crear intervalos de tonalidades de gris, para identificar las que corresponden al agua.

En general basta con establecer un umbral por debajo del cual es posible considerar que los píxeles más oscuros corresponden a la presencia de agua. Es posible entonces vectorizar el resultado de manera automática y verificar que no hayan sido incluidos otros objetos.

Por otra parte, los canales pueden estar cubiertos por vegetación flotante o estar ocultos por el follaje de árboles en la ribera. Para el primer caso, en análisis se complementa buscando zonas de alto brillo, que reflejan la presencia de vegetación flotante altamente productiva, con una actividad fotosintética intensa. Éstas se vectorizan manualmente a través de la interpretación visual, bajo el supuesto de que implican la presencia de agua en el canal, por debajo de la vegetación.

Para el caso de los árboles, es preciso ajustar el borde del polígono a borde del canal, manualmente mediante la interpretación visual. El producto es un archivo vectorial en el que los canales se representan como líneas, o como polígonos complejos cerrados, lo que permite cuantificar la superficie que ocupan dentro del área de estudio.

Actualmente se realizan correcciones manuales a la capa de polígonos de canales obtenidas. Una razón para realizar correcciones de acuerdo con el personal de la PAOT es la identificación no prevista de desfases entre el archivo vectorial y la imagen, que obliga a identificar cuál es la posición correcta.

En general, los canales corresponden con lo identificado en la imagen GeoEye, excepto en las zonas donde las chinampas están sujetas a inundación. En estos sitios, la forma de los canales se ve alterada conforme cambia el nivel del agua a lo largo del año y las chinampas se encuentran abandonadas y en franco proceso de degradación. En estos casos, ya no puede considerarse que los cuerpos de agua son propiamente canales, sino que tienden a integrarse como parte de la laguna producida por el hundimiento.

En las Figuras 37, 38 y 39 que se muestran a continuación, se ejemplifica de manera secuencial los diversos tratamientos realizados al banco de datos original y los procesamientos efectuados para su transformación en el mapa de canales dentro de un Sistema de Información Geográfica.



Figura 37. Mapa del ANP-EXSGA a partir de la banda infrarroja (720-980nm) de la imagen GeoEye del 12 de mayo de 2012. Puede observarse cómo los cuerpos de agua aparecen en negro, y en presencia de sedimentos, en tonos de gris oscuro.

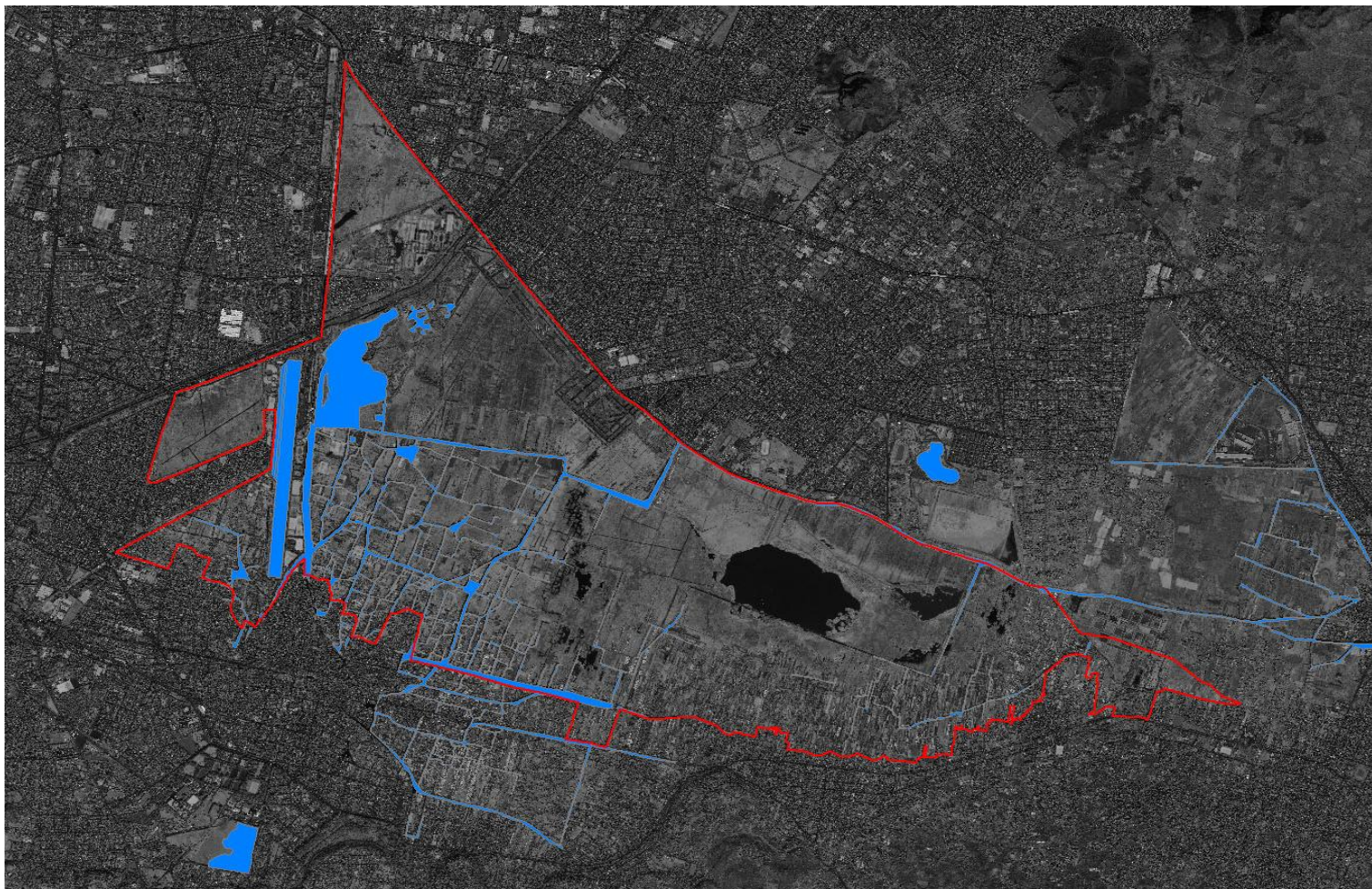


Figura 38. Mapa de delimitación de canales del ANP-EXSGA, en SIG, a partir de la imagen infrarroja tras la manipulación del histograma, psra enfatizar el contraste entre los cuerpos de agua mostrados en negro y gris oscuro y otros materiales como suelo y vegetación.

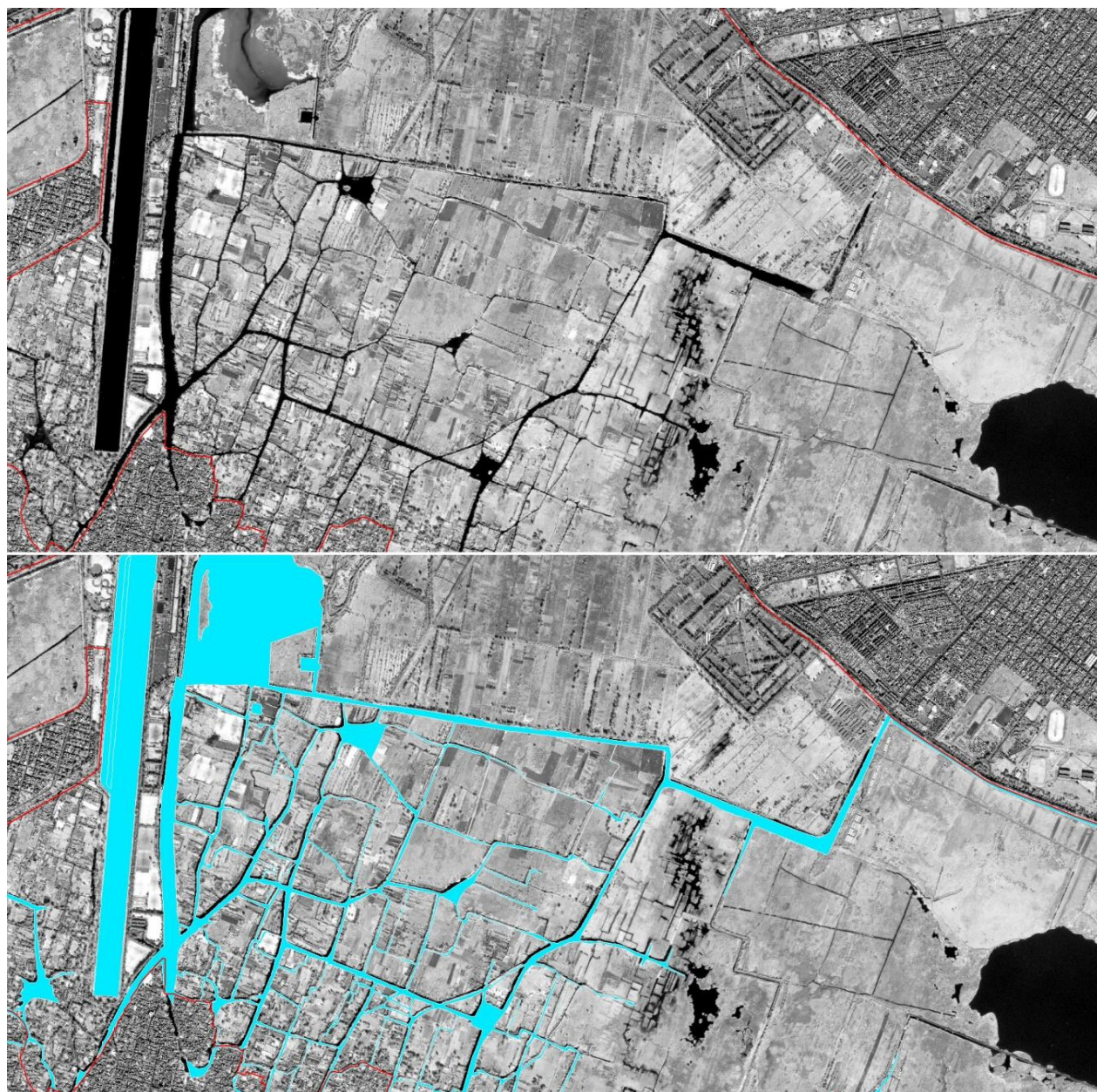


Figura 39. Arriba: acercamiento de la imagen infrarroja tras la manipulación del histograma para enfatizar el contraste entre los cuerpos de agua mostrados en negro y gris obscuro, y otros materiales como suelo y vegetación. Abajo: Archivo vectorial de canales proporcionado por la PAOT, sobre la imagen. Puede observarse la correspondencia de los canales, excepto en las zonas donde su estructura desaparece por efecto de las inundaciones, haciendo más difícil su identificación.

6.5.5 Diseño e implementación de una interfaz como herramienta informática compatible con la plataforma de la PAOT.

En primer término, se realizó un análisis de los requerimientos del sistema, desde el punto de vista de las necesidades de los usuarios, de los niveles de información que se desea mostrar y de la utilidad del sistema para la toma de decisiones por parte de las autoridades, identificándose los siguientes alcances.

6.5.5.1 Usuarios potenciales identificados

Autoridades. En general necesitan visualizar información sintética, realizar comparaciones de resultados ya interpretados por especialistas y dar seguimiento a indicadores y mapas de carácter general. Para entrar en el detalle de políticas, planes y acciones, se apoyan en el personal técnico especializado. Son usuarios registrados del sistema.

Personal técnico especializado. Realiza el mantenimiento del sistema, lleva a cabo análisis, mediciones y propone parámetros físicos, biológicos, sociales y operativos detallados para fundamentar la realización de acciones. Son administradores del sistema.

Investigadores y especialistas. Revisan el estado general de la problemática de la zona y con frecuencia requieren descargar parte de la información disponible, así como hacer observaciones e integrar datos, previa aprobación por un panel técnico-científico o un órgano similar.

El usuario del público en general. Visualiza información básica de la problemática de la zona como un medio para crear conciencia y participación ciudadana. Entre los visitantes, algunos buscan información general, pero hay otros con experiencia y conocimiento empírico de la zona, y es posible que deseen aportar opiniones, conocimiento, participar en programas o corregir datos, entre otras. Hay usuarios no registrados, que pueden hacer consultas generales y usuarios registrados, que pueden colocar comentarios para su consideración por los administradores y el panel técnico-científico.

6.5.6 Plataforma técnica

De acuerdo a la necesidad de crear un portal que permita la retroalimentación colaborativa de varios investigadores para crear y enriquecer el SIG se propone que la configuración básica del sistema tenga las características descritas a continuación, sujeto a la aprobación por el personal de la PAOT.

