

# MÉXICO 2010



**GOBIERNO  
FEDERAL**

**SAGARPA**

**inifap**

Instituto Nacional de Investigaciones  
Forestales, Agrícolas y Pecuarias



## Manejo sustentable de los recursos naturales en el Río Zahuapan, Tlaxcala

Dr. Juan Estrada Ávalos, M. C. Ramón Trucíos Caciano,  
Dr. José Villanueva Díaz, M.C. Miguel Rivera González y  
Dr. Luis Fernando Flores Lui

**CENID-RASPA**

Gómez Palacio, Dgo. Diciembre del 2010  
Libro Técnico 7

Serie: MX-0-250503-20-10-00-06-07

ISBN: 978 - 607 - 425 - 423 - 5

**25 Aniversario**  
Ciencia y Tecnología  
para el Campo Mexicano



**Vivir Mejor**

## **DIRECTORIO INSTITUCIONAL**

### **SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN**

Lic. Francisco Javier Mayorga Castañeda  
Secretario

MC. Mariano Ruíz-Funes Macedo  
Subsecretario de Agricultura

Ing. Ignacio Rivera Rodríguez  
Subsecretario de Desarrollo Rural

Dr. Pedro Adalberto González Hernández  
Subsecretario de Fomento a los Agronegocios

### **INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS**

Dr. Pedro Brajcich Gallegos  
Director General

Dr. Salvador Fernández Rivera  
Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación

M.C. Arturo Cruz Vázquez  
Encargado del Despacho de la Coordinación de Planeación y Desarrollo

Lic. Marcial A. García Morteo  
Coordinador de Administración y Sistemas

Lic. Ricardo Noverón Chávez  
Director General Adjunto de la Unidad Jurídica

### **CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA**

Dr. José Antonio Cueto Wong  
Director

# **Manejo sustentable de los recursos naturales en el Río Zahuapan, Tlaxcala**

**Editores:**

Dr. Juan Estrada Ávalos  
M. C. Ramón Trucíos Caciono  
Dr. José Villanueva Díaz  
M.C. Miguel Rivera González  
Dr. Luis Fernando Flores Lui



**CENID - RASPA**

**2010**

**Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,  
Agrícolas y Pecuarias**

Progreso N°. 5, Barrio de Santa Catarina  
Delegación Coyoacán, C. P. 04010 México D. F.  
Teléfono (55) 3871-8700

ISBN: 978 - 607 - 425 - 423 - 5

Primera Edición 2010

Derechos Reservados ©

No está permitida la reproducción total o parcial de esta publicación, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de la Institución.

## PRESENTACIÓN

A nivel internacional, el tema de la conservación de los recursos naturales y medio ambiente se abordó por primera vez en la Cumbre de Estocolmo organizada por la ONU en 1972. Veinte años después, en la Cumbre de Río, la propia comunidad internacional establecería los postulados del desarrollo sostenible que considera, de manera general, tres principios fundamentales:

1. La interacción entre desarrollo y medio ambiente.
2. Establece el desarrollo como un proceso humano donde las personas son el eje central del mismo con derecho a una vida digna y productiva y en armonía con la naturaleza.
3. Determina que todas las naciones tienen responsabilidades colectivas y diferenciadas para preservar la vida sobre el planeta.

Posteriormente, en la Cumbre de Johannesburgo en 2002, se reafirmaron los principios de la Cumbre de Río y se estableció la visión de un reparto más equitativo de las responsabilidades de la economía, sociedad y desarrollo en relación con el medio ambiente. México es ajeno a estas iniciativas internacionales, por el contrario, ha participado de manera activa en cada una de estas Cumbres con aportaciones y compromisos específicos. En este sentido, se puede decir que los avances principales que se han logrado en México se relacionan con dos aspectos importantes: i) mayor conciencia de los diferentes sectores sobre los problemas ambientales que actualmente enfrentamos como sociedad y, ii) cada vez una mayor responsabilidad y participación de dichos sectores, con acciones e iniciativas concretas, para enfrentar los retos ambientales. Prueba de ello son los resultados que se presentan en este volumen, producto del proyecto titulado *Manejo Integral de los Recursos Naturales en la Cuenca del Río Zahuapan, en el Estado de Tlaxcala*, y los cuales fueron posibles gracias al interés decidido que mantiene el Gobierno del Estado de Tlaxcala en materia de conservación de los recursos naturales y medio ambiente, y a la colaboración de la iniciativa privada a través del Grupo Coca-Cola FEMSA y su planta embotelladora de Apizaco como parte de su política de responsabilidad social.

La finalidad de estas aportaciones es coadyuvar las acciones y políticas que se desarrollan dentro del Estado de Tlaxcala, en materia de conservación, específicamente en la cuenca del río Zahuapan donde convergen las principales actividades socioeconómicas de la Entidad. De esta forma, se aporta conocimiento en las áreas de la hidrología superficial y subterránea, en el estado que guarda la vegetación y el recurso suelo, en la socioeconomía del agua y su eficiencia

de transformación, y en la reconstrucción y variabilidad del clima de la región; apoyándose para ello en una base robusta de información espacial del área que sirve de referencia en la jerarquización de estas acciones. Se desarrolló cada área de trabajo por personal especializado, conformando un grupo de trabajo multidisciplinario del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Ph. D. José Antonio Cueto Wong  
Director del CENID RASPA INIFAP

## PRÓLOGO

El presente libro comprende los resultados producto del estudio realizado en la cuenca del río Zahuapan en el estado de Tlaxcala, que tienen como propósitos mostrar y proponer una metodología aplicada para desarrollar un diagnóstico de aprovechamiento sustentable para los recursos agua, suelo y vegetación, y presentar un procedimiento que permita establecer las actividades propuestas para el manejo de recursos.

Como herramienta soporte se conformó un sistema de información geográfica del área de estudio, mismo que contiene capas temáticas de tipo de suelo y rocas, vegetación y uso de suelo, topografía, delimitación de acuíferos y cuencas del áreas de estudio, entre otras. Complementando este análisis a través de estudios con enfoque social y económico de los municipios que conforman el área de la cuenca.

Al mismo tiempo se aplicaron técnicas como la dendrocronología para el análisis de precipitación, a través de la cual se puede establecer la relación que existe en el área de estudio con patrones circulatorios como el El Niño Oscilación del Sur y El Monzón Mexicano, y la datación de agua a través de isotopos estables, para determinar la edad del agua en el acuífero como un indicador de las zonas de recarga del acuífero Alto Atoyac, principal fuente de agua que abastece las áreas urbanas ubicadas dentro de la cuenca del río Zahuapan.

De igual forma, se aplicaron herramientas como sensoría remota para establecer y ubicar las áreas con diferente grado de erosión en la parte alta de la cuenca, en la Sierra de Tlaxco, con el apoyo del sistema de información geográfica, clasificando el grado de erosión en leve, media y severa para el área estudiada.

En recursos forestales, se realizó una caracterización dasométrica para conocer la condición del árbolado referida a especies presentes, su altura, densidad de población y otras características que permiten conocer el estado que guardan, siendo lo anterior relevante si la finalidad es proponer esquemas de manejo para un adecuado aprovechamiento del recurso.

La falta de elementos de decisión o el desconocimiento de la condición en la que se encuentran los recursos naturales, es un estado de incertidumbre para los tomadores de decisión, por tal motivo, se limitan programas o recursos para la implementación de acciones que generen bienestar en un entorno de manejo sustentable. Lo anterior, resalta la importancia de realizar un análisis que proponga un conjunto de acciones para determinar y jerarquizar, en forma consensuada, el curso que se debe dar a las mismas, en función del beneficio colectivo y a través de un enfoque multidisciplinario como el llevado a cabo en el presente estudio.

Finalmente, en este documento se realizan una serie de análisis de las variables que integran la cuenca, los cuales pueden ser la base de estudios posteriores sobre el manejo integrado de los recursos naturales en otras regiones de México. Esto como parte de los métodos de diagnóstico utilizados así como las experiencias vertidas en cada uno de los capítulos que conforman el presente libro.

Dr. Luis Fernando Flores Lui  
INVESTIGADOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ROQUE CELAYA, GTO.