Para la programación del portal, se determinó que el software "Joomla" cumple puntualmente con los requerimientos. Joomla es un Sistema Manejador de Contenidos (CMS por sus siglas en inglés). El listado del software del que depende "Joomla" se menciona a continuación:

- Software PHP(versión 5.4+): Es un procesador de lenguaje que recibe órdenes a través de la web y las ejecuta en el servidor.
- Apache Server(versión 2.x+): Es el oftware que recibe peticiones vía web y las ejecuta a través de varios módulos que otorga.
- Módulo PHP para el servidor apache: Es el módulo que actúa como un puente entre el servidor web y el "intérprete" de las órdenes que se han enviado a través de la internet.
- Módulo XML para el servidor apache: Es el módulo que interpreta los parámetros que se le dan al lenguaje PHP en formato XML (texto plano con etiquetas).
- Módulo ZLIB para el servidor apache: Es el módulo que permite recibir y procesar correctamente archivos diferentes a los de texto plano recibidos por el servidor apache.
- Software manejador de bases de datos MySQL(versión 5.1+): Necesario para guardar comentarios y temas que se expongan a través de "Joomla".

Con lo anterior se cumplirían las necesidades para la creación del portal, mismo que se irá desarrollando en colaboración con personal de la PAOT para indicar la interactividad deseada con los usuarios, permisos de acceso y de edición. En cuanto a la visualización por vía Web de las capas de información geográfica, es necesario el siguiente software:

- Manejador de bases de datos PostgreSQL: donde se aloja toda la información vectorial.
- Servidor de aplicaciones Glassfish: que ofrece la capacidad de despliegue de aplicaciones web basadas en el lenguaje Java.
- Aplicación Geoserver: servidor de información espacial que funciona como un canal de comunicación entre la interfaz gráfica a través de la red que ocupa el usuario (Geoexplorer) y la base de datos (PostgreSQL).
- Aplicación GeoExplorer: conjunto de herramientas, la mayoría basadas en el lenguaje javascript/openlayers, que permiten la exploración de un mapa de manera intuitiva e interactiva que ofrece las opciones de edición de mapas, carga de nuevas capas en formato shape o tiff, edición de estilos, manejo de transparencias, inclusión de nuevas fuentes de información que cumplan con los estándares Web Map Service (WMS), establecidos por la Open Geospatial Consortium (OGC), creación y publicación de mapas temáticos entre otras funciones.

La edición/creación de mapas nuevos también está controlada por medio de permisos de usuario, por lo que no todos pueden acceder a la edición o creación, pero los usuarios no registrados tienen permisos de exploración de mapas ya creados, lo que incluye acciones de paneo, acercarse y alejarse del mapa consultado y activación y desactivación de capas de algún mapa temático sin opción a guardar los cambios. Por lo que respecta al hardware y software requeridos en el servidor, se recomienda hardware de alta capacidad y equipo que no sea necesario actualizar durante los primeros 4 años de operación o más dependiendo del mantenimiento y administración del hardware), como el siguiente:

- Procesador: 2 procesadores Intel® Xeon® E5-2643 3.30GHz, con 4 núcleos físicos.
- Memoria RAM: 32 GB (4 módulos de 8 GB) de tipo RDIMM con una velocidad de transmisión de 1600 MHz.
- Controlador RAID 6 para permitir un arreglo de discos RAID de información redundante.
- Discos duros: 6 Módulos tipo SAS de 300 GB c/u de 15000 RPM
- Un Sistema de Alimentación Ininterrumpida Dell de 1920W.

Se recomienda también el sistema operativo Ubuntu Server que ha mostrado ser robusto y de alta respuesta cuando se necesitan de servicios web como los que se han mencionado antes.

Cabe destacar que todo el software mencionado está regido bajo la licencia GPL de Software Abierto por lo que no es necesario pagar ninguna licencia, ni por el software con el que se desarrollarán las aplicaciones ni por el sistema operativo.

6.5.7 Integración del sistema

Se programó un visualizador con base en los elementos técnicos descritos anteriormente y se integraron las capas de información más relevantes, para realizar pruebas y permitir al personal de la PAOT valorar su funcionamiento. En las Figuras 40 a la 47 que se muestran a continuación, se ejemplifica de manera secuencial la estructuración y diversos tratamientos realizados al banco de datos original y sus transformaciones para los fines de estructuración del visualizador del Sistema de Información Geográfica Participativo de la zona chinampera para identificar los riesgos relacionados con la afectación de la calidad del agua y los hundimientos en Xochimilco, motivo de este estudio

Figura 40. En el visualizador es posible encender y apagar las capas incluidas en la leyenda. También añadir capas a la leyenda, seleccionadas de fuentes de datos específicas, y modificar el orden en que aparecen. Hay controles de navegación y escala en una esquina del mapa.

Identificado como admin. [Cerrar sesión](#)

GeoServer

Capas

Gestionar las capas publicadas por GeoServer

[Agregar nuevo recurso](#)
[Eliminar las capas seleccionadas](#)

<< < 1 2 3 > >> Resultados 1 a 25 (de un total de 66 ítems)

☐	Tipo	Espacio de trabajo	Go to next page	Nombre de la capa	Habilitada?	SRS nativo
☐	Image	cite	prueba	GDAL_IMPORT		EPSG:4326
☐	Image	cite	prueba	OAX_MUNICIPIOS07		EPSG:4326
☐	Vector	jap	INUNDACIONES_PLUVIALES (MM)1	INUNDACIONES_PLUVIALES (MM)1		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	aceleraciones_sism_pr_10		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	aceleraciones_sism_pr_100		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	aceleraciones_sism_pr_500		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	albergues		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	bancos		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	bares		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	bases_militares		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	bibliotecas		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	bomberos		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	calles		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	centros_comerciales_		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	cines_teatros_		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	codigo_postal		EPSG:4326
☐	Image	jap	jap	codigo_postal1		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	colonias_distrito_federal_geo		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	cuerpos_agua		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	curvas_nivel_10_m		EPSG:4326
☐	Vector	jap	jap	densidad_lineamientos		EPSG:4326
☐	Image	jap	jap	df_191		EPSG:4326
☐	Image	jap	jap	df_deleg		EPSG:4326

Figura 41. Se puede seleccionar las capas que conforman la leyenda de entre las disponibles en el servidor de GeoServer. En este caso, la fuente de información que se agrega es la base de datos que contiene los vectores proporcionados por la PAOT y que están alojados en PostgreSQL. Esta función pueden realizarla los administradores y algunos usuarios registrados.

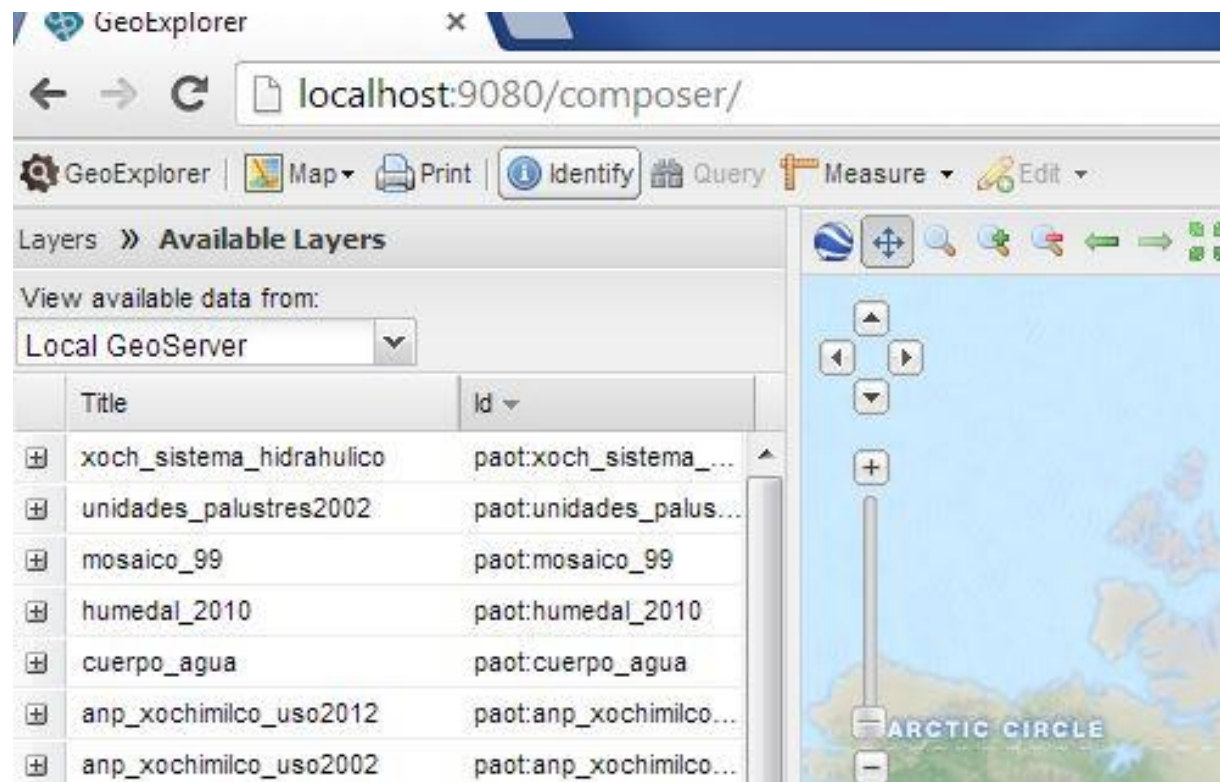


Figura 42. Tiene la posibilidad de integrar capas disponibles en otros servidores de la PAOT o de otras instancias, que cumplan con los estándares WMS.

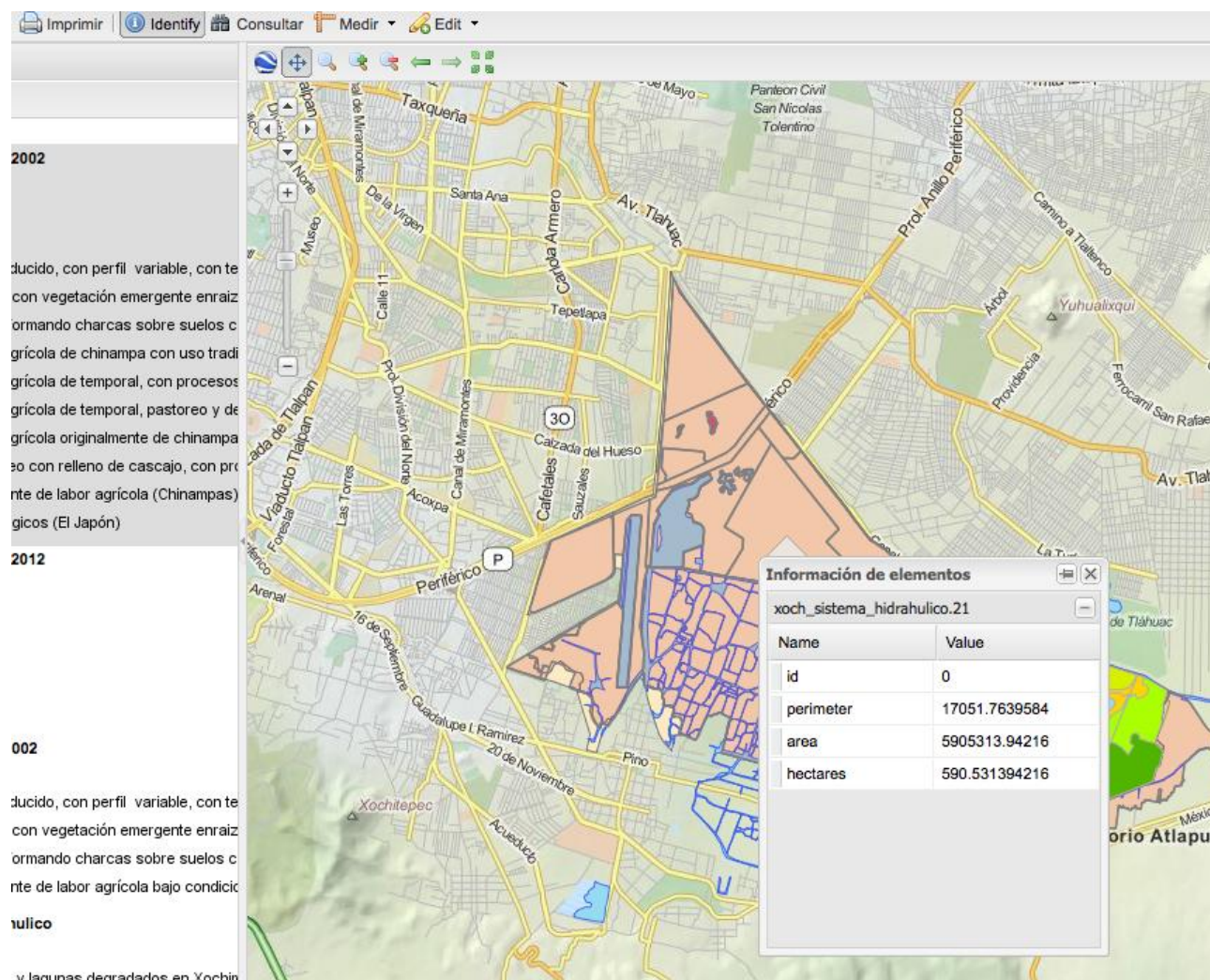


Figura 43. Permite desplegar la información relacionada con los rasgos y objetos, tocándolos con el puntero en el mapa.