## AGRADECIMIENTOS



Gobierno del Estado de Tlaxcala



**Agradecemos el financiamiento otorgado por el gobierno del estado de Tlaxcala a través de la Secretaría de Desarrollo Económico para la realización de los trabajos de investigación cuyos resultados son publicados en el presente libro.**

**De igual forma, reconocemos el compromiso de Coca-Cola FEMSA México por generar valor social y económico en todas las comunidades donde opera, participando con el financiamiento de la investigación reflejada en estas páginas. La suma de los actores involucrados ha beneficiado el enriquecimiento de la obra.**



# CONTENIDO

---

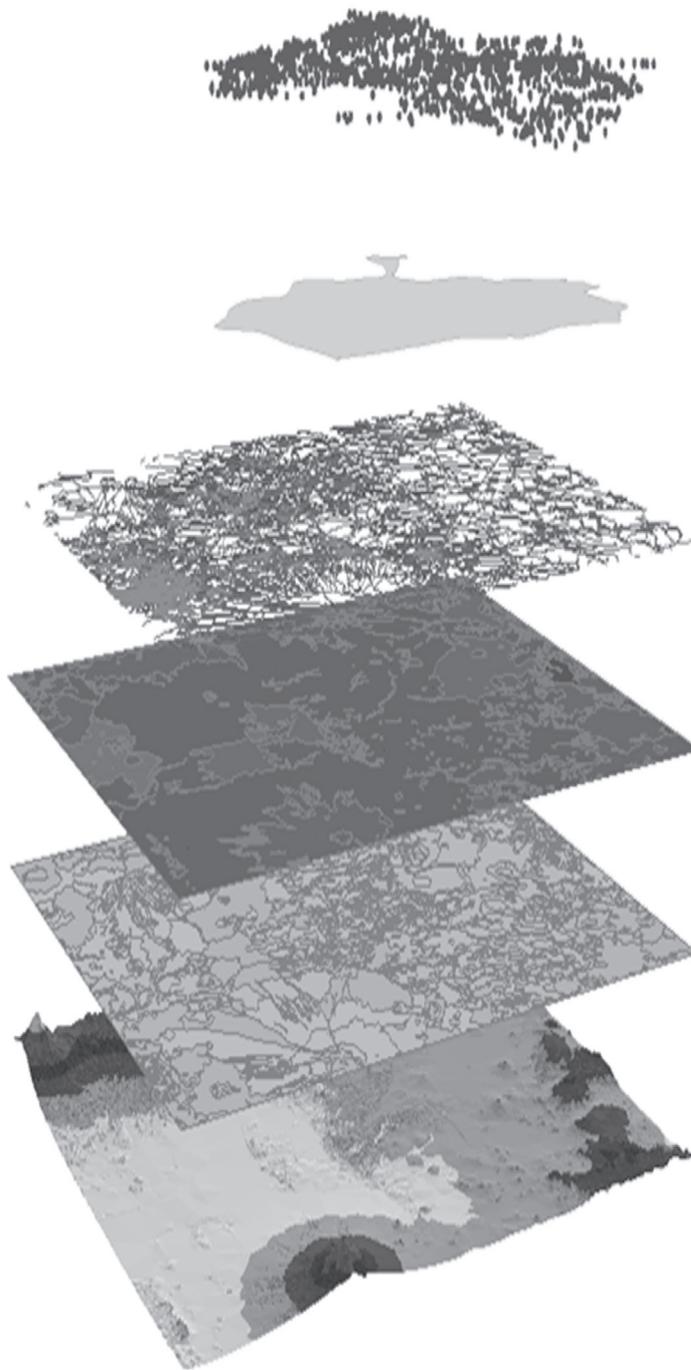
PRESENTACIÓN

PRÓLOGO

AGRADECIMIENTOS

I	Sistema de Información Geográfica de la cuenca del río Zahuapan ..	1
II	Situación socioeconómica y eficiencia económica del agua en la cuenca del río Zahuapan, Tlaxcala .....	33
III	Análisis de la variabilidad hidroclimática en el estado de Tlaxcala, México .....	61
IV	Fuentes y datación de agua subterránea del estado de Tlaxcala.....	85
V	Erosión del suelo en la cuenca del río Zahuapan, Tlaxcala .....	115
VI	Estructura y composición de la vegetación en la cuenca alta del río Zahuapan, Tlaxcala.....	143
	SÍNTESIS .....	185
	GLOSARIO.....	199





Ramón Trucíos Caciano

Juan Estrada Ávalos

Miguel Rivera González

Vidal Guerra de la Cruz

Ignacio Orona Castillo

## **CAPÍTULO I**

### **SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE LA CUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN**



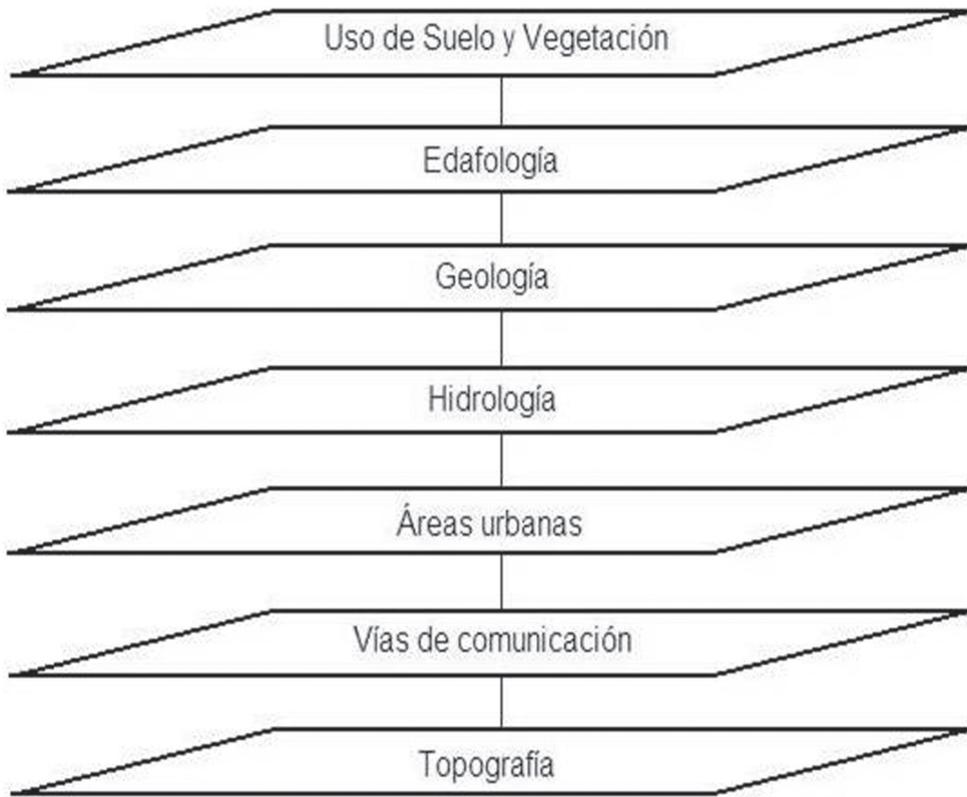
## INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son un conjunto de procedimientos desarrollados sobre una base de datos o atributos que describen objetos, tales como nombre, superficie, habitantes, calidad, etc., del mundo real que tienen una representación gráfica, a través de puntos, líneas o polígonos y son susceptibles a medición en forma y dimensión relativa a la superficie de la tierra. Además de los atributos, los SIG cuentan también con una base de datos gráfica que incluye información georeferenciada o de tipo espacial y que tiene una estrecha relación con la base de datos descriptiva (Heywood *et al.*, 2006).

Para la conformación y desarrollo de un SIG se utilizan herramientas de gran capacidad de procesamiento gráfico y alfanumérico, que en base a procedimientos y aplicaciones capturen, almacenen, analicen, visualicen y editen información espacialmente referenciada (Moreno *et al.*, 2008). Dado lo anterior, el análisis de información de un SIG permite dimensionar, jerarquizar y resolver problemas complejos de planificación y gestión para el aprovechamiento integral de los recursos naturales (Alonso, 2004; Dueker y Kjerne, 1989), desarrollar modelos de la realidad referidos a un sistema de coordenadas terrestre (Theobald, 2000) o un sistema de cómputo capaz de mostrar y editar lugares en la superficie de la Tierra (ESRI, 1995).

Los SIG comenzaron a utilizarse como herramienta de mapeo y análisis en geografía en la década de los 60s en Canadá, en los últimos 20 años se ha impulsado su uso y se han aplicado a diversas ramas de la ciencia (Clarke *et al.*, 1996, Richards *et al.*, 1999). En los 90s, los SIG se convierten en un campo de estudio multidisciplinario que contribuye a la planificación del desarrollo y ordenamiento territorial con base en estudios geológicos, geohidrológicos, de uso del suelo y condiciones climáticas, entre otros (Clarke *et al.*, 1996).

Los SIG enfocados al aprovechamiento sustentable de los recursos naturales deben integrar capas temáticas de información en el área de estudio que describan actividades en puntos administrativos, unidades de manejo ambiental, consulta de la base de datos y desarrollo de modelos dinámicos, como los dirigidos a explicar el cambio de uso de suelo, entre otros (Thiruvengadachari, 2004; Goodchild, 1993; Gómez y Barredo, 2005). Las capas temáticas consideradas en este estudio integran la información espacial relevante para la gestión de los recursos naturales en la Cuenca del Río Zahuapan en el estado de Tlaxcala (Figura 1.1).



**Figura 1.1. Ejemplo de capas temáticas utilizadas para la construcción del SIG en la Cuenca del Río Zahuapan.**

El formato vector (*shape*) posibilita tres tipos de objetos gráficos: puntos, que representan un par de coordenadas (x,y); líneas, que constituyen un segmento limitado por dos pares de coordenadas y áreas o polígonos, constituidos por la unión de segmentos de líneas. Los archivos en formato vector se obtienen de la digitalización de capas temáticas a partir de una imagen. El formato raster representa imágenes gráficas como una matriz de celdas que contienen información de un atributo. Los archivos raster se pueden obtener de mapas escaneados, de fotografías aéreas y de imágenes de satélite (Molina, 2001).

El SIG para la Cuenca del Río Zahuapan se construyó con el objetivo de contar con información válida, interactiva y de fácil acceso sobre el agua, suelo y vegetación en apoyo a las instituciones

y productores agropecuarios y del ramo forestal que participan en el manejo integral de estos recursos naturales.

## METODOLOGÍA

La confirmación y desarrollo de un SIG consta de tres etapas fundamentales:

- Gestión de la información: búsqueda y obtención de información de acuerdo a diferentes criterios temáticos y espaciales.
- Análisis de la información: procesamiento de la base de datos inicial para generar información adicional.
- Salida: muestra los resultados de las operaciones analíticas en forma de gráficos, tablas y mapas.