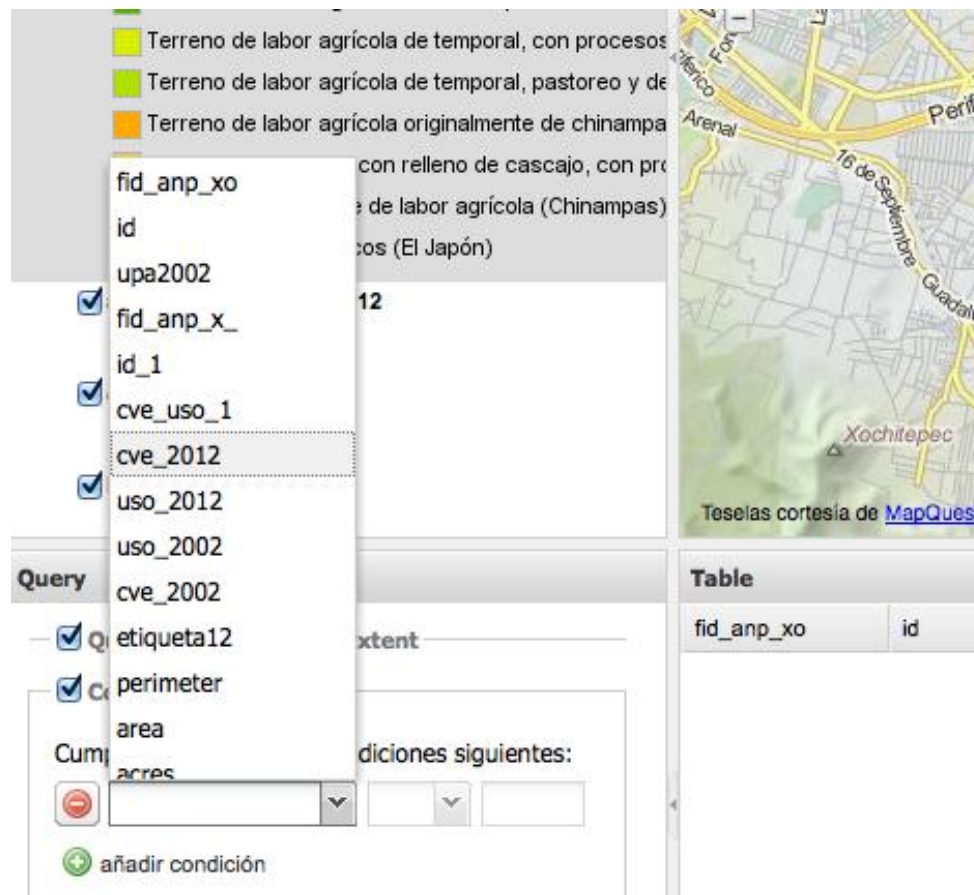


Figura 44. Pueden realizarse consultas de tipo SQL que permiten filtrar la información disponible para cada capa.

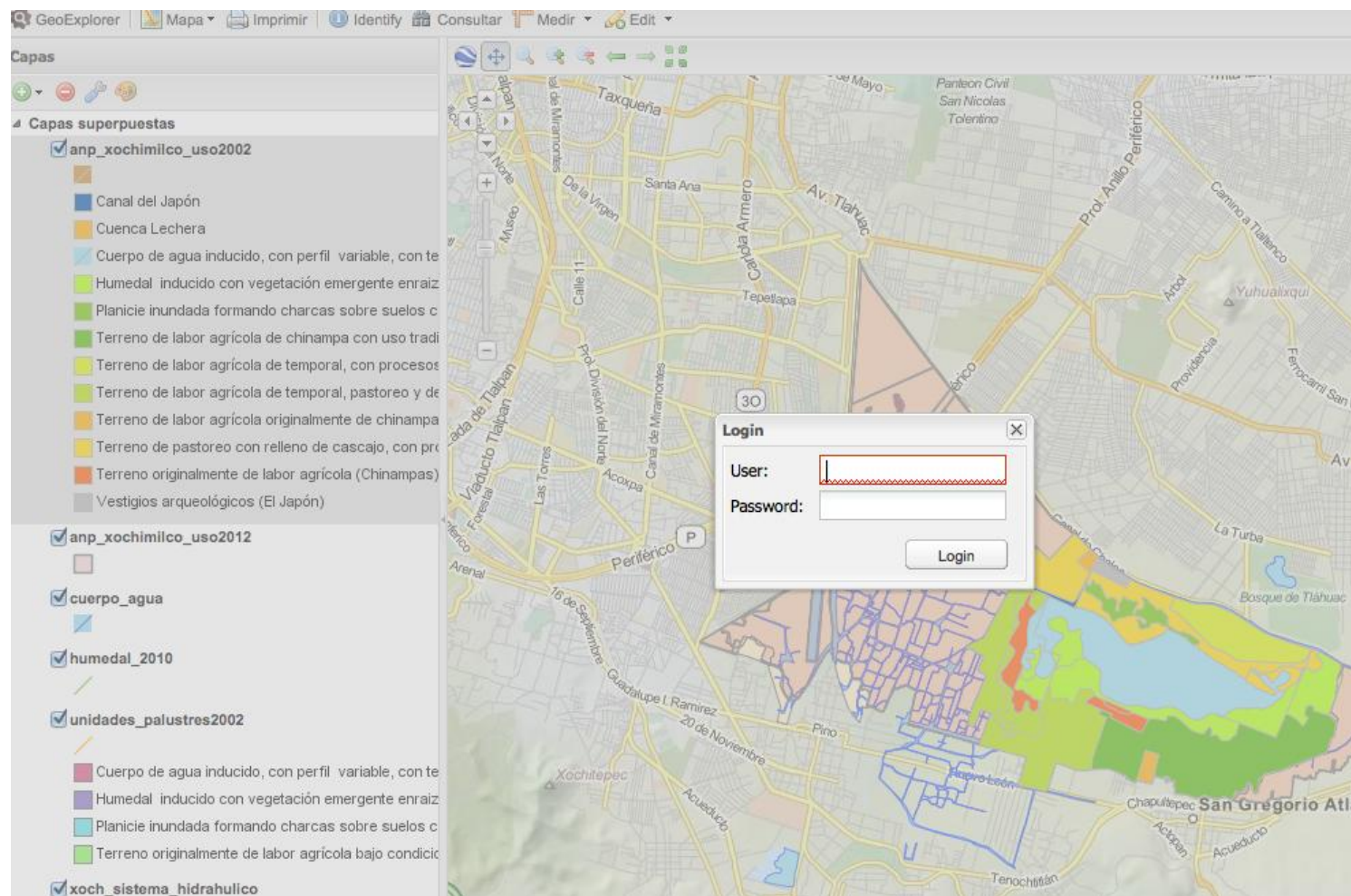


Figura 45. Incluye formulario para acceso a usuarios registrados. También se pueden programar formularios para la introducción de comentarios, que deben ser validados por una instancia técnico-científica designada por la PAOT.

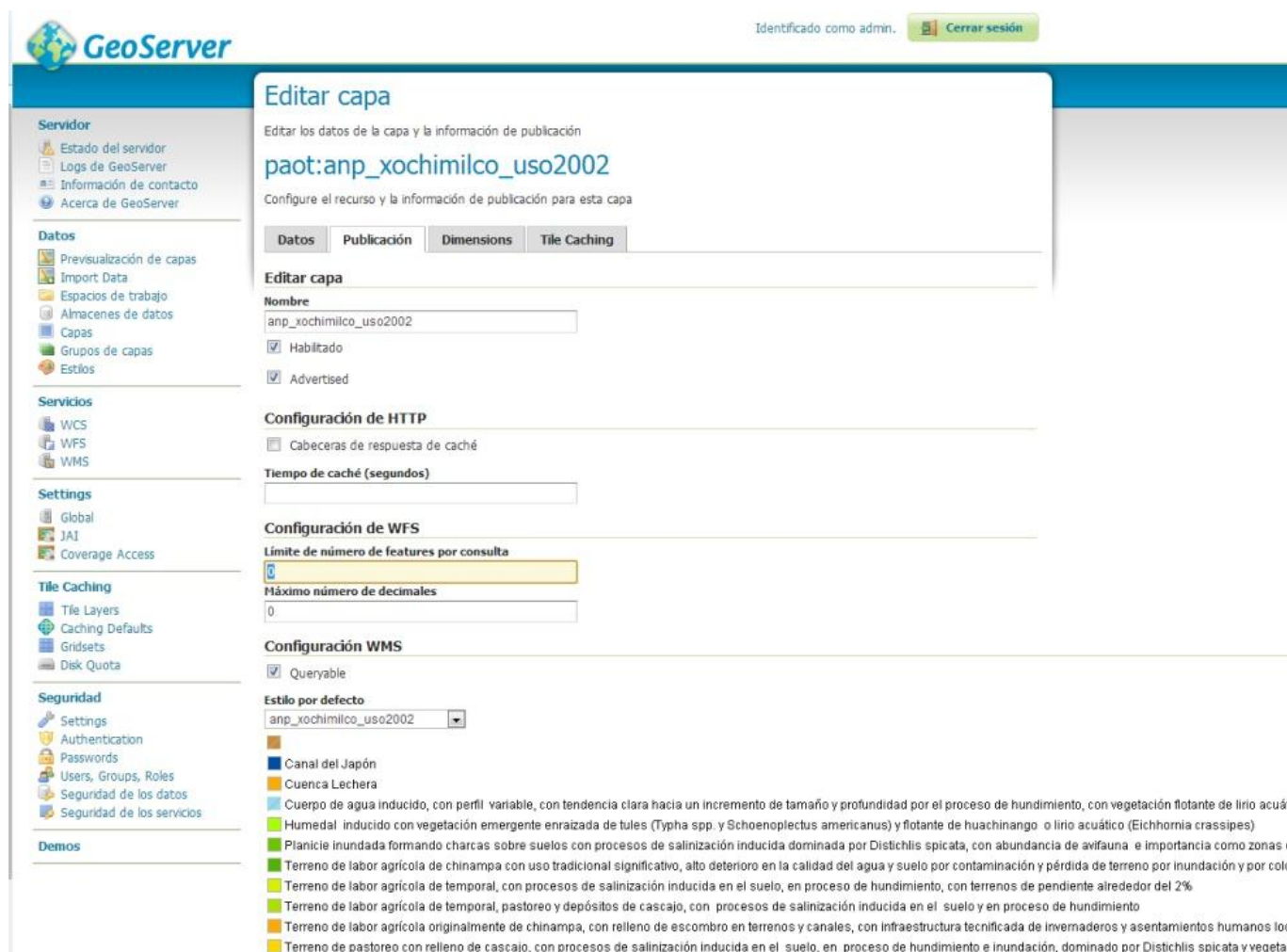


Figura 46. Posibilita editar la apariencia del mapa controlando el estilo de las capas individuales, como se hace con la mayoría de los programas para el manejo de información geográfica.