Para generar el SIG de la Cuenca del Río Zahuapan, se recopilaron, evaluaron, generaron, procesaron y almacenaron una cantidad considerable de información cartográfica; siendo necesaria la elaboración de un procedimiento para organizar y documentar la información que permita consultar de manera rápida y confiable las características de los datos contenidos en la cartografía digital del SIG a lo cual se le denominó *metadato*.

Los metadatos son procedimientos altamente estructurados que describen el contenido, calidad, condición y otras características de la información. Es información sobre información o datos sobre datos que permiten (INEGI, 2010):

- Organizar y mantener el acervo de datos de una organización.
- Proporcionar información para catálogos de datos y centros de distribución de metadatos.
- Proveer información necesaria para interpretar y procesar datos transferidos por otra organización.

El contenido de los metadatos se determina por los usuarios que comparten la información de capas temáticas considerando que éstas deben tener un significado preciso de cada elemento (IIRBAH, 2010). El contenido de los metadatos geoespaciales puede ser:

- a) Identificación: título, área incluida, temas, actualidad, restricciones, etc.
- b) Calidad de los datos: precisión, a qué nivel están completos, linaje, etc.

- c) Organización de los datos espaciales: vector, raster, punto.
- d) Referencia espacial: proyección, dátum, sistemas de coordenadas, etc.
- e) Distribución: distribuidor, formatos, medios, estatus, precio, etc.
- f) Referencia: nivel de actualización, institución o persona responsable, etc.

## **Generación de mapas**

La conformación del SIG tuvo los siguientes procedimientos en su desarrollo: 1) Recopilación de información previamente generada, 2) Conversión digital de mapas, 3) Generación de mapas temáticos y 4) Adición de metadatos a las capas generadas. La proyección utilizada para este estudio fue Universal Transversal de Mercator (UTM) con datum WGS84, seleccionada por ser una proyección predeterminada en los programas utilizados ArcView®, ArcGIS® y AutoCAD®. En la construcción de la base de datos del SIG se llevó a cabo en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias en Gómez Palacio, Durango.

## **Recopilación de información**

Se localizaron y clasificaron los estudios con suficiente sustento técnico y científico para ser considerados en este estudio. Se verificó la proyección con la cual se generó la información y en los casos en que no fue la misma que se utilizó en este estudio se reproyectó en el programa ArcGIS® 9.2.

## **Conversión digital de mapas**

La información en mapas impresos fue de formato físico (imagen en papel) a formato digital (imagen digital) con una definición de 400 – 600 puntos, escaneando la información en formato *tiff*. Una vez teniendo las imágenes digitales, se localizaron 16 puntos de control en cada una para georeferenciar la imagen con base en las coordenadas UTM. Con la georeferenciación realizada en el mapa, carta o imagen se digitalizaron los puntos, líneas o polígonos a través del programa ArcGIS® 9.2 con el uso de la herramienta *Editor* con la que se agregaron los atributos necesarios para cada tema digitalizado (Glennon *et al.*, 2004).

## **Generación de mapas temáticos**

Parte de la información recopilada fue generada en bases de datos referidos a coordenadas debido a que se obtuvieron de estudios de campo o investigaciones puntuales. Con esta información se generaron archivos de mapas electrónicos por medio del programa ArcGIS® 9.2 una vez definida la proyección en la cual fueron tomadas las coordenadas de cada punto (Harlow

y Vienneau, 2003; Jones y McCoy, 2001). Se considera importante señalar la precisión de los puntos, ya que con frecuencia se obtienen con navegadores GPS (*Global Positioning System*) con precisión de 3-5 m. Por lo anterior, la información se consideró con esta observación.

### **Adición de metadatos a las capas generadas**

Los mapas, capas o imágenes digitales deben contar con información de origen y las modificaciones que se hayan hecho, debido a que éstos pueden ser distintos al original o incluso haber sido modificados un sin número de veces y por tal motivo es necesario contar con metadatos que contengan: Fuente de información, fechas, ubicación espacial, origen e información de contacto (Harlow y Vienneau, 2003).

## **RESULTADOS**

### **Sistema de información geográfica para el área de estudio**

La información generada en este estudio se despliega en formato de imagen para el caso de fotografías e imagen de satélite, y *shape* para la información temática, ambos generados a través del SIG Arc GIS® 9.2. La descripción del producto incluye la fuente de la información y escala de trabajo, cabe destacar que esta información y su metodología de obtención es respaldada por su metadato.

### **Base de datos Raster e imágenes**

#### **Ortofotos digitales**

Se usaron ortofotos digitales del INEGI generadas a partir de fotografías aéreas con escala de 1:40,000 a 1:75,000, en su proceso se auxiliaron de puntos de control geodésico para su georeferenciación y el Modelo Digital de Elevación para su correspondiente ortorectificación, en este producto se eliminan los errores de desplazamiento debidos a inclinación y relieve utilizando instrumentos analíticos y/o digitales (INEGI, 2000a). Las ortofotos utilizadas en el área de estudio están proyectadas originalmente con datum ITRF92, tienen tamaño de pixel de 1.5 m y son las siguientes:

Carta: E14B22; sextos: a, b, d, e, y f.

Carta: E14B23; sextos: a, b, c, d, e, y f.

Carta: E14B32; sextos: a, b, c, e, y f.

Carta: E14B33; sextos: a, b, c y d.

Posteriormente, se integró el mosaico de imágenes que cubre el área de estudio. La función del mosaico es desplegar la información de todas las ortofotos en una sola imagen (Figura 1.2).

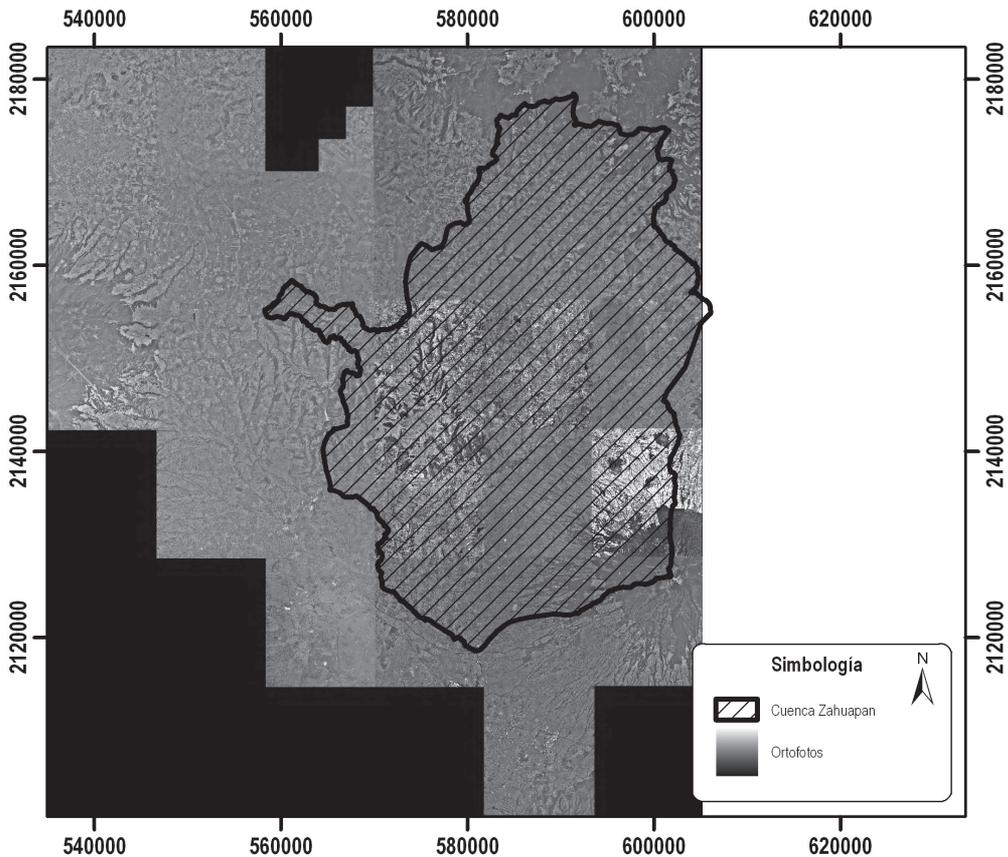


Figura 1.2. Mapa del mosaico de ortofotos, cuenca del río Zahuapan, Tlaxcala.

### Imagen de satélite

Se integraron imágenes del satélite SPOT con resolución de *píxel* de 10 x 10 m las cuales fueron utilizadas como base para determinar el estado que guardan los recursos suelo y vegetación en el área de estudio, (Figura 1.3). Estas imágenes fueron obtenidas mediante el convenio establecido entre SEMAR-SAGARPA-ASERCA en 2003 para la estación ERMEXS.

Imagen: xs589-311-03; *pixel size*: 10.0 E 10.0 N; *Datum ellipsoid*: WGS 84 (GPS); *date*: 13:56, Jan 21 2004.

Imagen: xs590-311-03; *pixel size*: 10.0 E 10.0 N; *Datum ellipsoid*: WGS 84 (GPS); *date*: 08:40, Nov 28 2003.

Imagen: xs590-312-03; *pixel size*: 10.0 E 10.0 N; *Datum ellipsoid*: WGS 84 (GPS); *date*: 09:42, Nov 28 2003.

Imagen: xs591-311-03; *pixel size*: 10.0 E 10.0 N; *Datum ellipsoid*: WGS 84 (GPS); *date*: 13:18, Jan 22 2004.

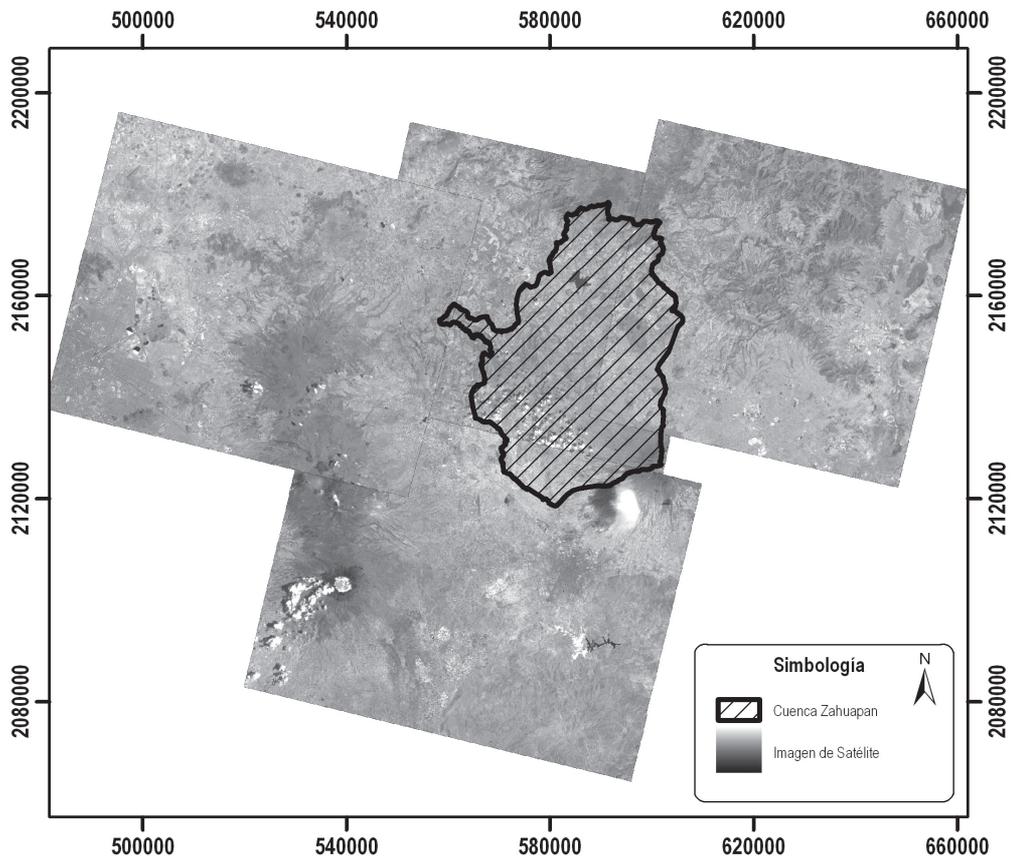


Figura 1.3. Mapa del mosaico de imágenes de satélite, cuenca del río Zahuapan, Tlaxcala.

### Fotos multiespectrales

En diciembre de 2008 se realizó un cubrimiento fotográfico aéreo en la parte norte de la cuenca del río Zahuapan, sobre la sierra de Tlaxco. Se utilizó una cámara con sensor multiespectral.

Posteriormente, se elaboró el mosaico de imágenes que permitió determinar el estado actual de los recursos naturales en el área de estudio que comparadas con las fotografías e imágenes de fechas anteriores permitió estimar los cambios en el uso de suelo y vegetación (Figura 1.4). Se enfatiza que dicho vuelo y toma de imágenes cumplen con el protocolo establecido por la Ley de Información Estadística e Informática (LIEG) así como la normatividad técnica para levantamientos aerofotográficos (INEGI, 2000a).

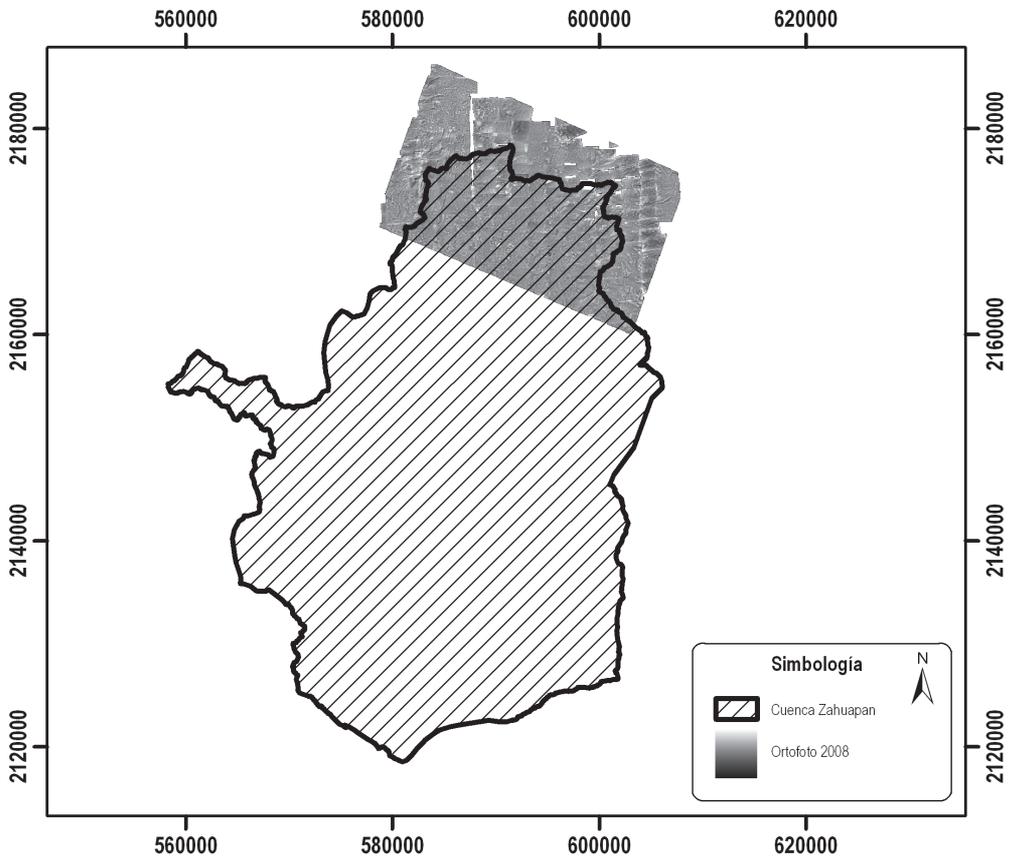


Figura 1.4. Mapa del mosaico de imagen multiespectral de 2008 en el área de la Cuenca del Río Zahuapan.

### Modelo digital de elevación

El Modelo Digital de Elevación (MDE) para el área de estudio se obtuvo de las cartas E14B22, E14B23, E14B32, E14B33, E14B42 y E14B43 las cuales fueron recortadas en sus bordes debido

a que en los metadatos proporcionados por el INEGI se indica que cada carta tiene un área de confiabilidad. Posterior al recorte para obtener el área de interés de cada MDE se integró el mosaico en una sola imagen el MDE del área de estudio. El MDE es un producto de INEGI y se realizó con base a las curvas de nivel de cartas topográficas 1:50,000 con un intervalo entre elevaciones de 50 m (Figura 1.5).

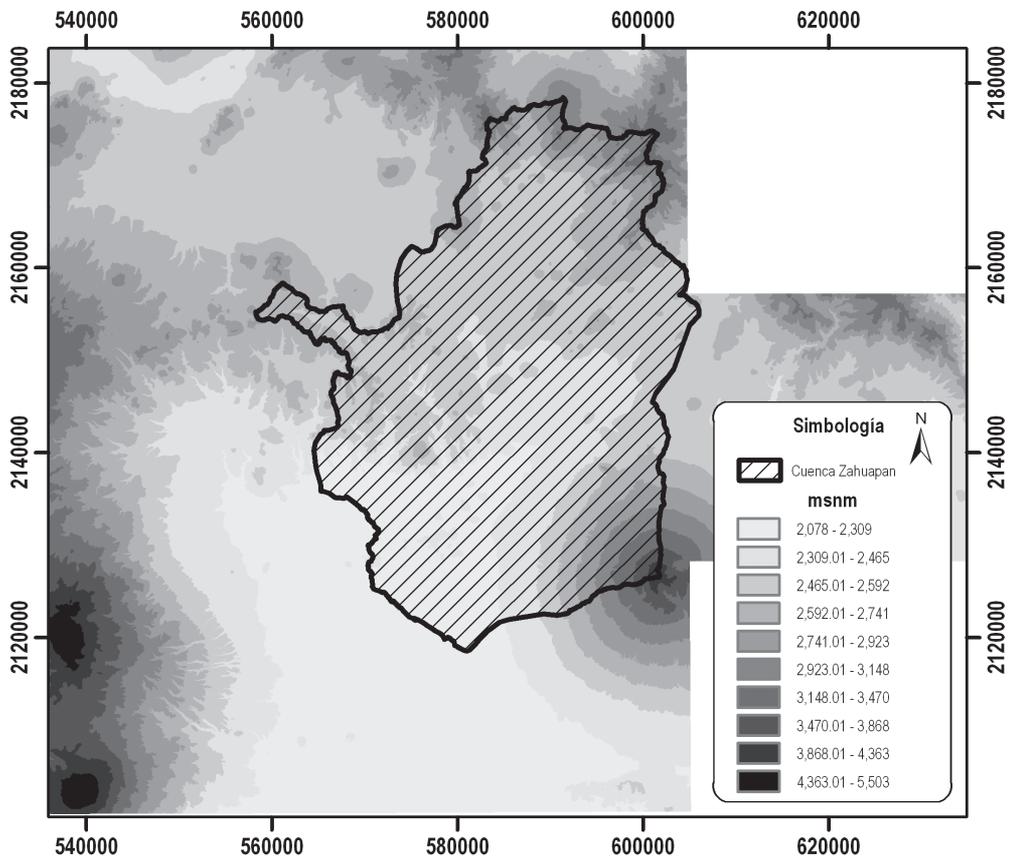


Figura 1.5. Modelo de elevación digital en la cuenca del río Zahuapan.