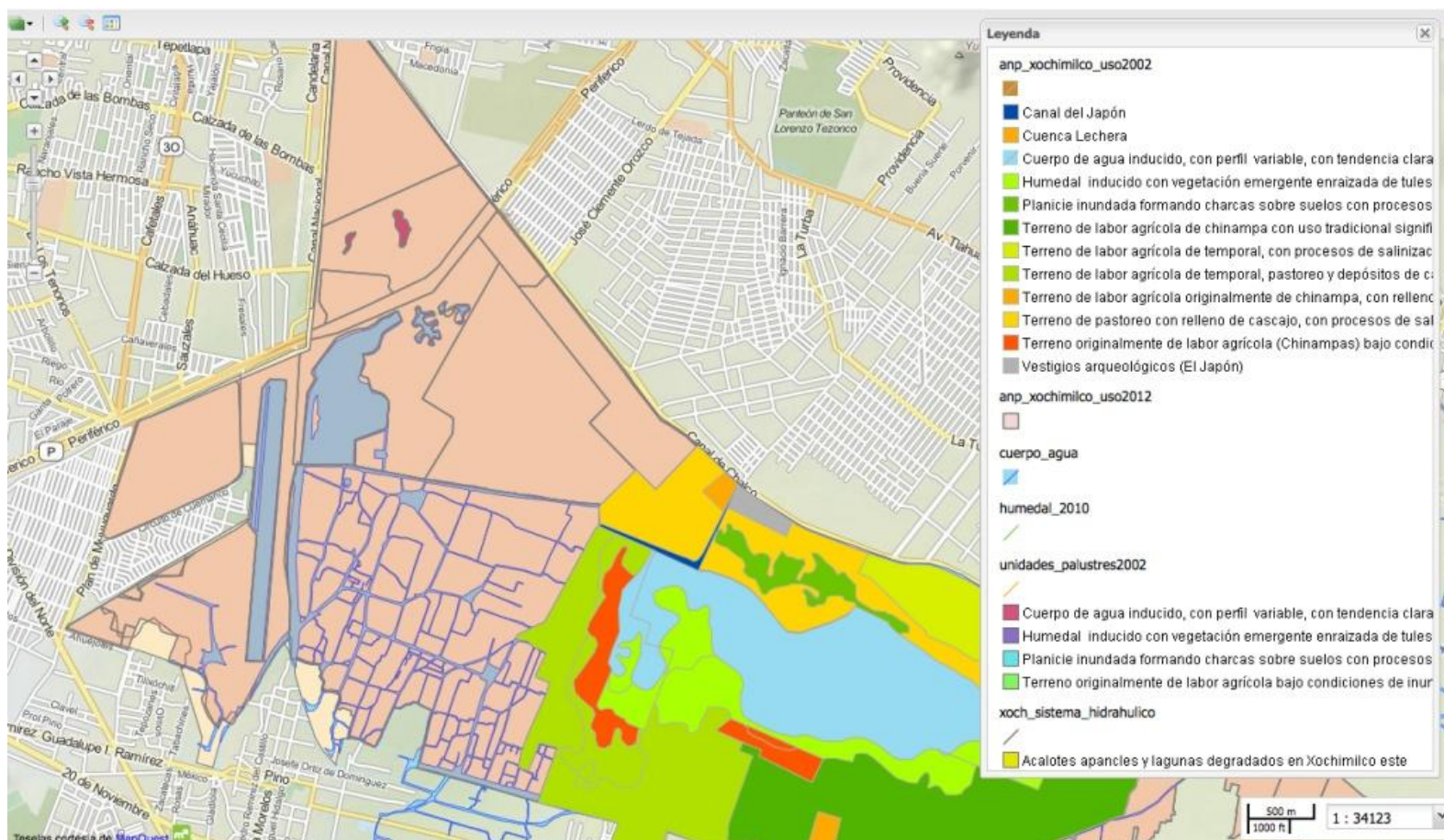


Figura 47. El sistema permite la creación de mapas como imagen o impresos, seleccionando la leyenda y su ubicación.

El sistema de la interfaz desarrollado es prototipo y su instalación final hizo en el servidor que lo alojará quedando listo para incorporar la información que esté disponible por los usuarios y la nueva que pueda generarse a futuro .

6.4.8 Cantidad y tipo de datos

Se determinó que la cantidad de información que se incorporará al sistema a mediano y largo plazo, así como la frecuencia esperada de consultas, requiere de equipo de cómputo con capacidad moderada, aunque sí debe tomarse en cuenta que el procesamiento de nubes lidar requiere de una memoria RAM de entre 16 y 32 Gbytes, y de procesadores rápidos, del tipo del i7 o Xeon Quad Core de Intel. Sin embargo, los usuarios del SIG no procesarán esta información, sino que podrán visualizar los productos obtenidos de ella. Lo mismo aplica para el análisis y despliegue de las imágenes de alta resolución, cuando se trabaja con la totalidad de los datos.

Para la visualización de estas imágenes por medio de la Web, existen algoritmos que segmentan estas imágenes para mostrarlas a distintas escalas de manera rápida. Los archivos vectoriales previstos no ocupan grandes volúmenes, pero en todo caso, es necesario contar con discos duros rápidos para agilizar las consultas.

En la mayoría de los casos, como se verá más adelante, los usuarios visualizarán mapas temáticos de carácter sintético. Las especificaciones del equipo que se utilizará como servidor serán concertadas con la PAOT.

6.4.9 Características del visualizador de la Interfaz

Este es de gran importancia, ya que provee el acceso al SIG, determina la facilidad con la que es posible consultar la información, contribuye a mantener el interés de los usuarios y crea una imagen visual tanto de la problemática, como de la calidad del esfuerzo que la PAOT realiza para abordarla y hacerla pública.

Se buscaron casos análogos de sistemas para la consulta de información ambiental, de riesgo o de conservación de áreas naturales protegidas, para identificar elementos útiles o detectar inconvenientes. Uno que llama la atención es el Atlas de Riesgos de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel en Ciudad Universitaria, (Lot et al., 2012), que además de ser una publicación impresa, cuenta con un portal donde se describen las principales amenazas que enfrenta la REPSA y da acceso a un SIG donde puede visualizarse su distribución espacial, que se encuentra alojado en los servidores de la CONABIO.

Este esquema sencillo pero muy eficaz, parece ser una alternativa útil y fácilmente viable para el sistema que se desarrolla para la PAOT.

En consecuencia, se propone una interfaz basada en un portal Web, en el que se muestra información sobre la problemática de la zona de estudio, dentro del cual esté habilitada la visualización de datos geográficos y la posibilidad de realizar comentarios y publicar datos por los usuarios registrados. Esta interfaz muestra la información con distintos niveles de complejidad, o de especialización, dependiendo del tipo de usuario que la utiliza. Los niveles propuestos son:

Histórico

Muestra en el portal mapas e información histórica general de publicaciones y estudios, del origen y evolución de los cinco lagos originales de la cuenca del Valle de México, , su estado en la época prehispánica, su proceso de desecación y la ocupación del suelo lacustre por la evolución social, económica y urbana de la Ciudad de México dio origen a la situación actual, con énfasis en sistema del Lago Xochimilco-Chalco.

Descriptivo

Permite a través del SIG visualizar mapas sintéticos e información derivados de estudios y diagnósticos históricos sociales, técnicos y científicos disponibles generados por trabajos anteriores y/o los elaborados en este estudio y en estudios previos, con énfasis el Area

Natural Protegida Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco (ANP-EXSGA), especialmente su zonificación ambiental y las causas, los efectos y la evolución de los problemas ambientales actuales dentro del ANP. Estos mapas no se generan en línea como producto de una consulta, sino que son preparados con anterioridad. Los usuarios pueden recorrer el portal y encender y apagar capas del SIG para establecer comparaciones o facilitar su comprensión. Los mapas mostrados pueden ser guardados como una imagen o enviado a una impresora.

Analítico

Se proporciona acceso a los mapas específicos que contienen los datos técnicos y científicos de cada problema, a partir de los cuales se han elaborado los mapas sintéticos, así como a los resultados de investigaciones, cartografía base, imágenes específicas de distintos tipos y épocas, visualización de atributos y bases de datos asociadas. En este nivel es posible habilitar la descarga de parte de la información por los usuarios registrados. También se cuenta con acceso a documentos, decretos, artículos de investigación, planes y otros elementos que no necesariamente pueden ser geocodificados o asociarse con ubicaciones específicas. Es posible encender y apagar capas, introducir comentarios, acceder al catálogo de coberturas disponibles y mantener el contacto con los administradores. En una etapa posterior, es posible incorporar en el portal la capacidad de intercambiar opiniones a través de un “chat” o de blogs.

En las Figuras 48 a la 63 que se muestran a continuación, se ilustra de manera secuencial los temas de información para los niveles indicativo y analítico previstos en primera instancia, dentro la interfaz del SIG Participativo de este estudio.

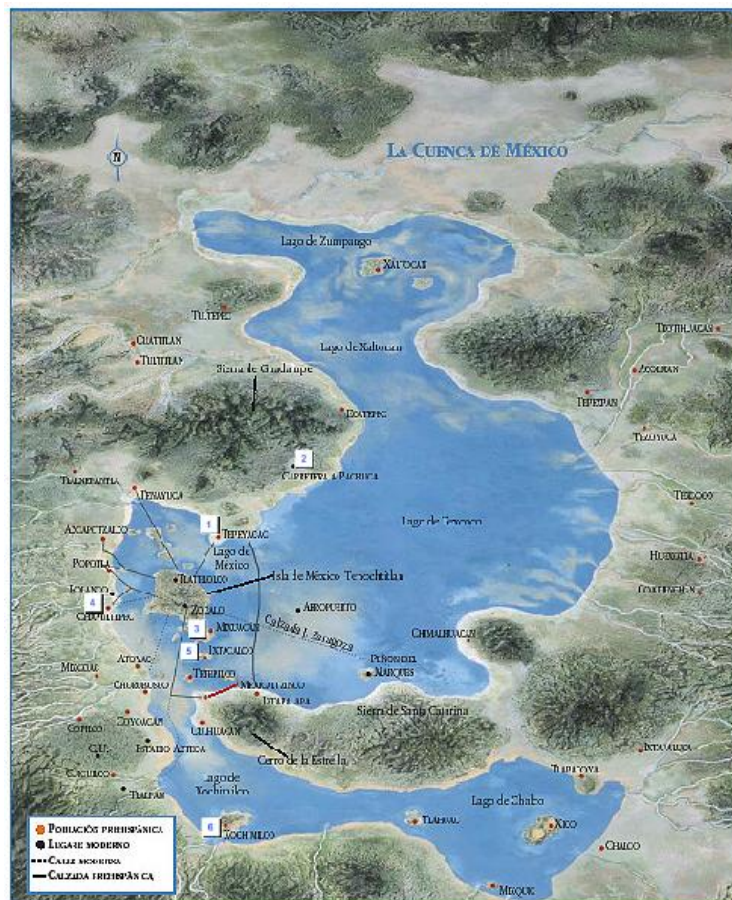


Figura 48. El nivel histórico del SIG Participativo de la PAOT muestra el origen y la evolución del sistema lacustre de la cuenca del Valle de México, determinado por la orografía e hidrografía regional, en formatos adecuados para la página Web del portal,.

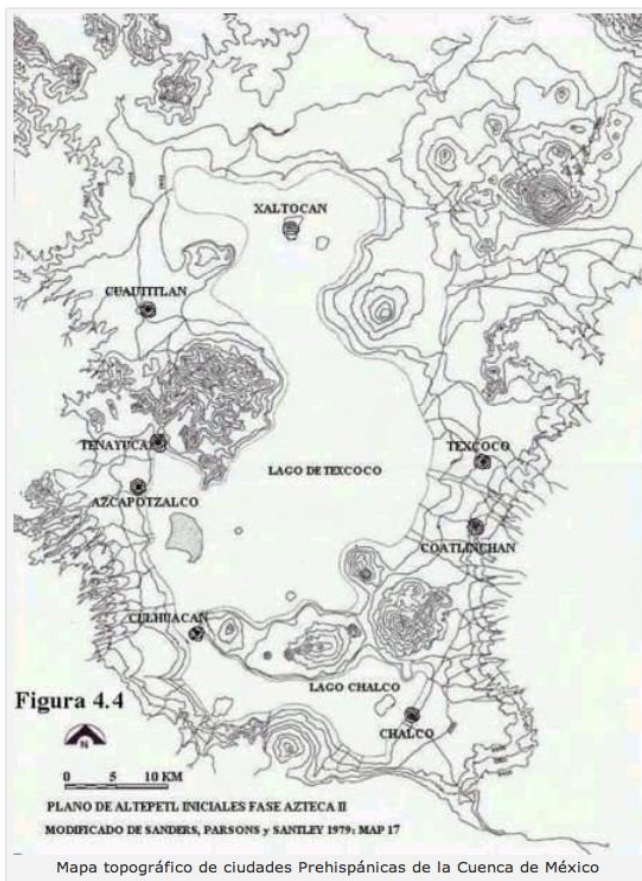


Figura 49. El nivel histórico del SIG Participativo incluye de manera relevante la capa georreferenciada de la topografía de la Cuenca del Valle de México y concluye con la descripción de la Cuenca del Lago Xochimilco-Chalco, como elemento crítico para la comprensión de los problemas actuales que se presentan en su planicie lacustre en general y en particular dentro del ANP-EXSGA.