## Base de datos vectorial

### Productos vectoriales

Polígono de delimitación.- Se utilizó el polígono generado por INEGI en base a los límites del estado y límites municipales de la cartas topográficas 1:250,000 (años 70's) que dan cobertura al estado. Esta capa aún cuando no tiene fines de análisis permite tener una referencia de la ubicación de la cuenca del río Zahuapan en el estado (Figura 1.6).

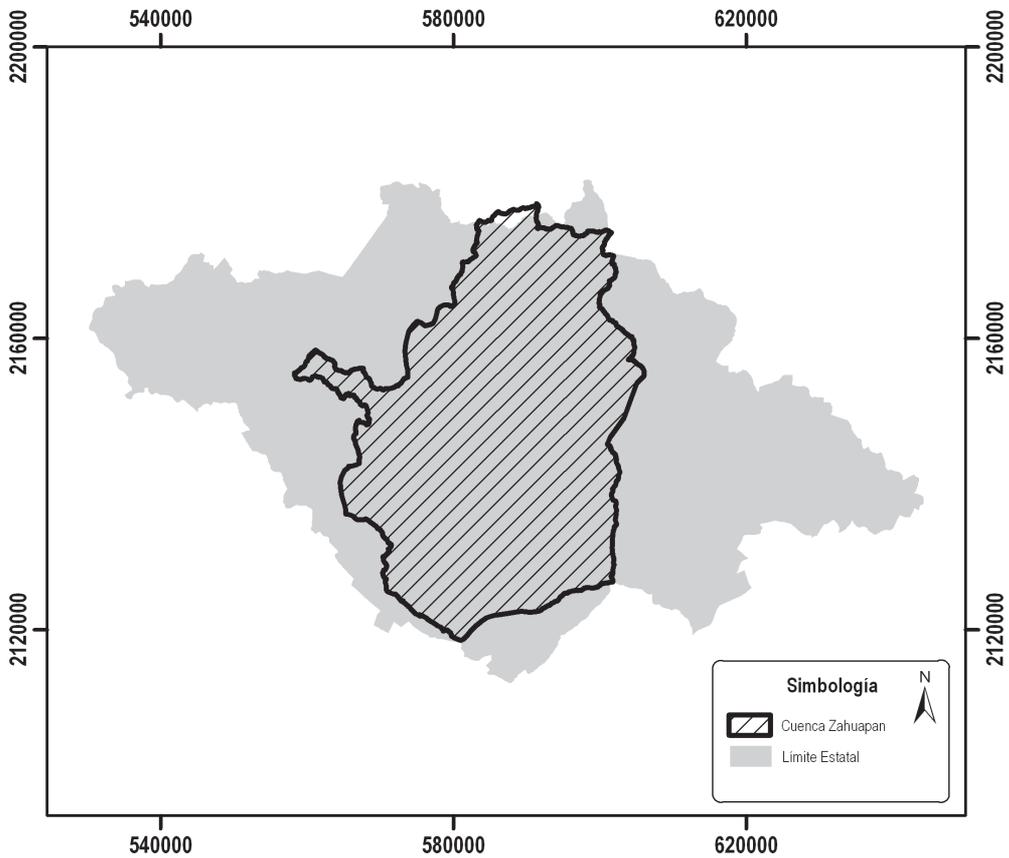


Figura 1.6. Mapa de polígonos de delimitación municipal en el Estado de Tlaxcala y su relación con la Cuenca del Río Zahuapan

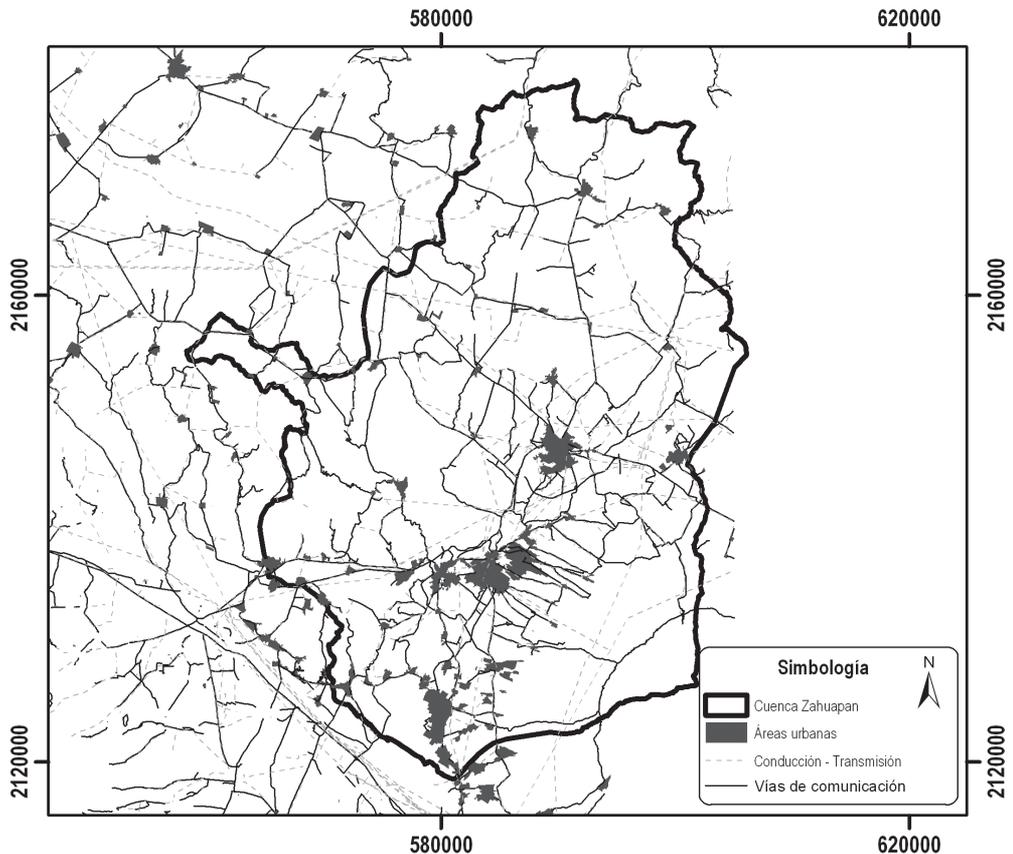
Polígonos, líneas o puntos que describen cada uno de los siguientes temas: área urbana, cuerpos de agua, hidrografía, caminos, aeropuertos, pozos profundos, ejidos, comunidades, región hidrológica, geología y edafología, elaborados a partir de las seis cartas topográficas

escala 1:50,000 de INEGI anteriormente mencionadas, las cuales fueron unidas y reclasificadas. A continuación se describen las capas de este producto de acuerdo a la descripción de INEGI (2005a) (Figura 1.7).

**Áreas urbanas.**- Los polígonos de esta capa se sometieron a un proceso de actualización: se digitalizaron los polígonos aún no digitalizados, se depuró la información y se generó una capa con el nombre de las principales poblaciones, así como la superficie y el tipo de área urbana.

**Caminos.**- Las vías de comunicación incluidas en esta capa están clasificadas en: calle, camino, carretera, línea de comunicación, puente o vía férrea.

**Instalación de comunicaciones.**- Esta capa nos permite ubicar de forma puntual las instalaciones de transmisión de comunicaciones como radio, televisión o microondas, de igual forma se ubican los números de las principales carreteras en el área de estudio.



**Figura 1.7. Mapa de Productos vectoriales en base a cartas topográficas 1:50,000 de INEGI en la Cuenca del Río Zahuapan.**

Localidades.- La información detallada para cada una de las comunidades, tanto rurales como urbanas se obtuvo a partir de la información proporcionada por el INEGI para el XII Censo General de Población y Vivienda 2000 (INEGI, 2004). En general se tomó en cuenta la siguiente información: Nombre de la localidad, longitud, latitud, población, fecundidad, mortalidad, migración, lengua indígena, religión, educación, servicios de salud, discapacidad, estado conyugal, empleo, hogares, vivienda (Figura 1.8).

Pozos profundos.- La Comisión Nacional del Agua proporcionó la información referida a pozos concesionados con información de ubicación geográfica, concesionario, volumen de extracción, acuífero al que pertenecen y el uso del pozo; generándose así un mapa de localización de pozos profundos (Figura 1.9).