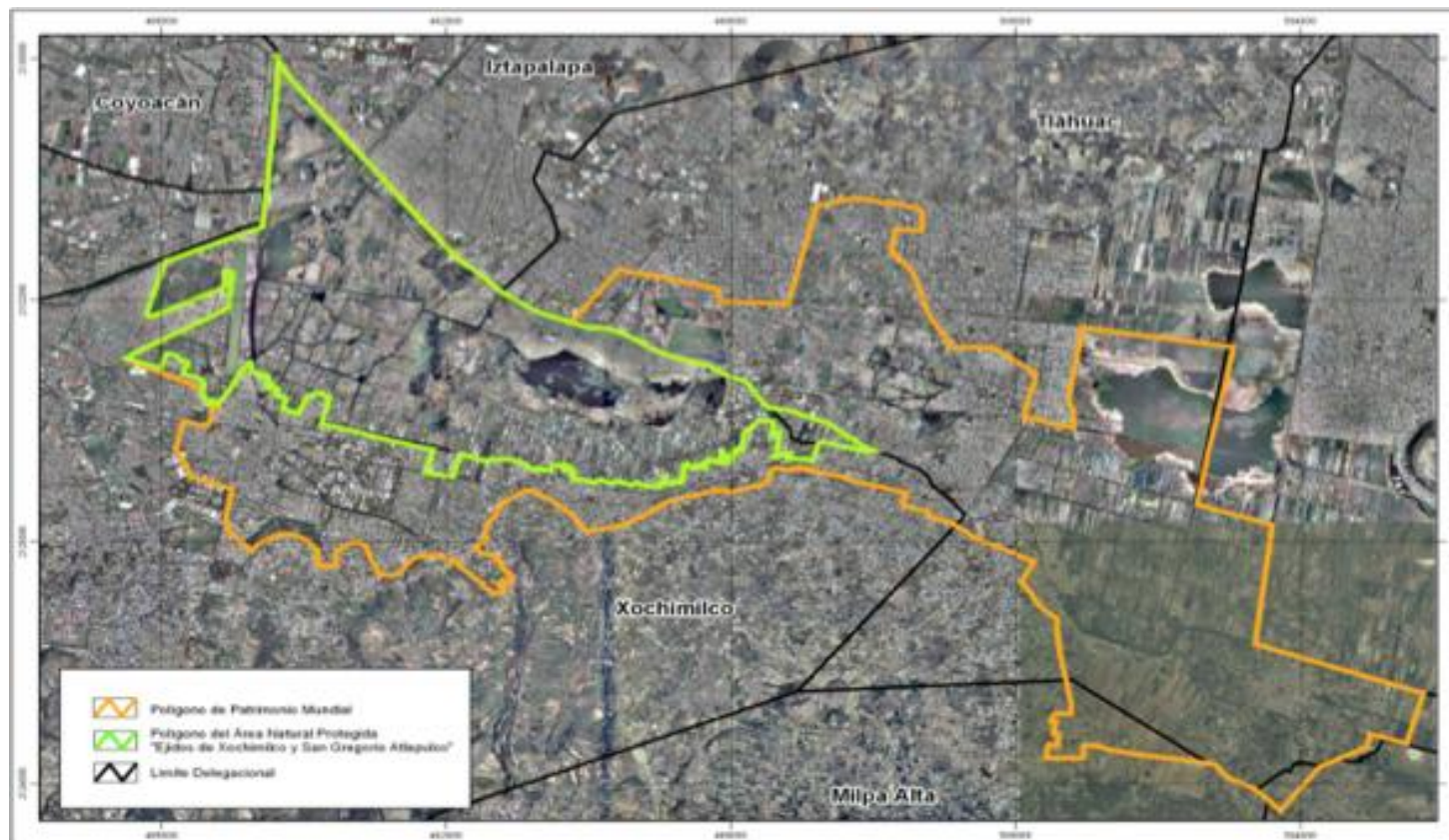


Figura 50. El primer nivel descriptivo comprende la poligonal envolvente de la Zona Patrimonial Mundial Natural y Cultural de la Humanidad en Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta, con el objetivo sensibilizar sobre el uso de la escala espacial apropiada para la gestión gubernamental regional de que se trate, partiendo de la más amplia oficial que abarca otras de menor extensión. En este nivel se incorporan otras poligonales oficiales de importancia, por ejemplo, límites delegacionales, Sitio Ramsar, etc

ANP-EXSGA



	1974	2001
Chinampas	40,23%	28,19%
Agricultura	55,21%	6,57%
Cuerpos de agua	1,46%	19,06%
Asentamientos humanos	0,56%	11,37%

TLAHUAC

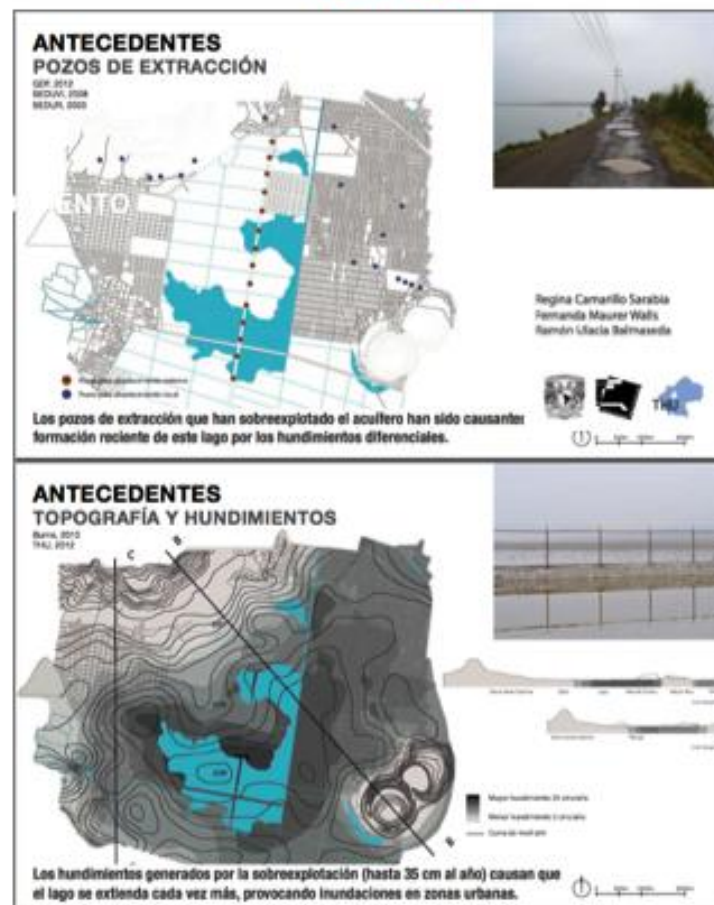


Figura 51. El primer nivel descriptivo incluye información de problemas que conmparten diversas zonas dentro de la región de los exlagos de Xochimilco-Chalco; por ejemplo los problemas derivados del hundimiento regional en el ANP-EXSGA y en la Delegación de Tláhuac.

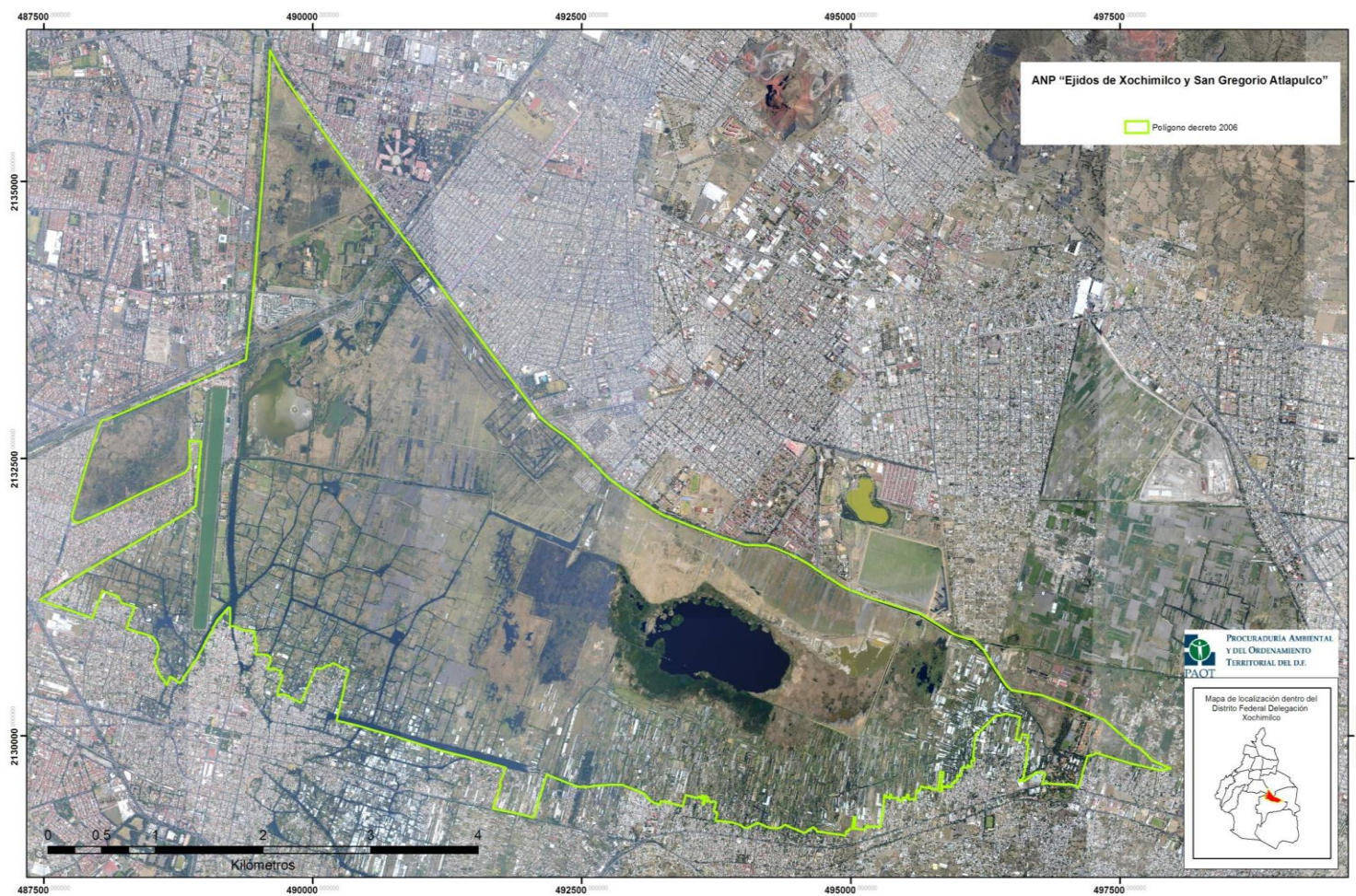


Figura 52. El segundo nivel descriptivo corresponde a la poligonal envolvente oficial del ANP Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco (ANP-EXSGA).