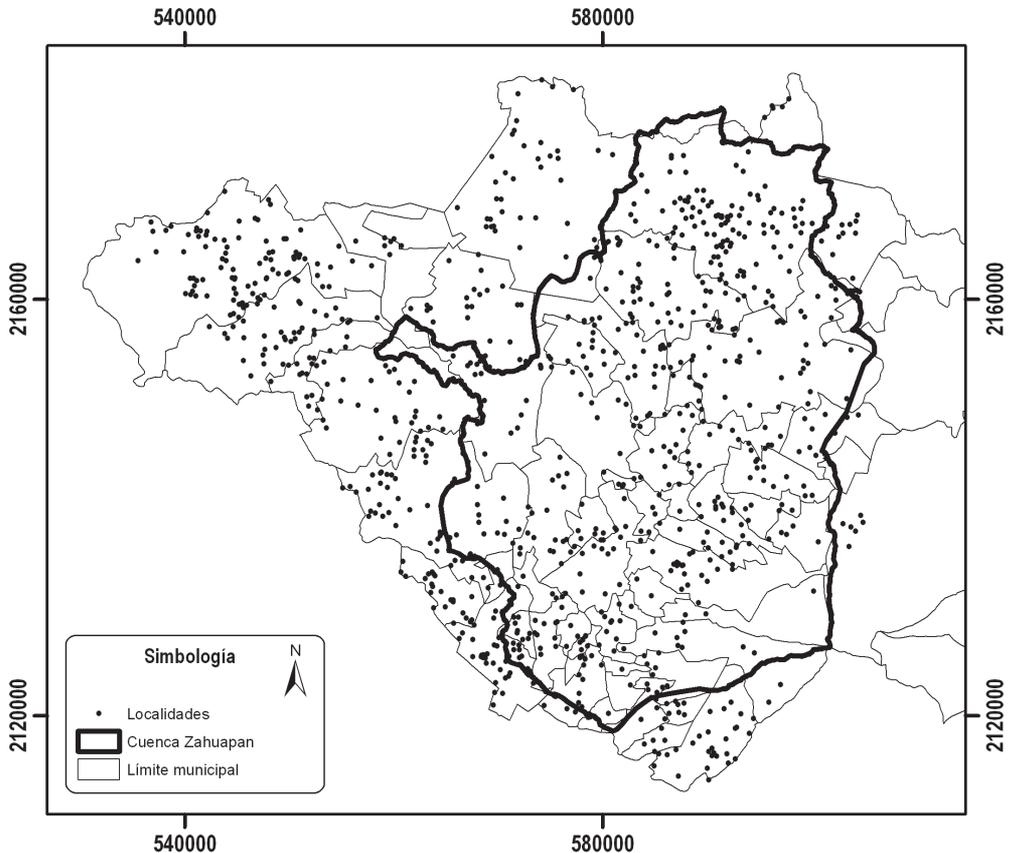


Figura 1.8. Comunidades del Estado de Tlaxcala en el ámbito de la Cuenca del Río Zahuapan.

Descargas clandestinas de agua residual.- Como producto de un recorrido de campo y la georeferenciación de las descargas de agua residual localizadas en los diferentes tributarios del río Zahuapan se generó un mapa de localización de descargas clandestinas (Figura 1.10) considerando su ubicación geográfica en latitud, longitud (X,Y), el lugar de la descarga y el gasto de descarga.

Plantas de tratamiento de agua residual.- Se realizó la ubicación geográfica de las plantas de tratamiento en la cuenca Alto Atoyac tomando la referencia de puntos X, Y de latitud y longitud en recorrido de campo. Con esta información se generó un mapa de localización de las plantas de tratamiento y la altura sobre el nivel medio del mar (msnm) para cada una de ellas como se muestra en la siguiente figura.

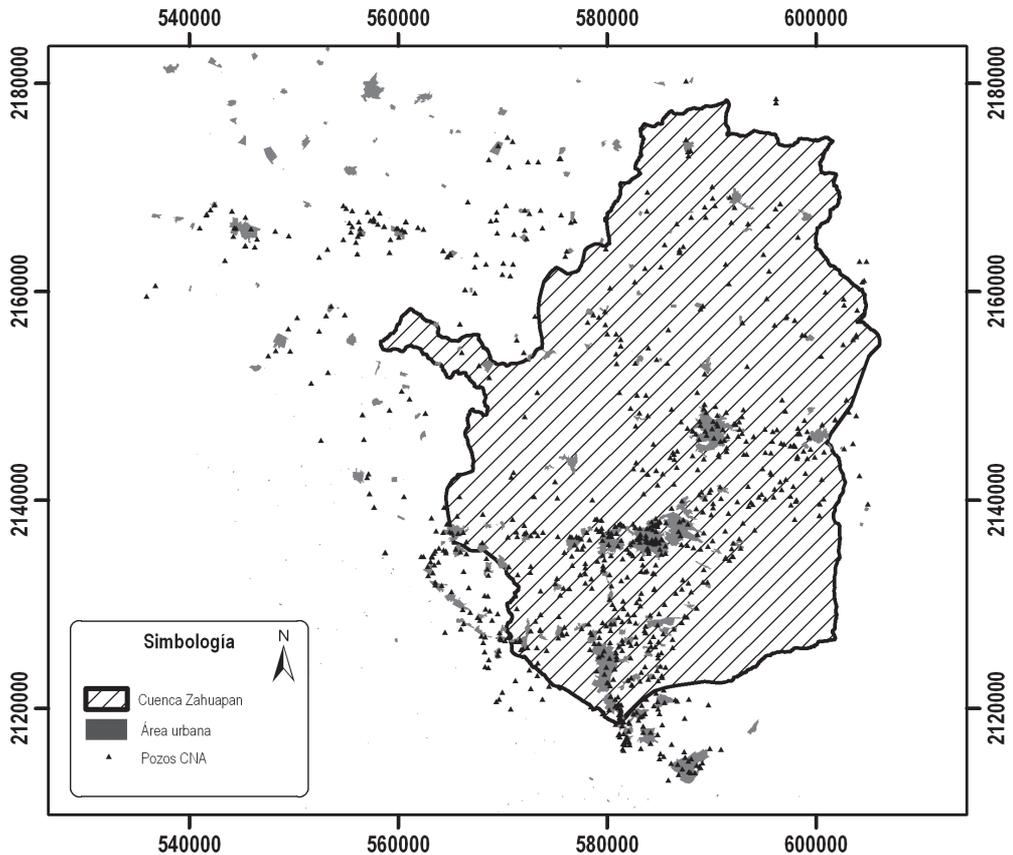


Figura 1.9. Distribución de pozos profundos en la Cuenca del Río Zahuapan.

## Hidrología

Esta información se conforma de temas relacionados a la hidrología superficial e hidrología subterránea en donde se incluyen las siguientes capas.

### Delimitación del acuífero Alto Atoyac

El acuífero Alto Atoyac se delimitó en base a la información obtenida del estudio *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Alto Atoyac* realizado en 2002 por CNA, el cual se le identifica con el número de registro 2901 de acuerdo al SIGMAS (Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas de la CNA). En dicho estudio se presentaron los 22 vértices que conforman el polígono que delimita geográficamente el acuífero Alto Atoyac y que fueron establecidos por la propia CNA para su gestión. El acuífero comprende de manera parcial o total a 50 de los 60 municipios del estado (Figura 1.11).

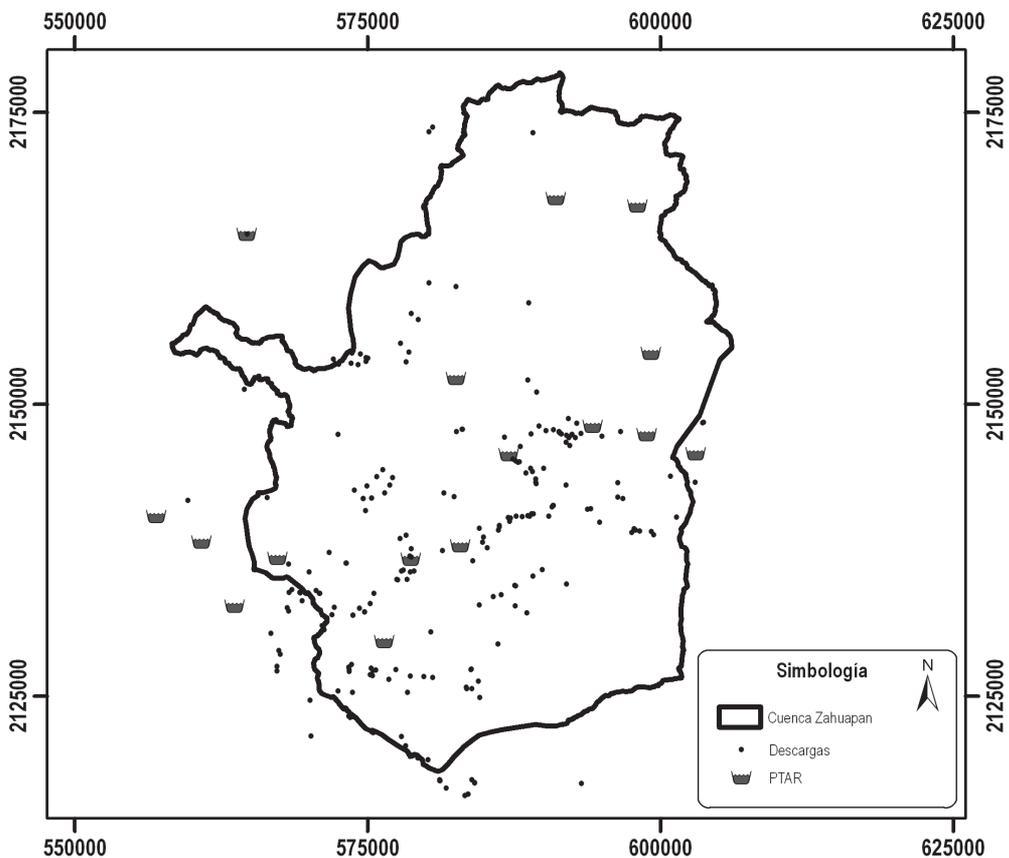


Figura 1.10. Ubicación y distribución de Plantas de tratamiento de agua residual y descargas clandestinas de la Cuenca del Río Zahuapan.