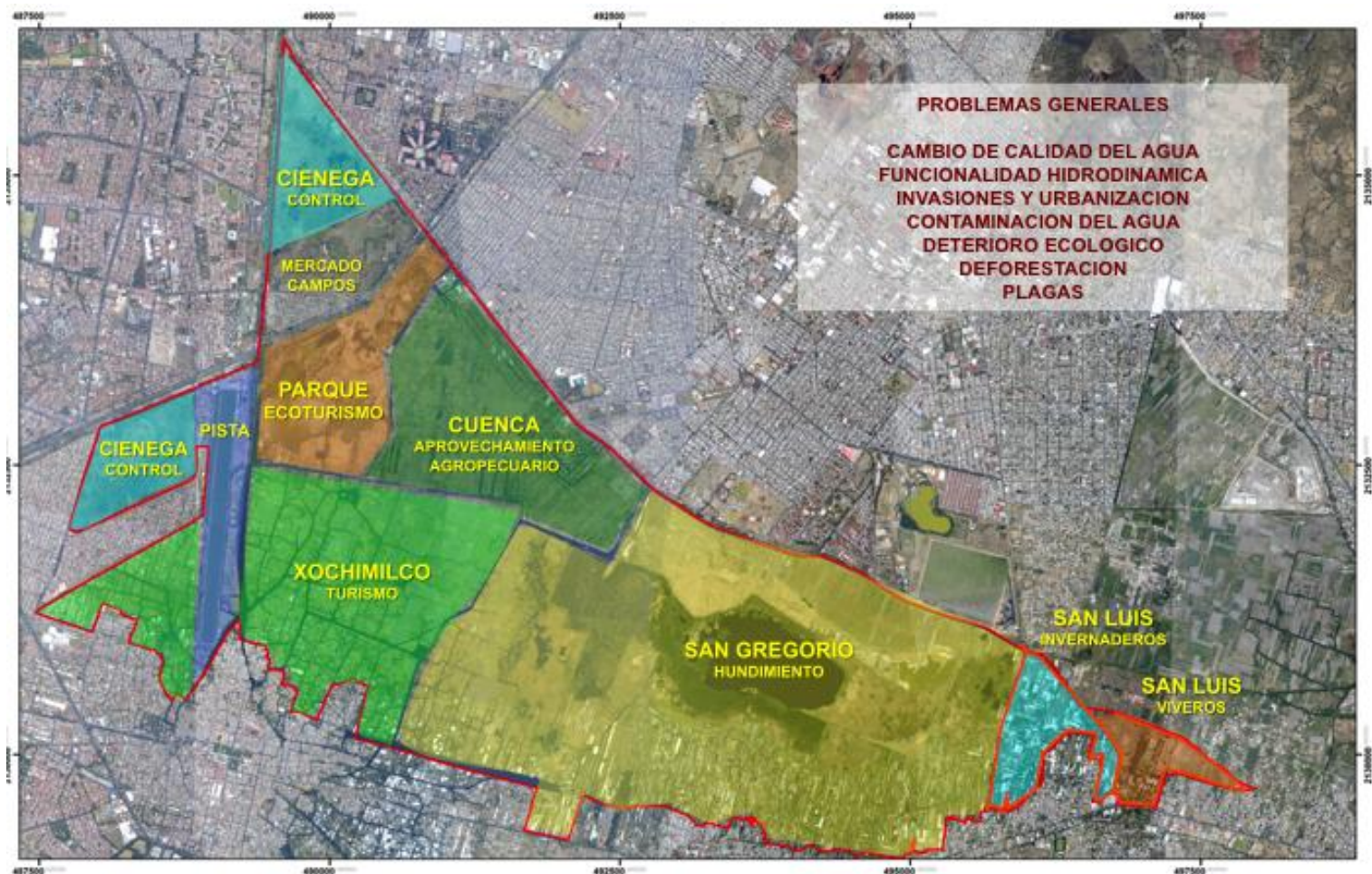


Figura 53. El tercer nivel descriptivo corresponde a las diversas problemáticas identificadas a nivel general del ANP-EXSGA y particulares de las diferentes zonas dentro de la misma; por ejemplo: Ciénegas, Xochimilco, Cuenca Lechera, Invernaderos en San Luis Tlaxiatemalco; etc.

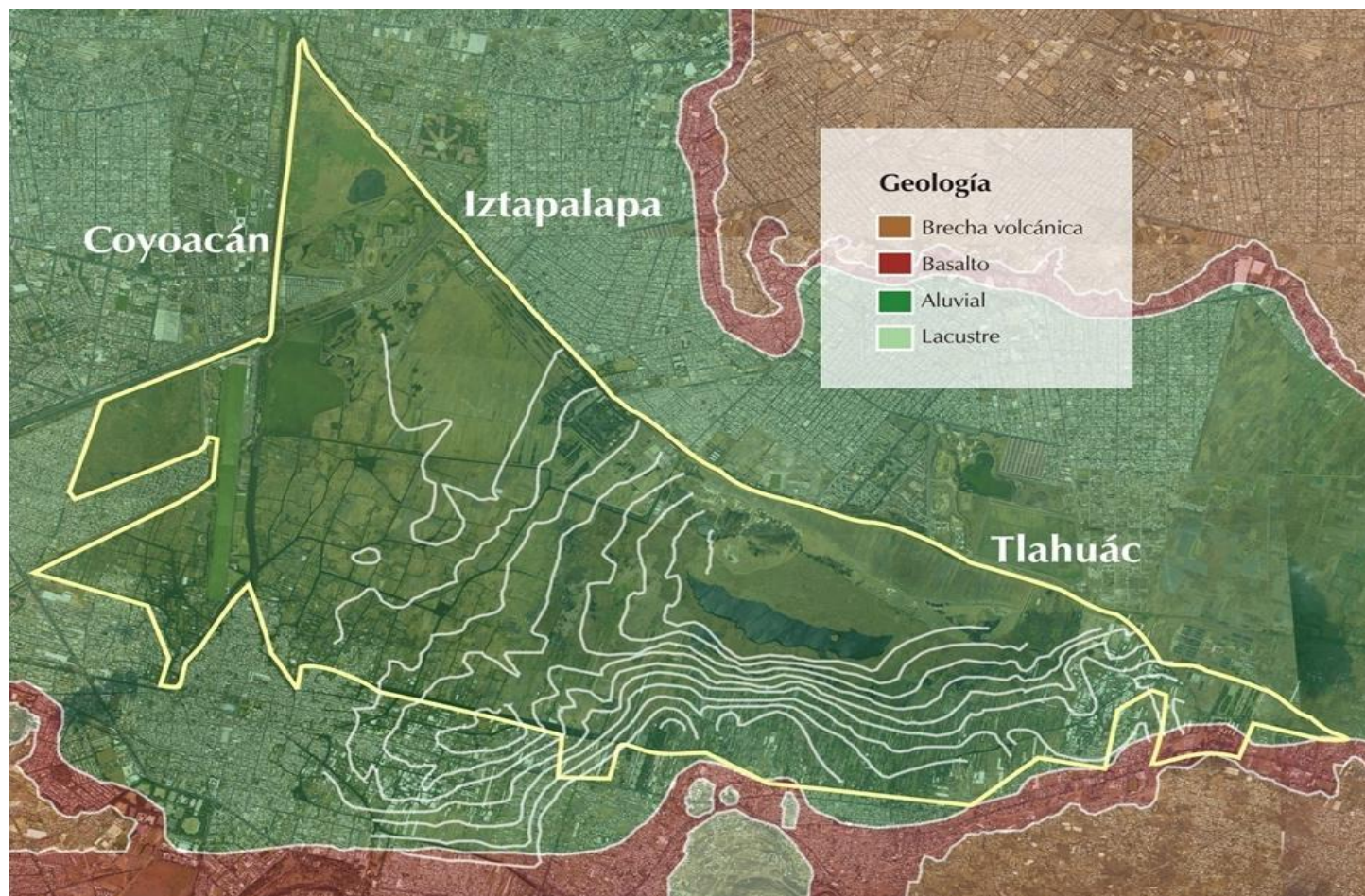


Figura 54. El tercer nivel descriptivo concluye con la identificación de la problemática del hundimiento regional que afecta San Gregorio Atlapulco, refiriendo los antecedentes necesarios, como por ejemplo la azón geológica-edafológica.



Figura 55. Conjuntamente los niveles histórico y descriptivo del SIG Participativo de la PAOT permiten visualizar y analizar los problemas particulares de una zona menor hasta las regiones más amplias que comparten problemas similares o con el mismo origen.

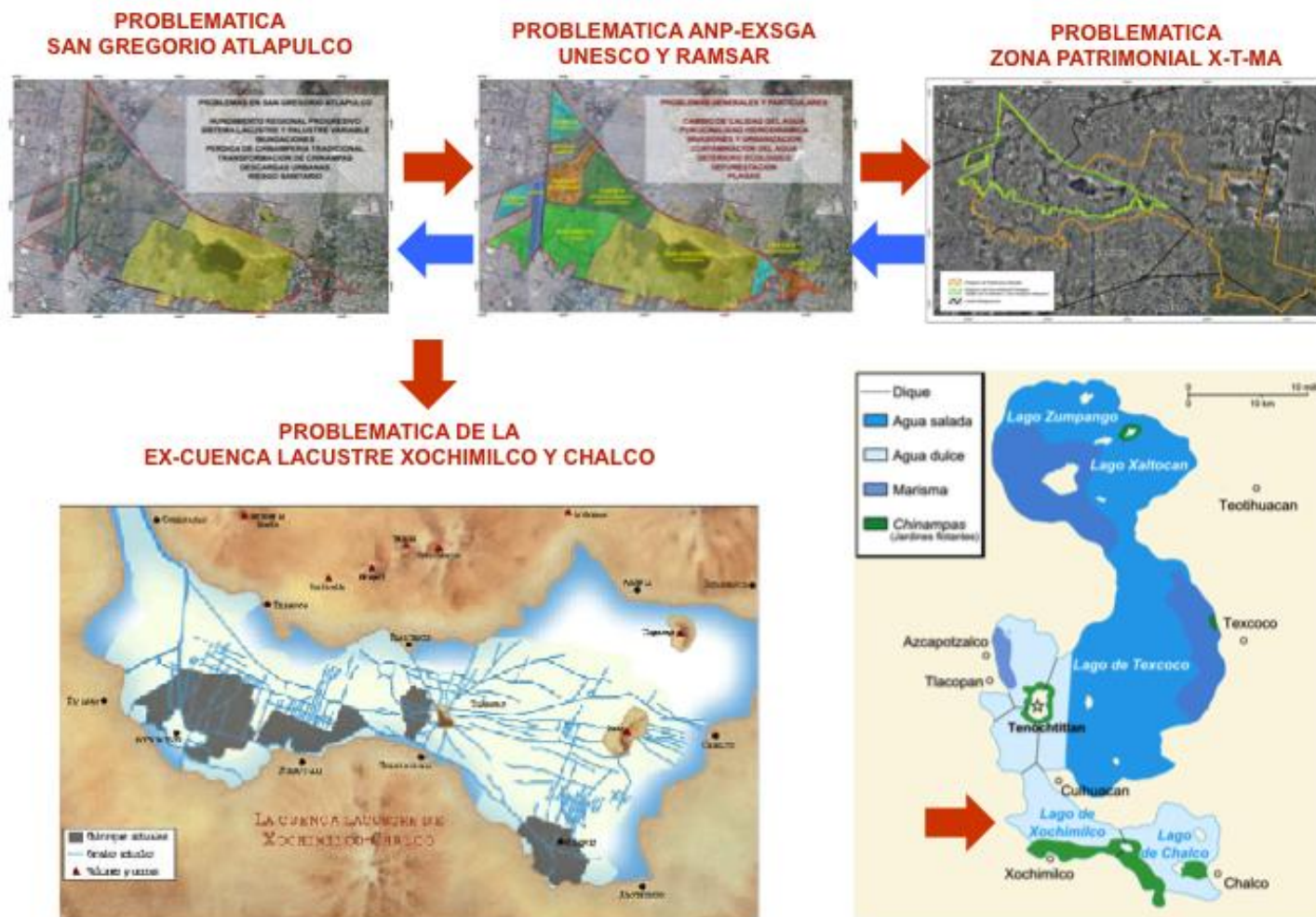


Figura 56. Por su importancia crítica, los niveles histórico y descriptivo del SIG Participativo permiten utilizar la escala espacial más apropiada para cada caso, sin omitir la comprensión del origen prehispánico de la actividad chinampera y su efecto sobre el estado actual del hundimiento en el ANP Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco.