## Cuerpos de agua

De forma similar a las áreas urbanas se corrigieron los polígonos de esta capa obteniéndose una capa con el nombre de los cuerpos de agua, así como al tipo de cuerpo de agua, mismos que están clasificados en intermitente, perenne y estanque regulador (Figura 1.12).

## Conducción de agua

Este producto consta de una sola capa de líneas que contiene información clasificada en dos categorías: Infraestructura hidráulica (conducción y almacenamiento) y escurrimientos superficiales (corrientes de agua intermitentes y permanentes que conforman la red de drenaje superficial).

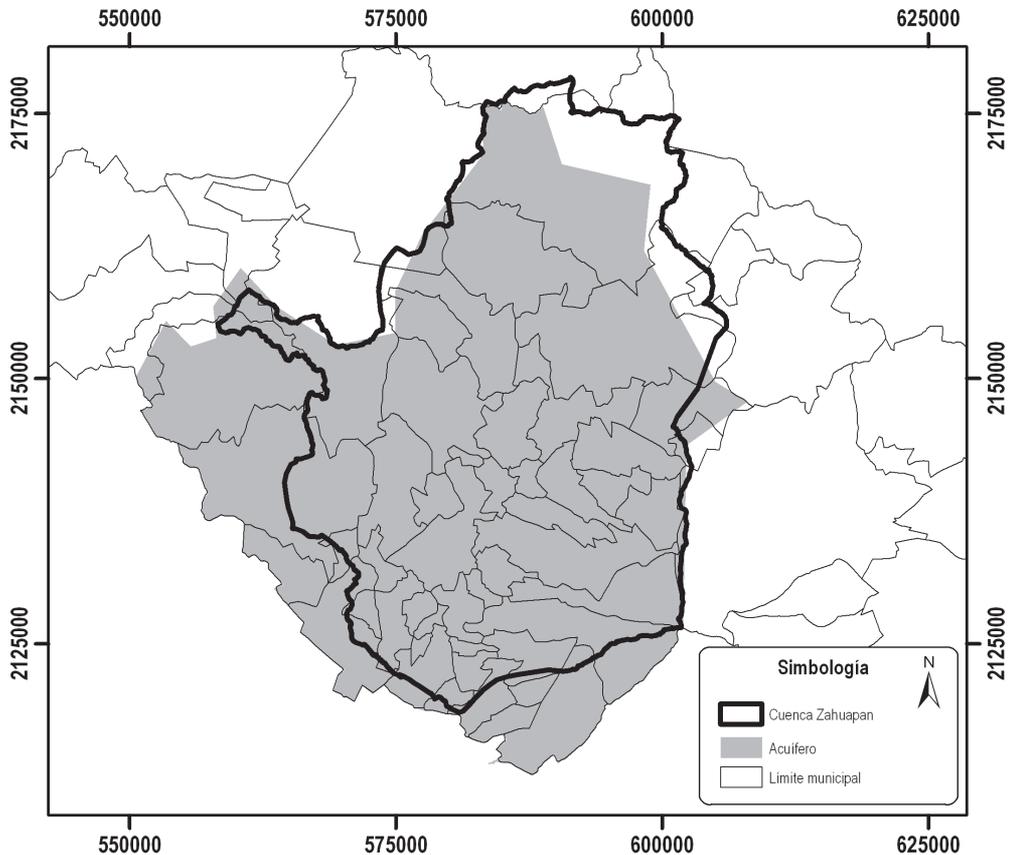


Figura 1.11. Delimitación del acuífero *Cuenca Alta del Río Atoyac* de acuerdo a CNA respecto a la *Cuenca del Río Zahuapan*.

### Infraestructura hidráulica

Contiene información de infraestructura para conducción o almacenamiento de agua a diferentes volúmenes desde la presa como estructura para almacenamiento de agua hasta la conducción por medio de canales y acueductos.

### Escurremientos

Esta capa está conformada por las corrientes de agua intermitente y corrientes de agua perenne, formando así la red de drenaje superficial del área de estudio.

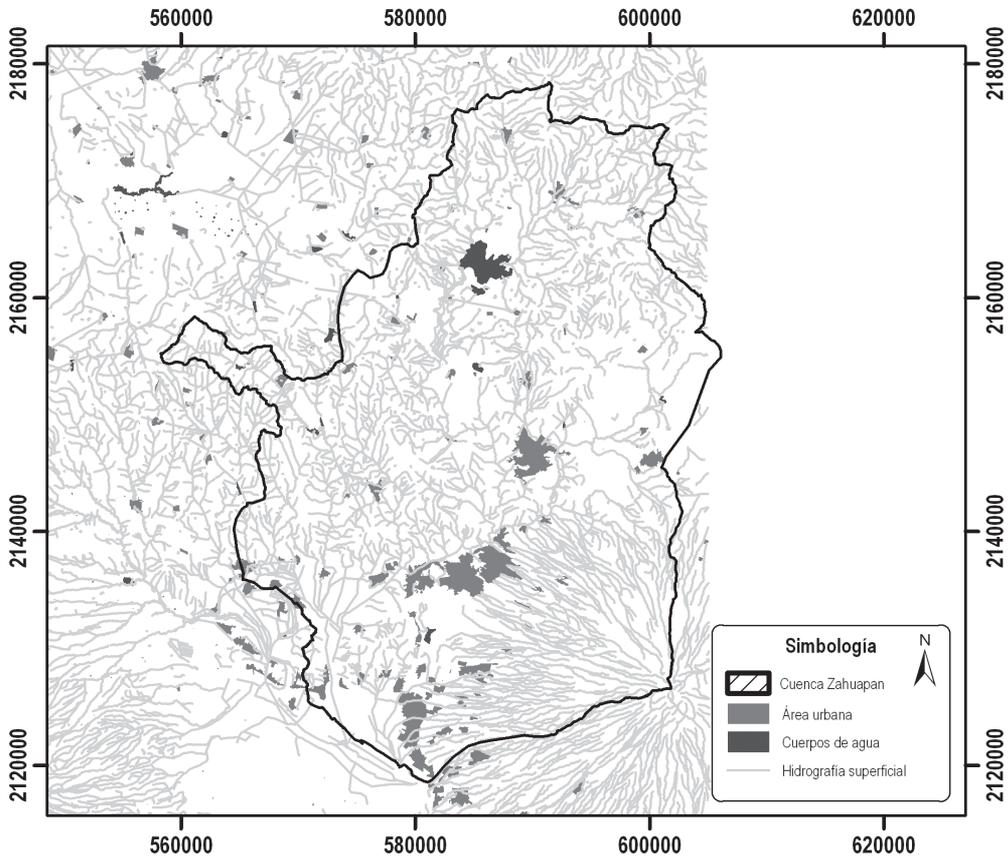


Figura 1.12. Sistemas de conducción de agua (infraestructura hidráulica y escurrimientos superficiales) en la Cuenca delo Río Zahuapan.

## Límites de región hidrológica, cuencas, subcuencas y microcuencas

La información en estas capas se obtuvo de los archivos electrónicos en formato shp (archivo generado por ArcGis® tipo vectorial: punto, línea o polígono) para el territorio nacional elaborados por el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) en los que se delimita la región hidrológica, cuencas, subcuencas y microcuencas. En cada una de las capas se incluyeron los atributos de nombre, clave, superficie y perímetro de los polígonos. Para las microcuencas, se incluyó el código formado por las claves de la región hidrológica (Balsas) y cuenca (Zahuapan) (Figura 1.13).