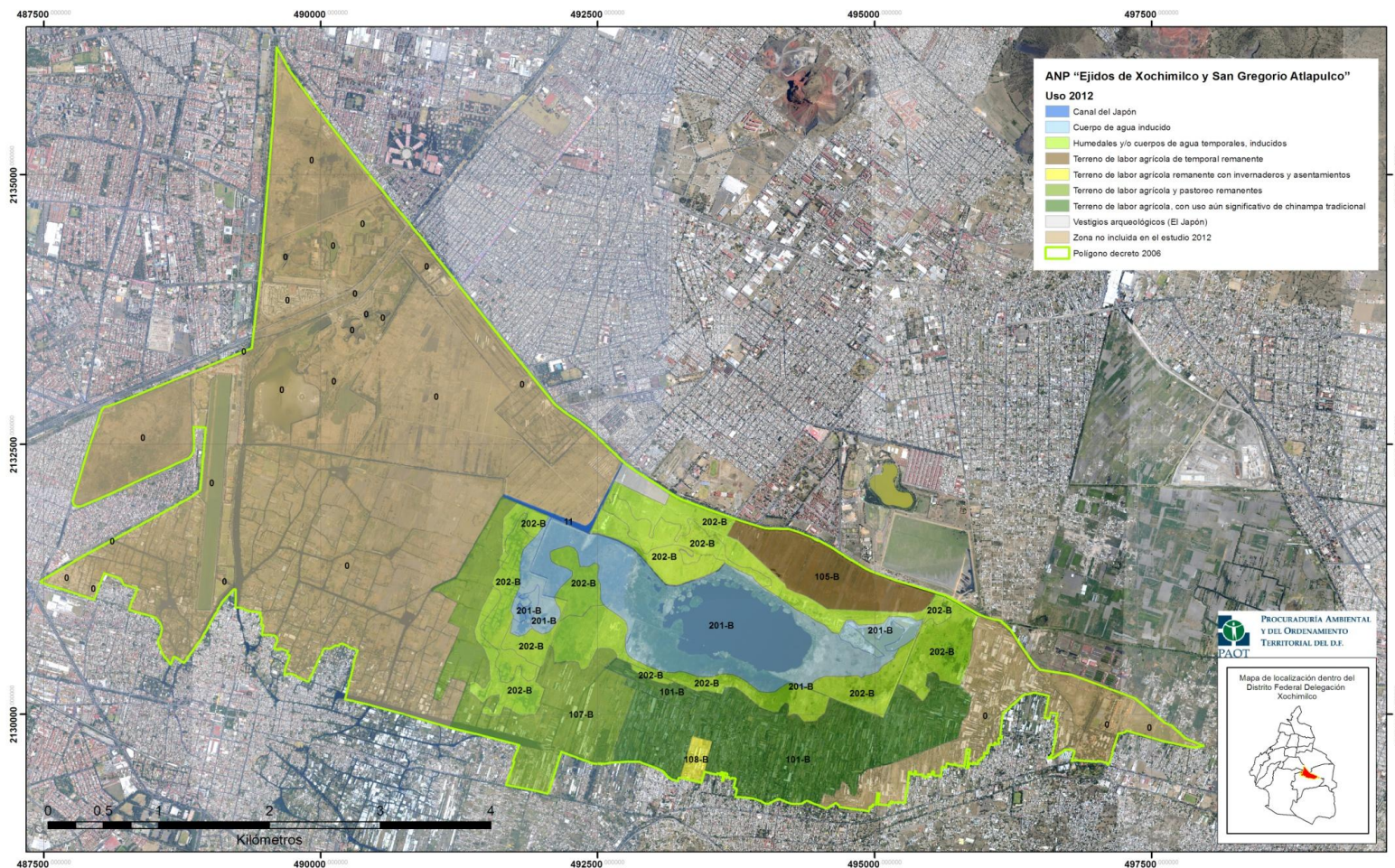


Figura 57. El nivel analítico corresponde a la descripción del ámbito espacial donde se ha centrado el esfuerzo de la PAOT entre 2012 y 2013: este es el de las unidades naturales relacionadas con la problemática del hundimiento regional que afecta San Gregorio Atlapulco, refiriendo los antecedentes necesarios.

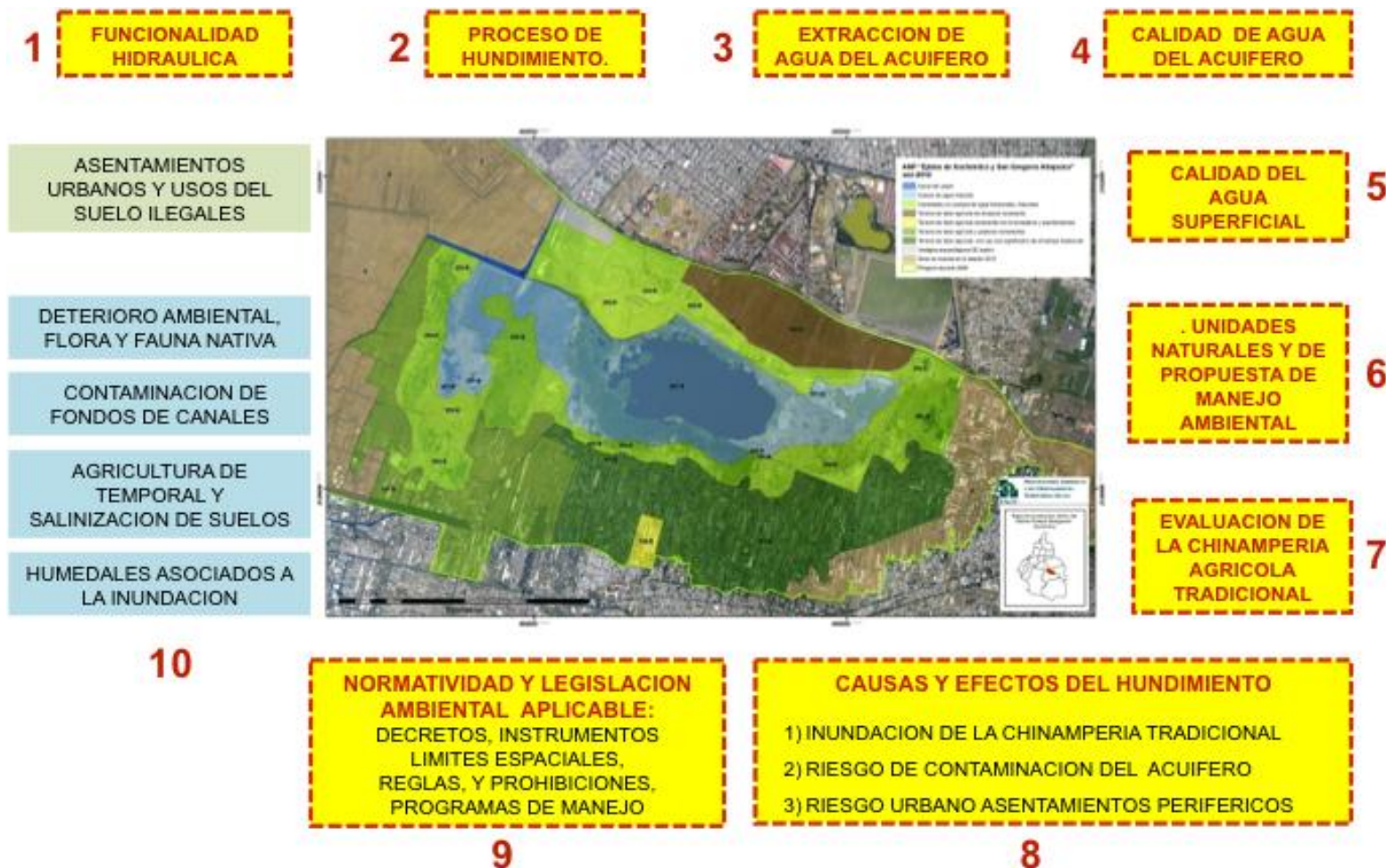


Figura 58. El nivel analítico permite el exámen especializado de los problemas identificados por la PAOT en las unidades naturales relacionadas con el proceso del hundimiento regional que afecta San Gregorio Atlapulco las y desde ahí será posible ingresar mediante permisos de acceso, a los análisis especializados y mapas técnicos en los que se basa la interpretación de cada problema.

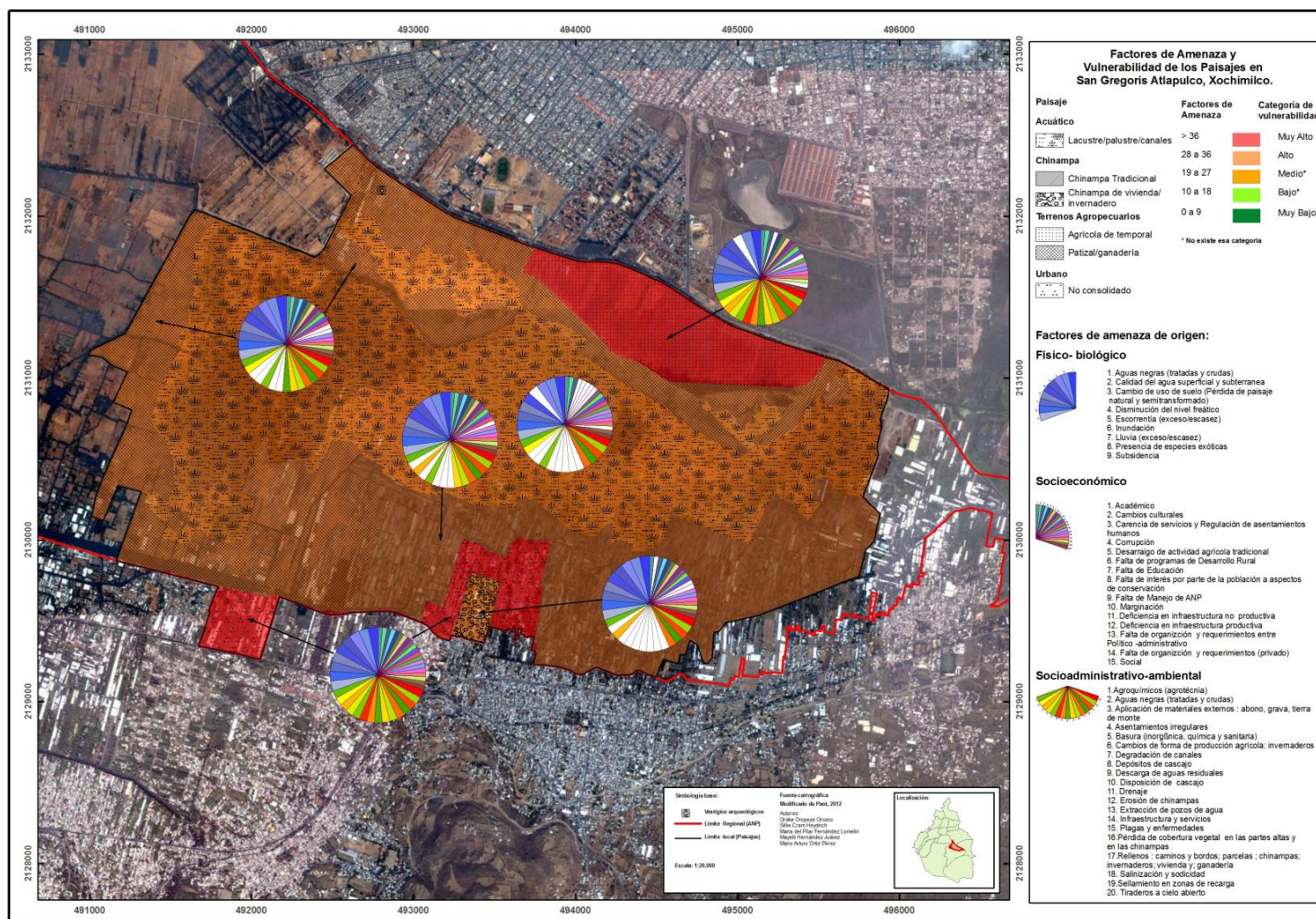


Figura 59. El nivel analítico incluye entre sus elementos la identificación espacial de los factores de amenaza y la vulnerabilidad de los paisajes (caracterización del riesgo) en San Gregorio Atlapulco, generado en este estudio a partir de estudios previos de la PAOT.

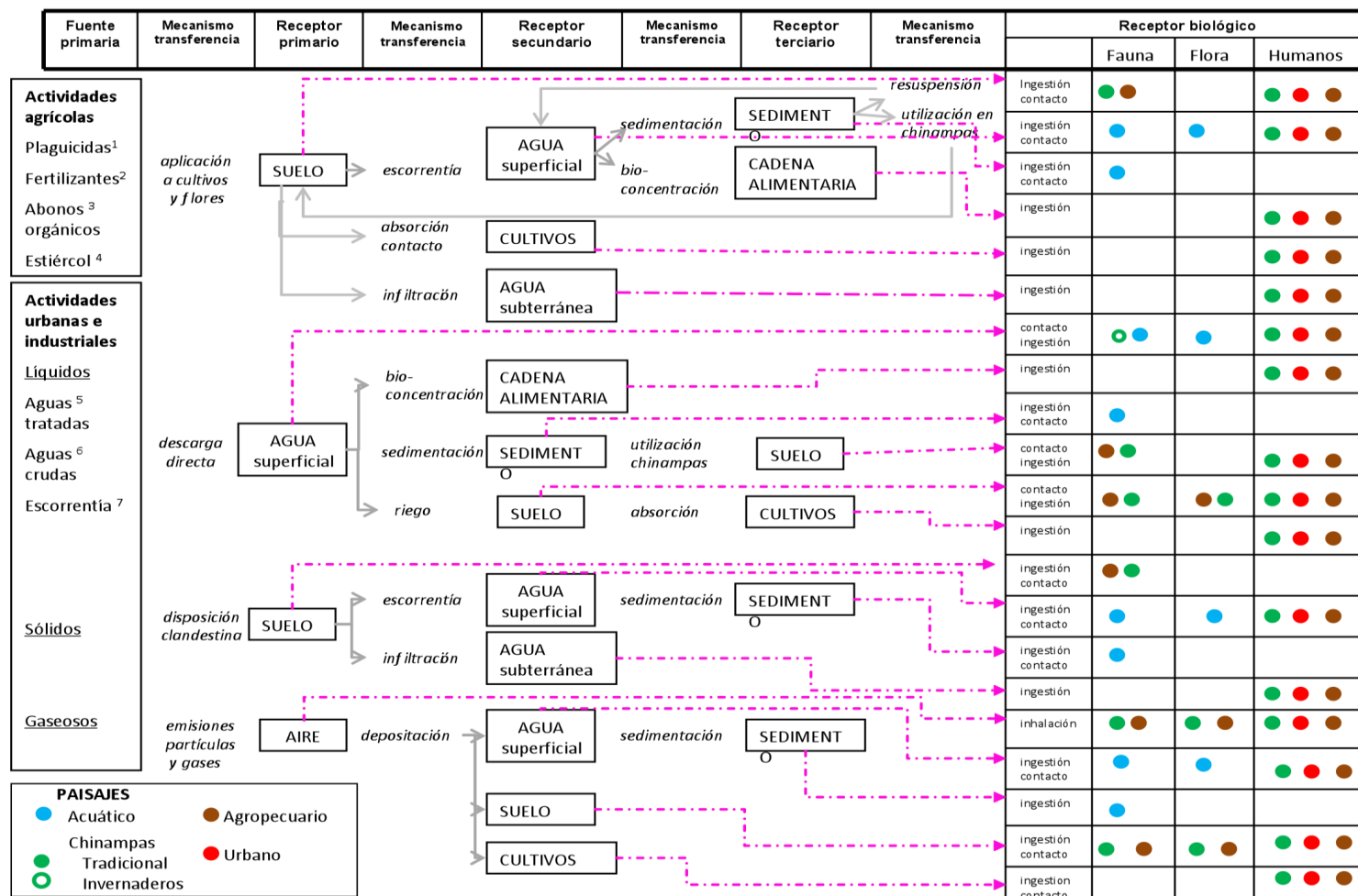


Figura 60. En cada problema se puede profundizar mediante el SIG Participativo en el análisis del material gráfico y/o textual incorporado, en este caso por ejemplo el modelo conceptual de riesgo ambiental por contaminación en San Gregorio Atlapulco, Delegación Xochimilco..

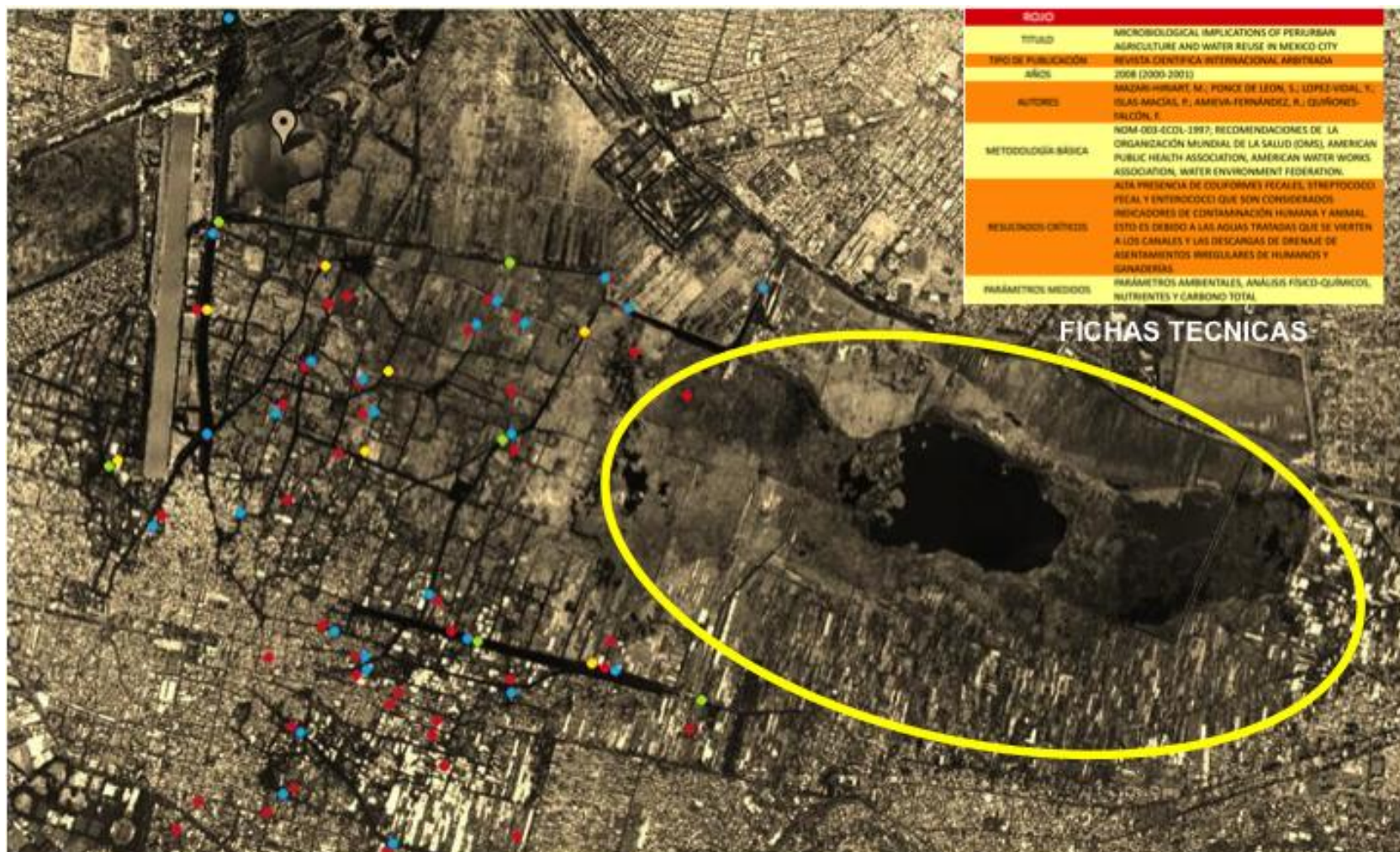


Figura 61. El nivel analítico permite orientar esfuerzos en función de la información disponible, por ejemplo la necesidad de establecer acciones de verificación de calidad del agua para la salud humana, en zonas del ANP-EXSGA carentes de información crítica.

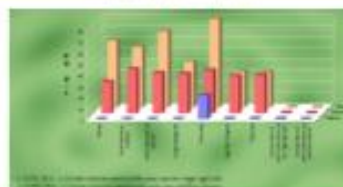


Para la realización de estas integraciones por medio de la PMA, existen algunas que segmentan estas integraciones por municipios o distintos niveles de trabajo (por ejemplo, en servicios sectoriales) pero no se ocupan grandes volúmenes, pero sí todo caso, se necesitan contar con datos de los estados para aplicar las correlaciones. En el momento de los censos, como se verá más adelante, los censos resultaron muy útiles para realizar análisis. La significancia del papel que se utilizó como variable está asociada con la PMA.



INSTRUMENTOS Y LEGISLACION APLICABLE

RÍO	MICROBIOLOGICAL IMPLICATIONS OF PESTICIDE AGROSTRUCTURE AND WATER RESUSE IN MEDICAL CITY
TÍTULO	NEUROSIS EPIDEMIOLOGICAL INVESTIGATION
TIPO DE PUBLICACIÓN	2008 (2000-2002)
ASIS	ALBERTO VARGAS, M. PONCE DE LEÓN, S., GÓMEZ VIGIL, A., LAS NÚÑEZ, P., AMÉVILA PÉREZ, R., GUERRERO-SALCÓN, F.
AUTORES	NOM-001-ECOL-2007, RECOMENDACIONES DE LA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS), AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION.
METODOLOGÍA BÁSICA	ALTA PRESENCIA DE COLIFORMES FECAL, ENTEROCOCOS FECAL Y ENTEROBACTERIAS QUE SON CONDICIONALES INDICADORES DE CONTAMINACIÓN POR HECELES. ESTO ES DEBIDO A LAS AGUAS TRATADAS QUE SE VIERTEN EN LOS CAÑALES Y LAS DESGRACIAS DE SENSIBILIDAD ALIMENTARIA, INFECCIONES DE SENSIBILIDAD ALIMENTARIA, INFECCIONES DE SENSIBILIDAD ALIMENTARIA.
RESULTADOS CRÍTICOS	PARÁMETROS AMBIENTALES, ANÁLISIS PSICO-SOCIAL DE LOS RÍOS Y EL CAMBIO CLIMÁTICO.
PARAMETROS MEDIDOS	



SEGUIMIENTO Y MONITOREO



TOMA DE DECISIONES

Figura 62. El SIG Participativo permite la creación de mapas con metadatos lo cual permite diversos horizontes dinámicos potenciales para el manejo de información y la toma de decisiones, por ejemplo los que se muestran en la figura.

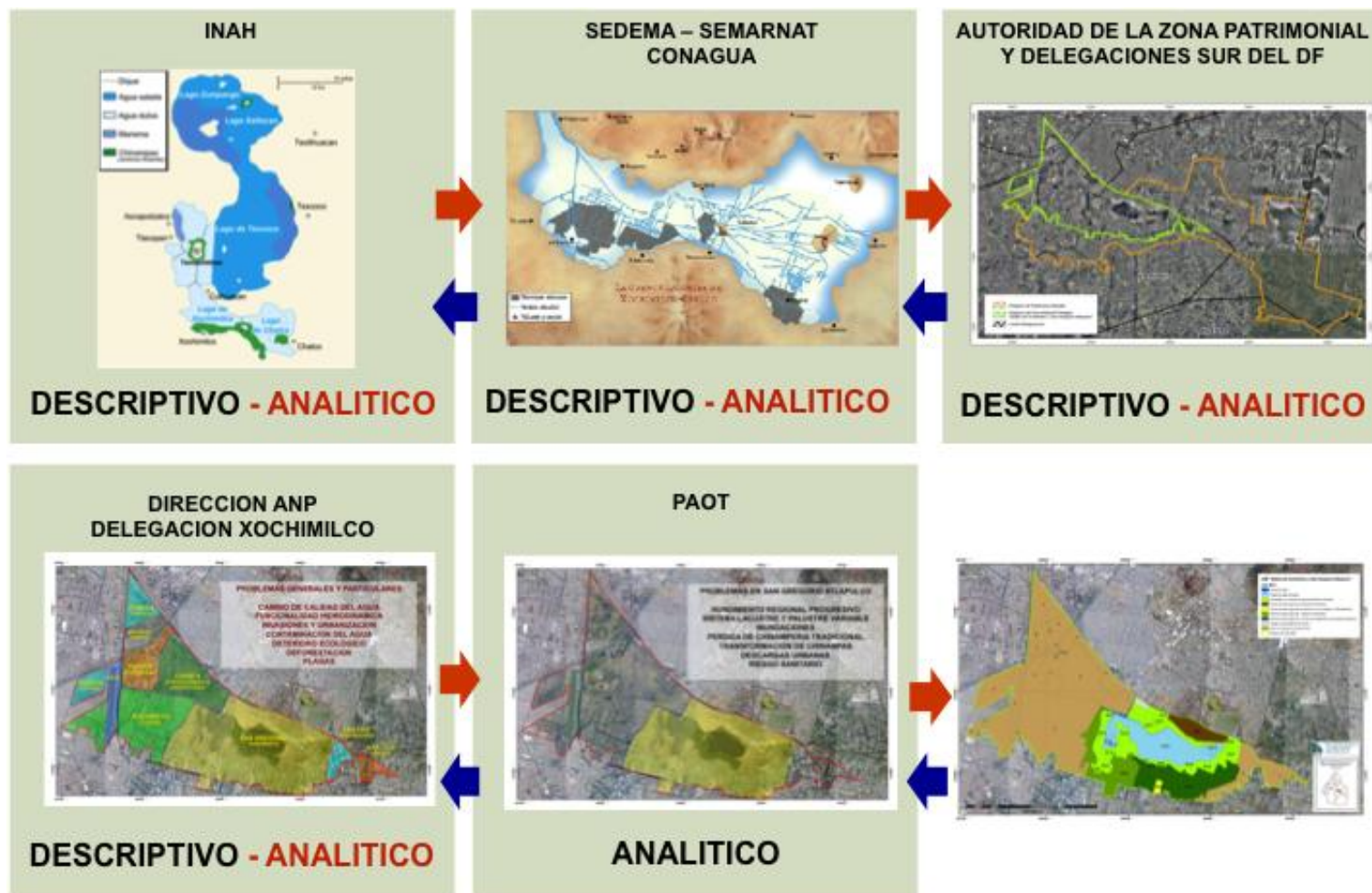


Figura 63. En futuras etapas de desarrollo del SIG Participativo está la posibilidad de conformar un grupo técnico que gradualmente posibilite que los niveles descriptivos alcancen un nivel analítico, en la figura se muestran las instituciones que se considera pueden incorporar la información necesaria para alcanzarlos