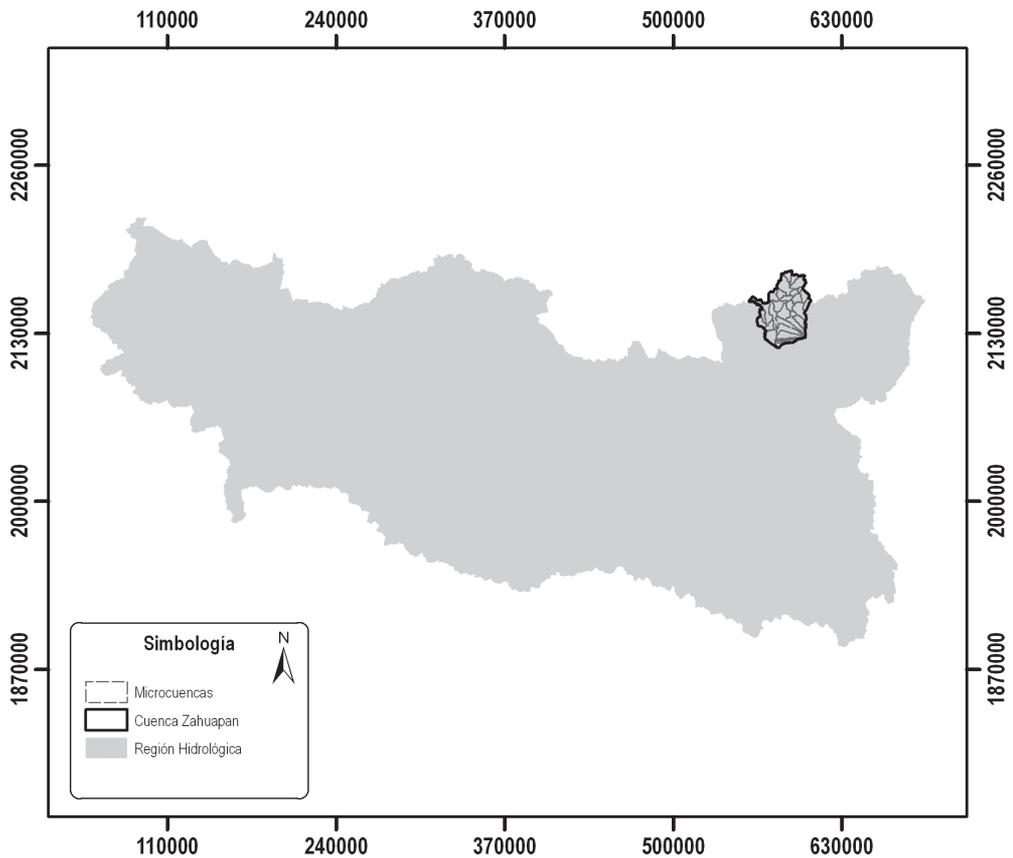
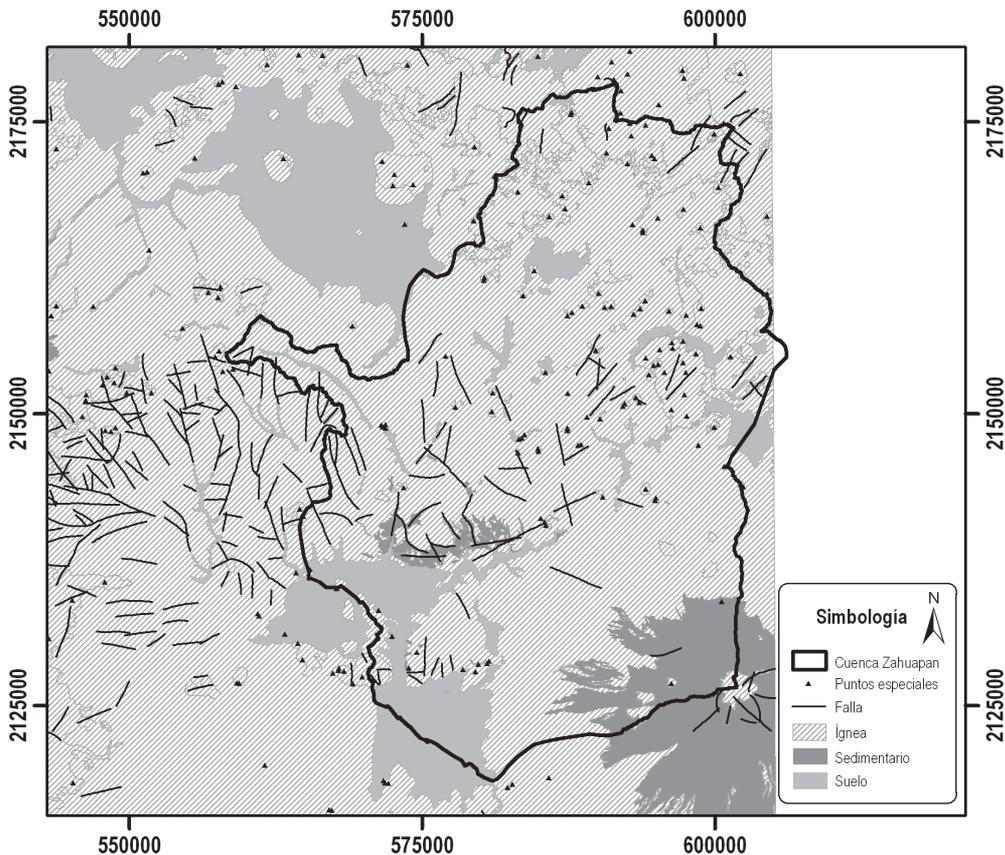


Figura 1.13. Ubicación de la Cuenca del Río Zahuapan en relación a la región hidrológica 18 o del Balsas.

## Geología

La información sobre la geología y edafología del área de estudio se obtuvo a partir de la digitalización de las siguientes cartas geológicas escala 1:50,000 del INEGI con fecha de vuelo de 1974-1978 y 1973-1979, posteriormente fueron escaneadas y georeferenciadas (INEGI; 1990a, 2000b y 2005b). El área de estudio corresponde a la superficie determinada en las cartas geológicas Apan (E14B22), Tlaxco (E14B23), Mariano Arista (E14B32), Tlaxcala (E14B33), Huejotzingo (E14B42), Puebla (E14B43).

La carta geológica fue digitalizada en función de tres tipos de formas vectoriales (Figura 1.14).



**Figura 1.14. Tipos de rocas (de acuerdo al origen), fallas y puntos especiales (volcanes, manantiales, minas, etc.) presentes en la Cuenca del Río Zahuapan.**

Puntos.- Esta capa contiene localizaciones puntuales de bancos de material, manantiales, minas, catas, rumbos y echados de flujo de rocas ígneas y foliación.

**Líneas.-** Para construir esta capa se digitalizaron las estructuras lineales que representan fracturas, diques y fallas naturales, considerando la longitud de cada una.

**Polígonos.-** Esta capa clasifica las áreas con base en su origen y sucesión geológica, primaria y secundaria de acuerdo con la clasificación del INEGI.

### Edafología

Las superficies por tipo de suelo clasificada por INEGI en base a FAO/UNESCO/1968 y modificada por la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL) en 1970 (INEGI, 2001 y 2009), se complementó con características de fase física (lítica, lítica profunda, pedregosa y pedregosa profunda), fase química (salinidad y sodicidad), textura (fina, media o gruesa) y topografía (lomerío, plano, montañoso) (INEGI, 1990b), además de la superficie (ha) que comprende cada clasificación (Figura 1.15).

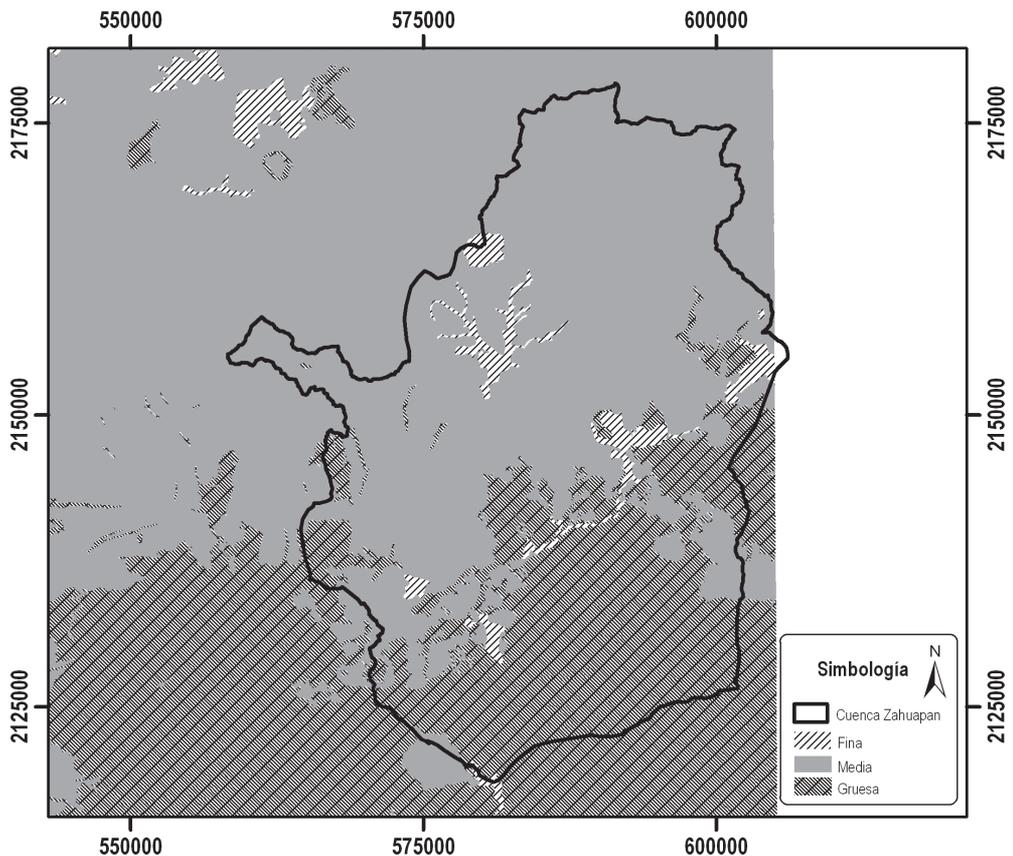


Figura 1.15. Textura de suelo presente en la Cuenca del Río Zahuapan.

## Base de datos biológica

### Uso del suelo y vegetación Serie II y III

De la misma forma que la capa anterior, los atributos que forman parte de esta capa de información corresponden a delimitaciones superficiales de uso de suelo y vegetación con escala 1:250,000 (INEGI, 2005c). Se muestra en las siguientes figuras 1.16 y 1.17 el uso de suelo de la Serie II (1992) y Serie III (2002) respectivamente.

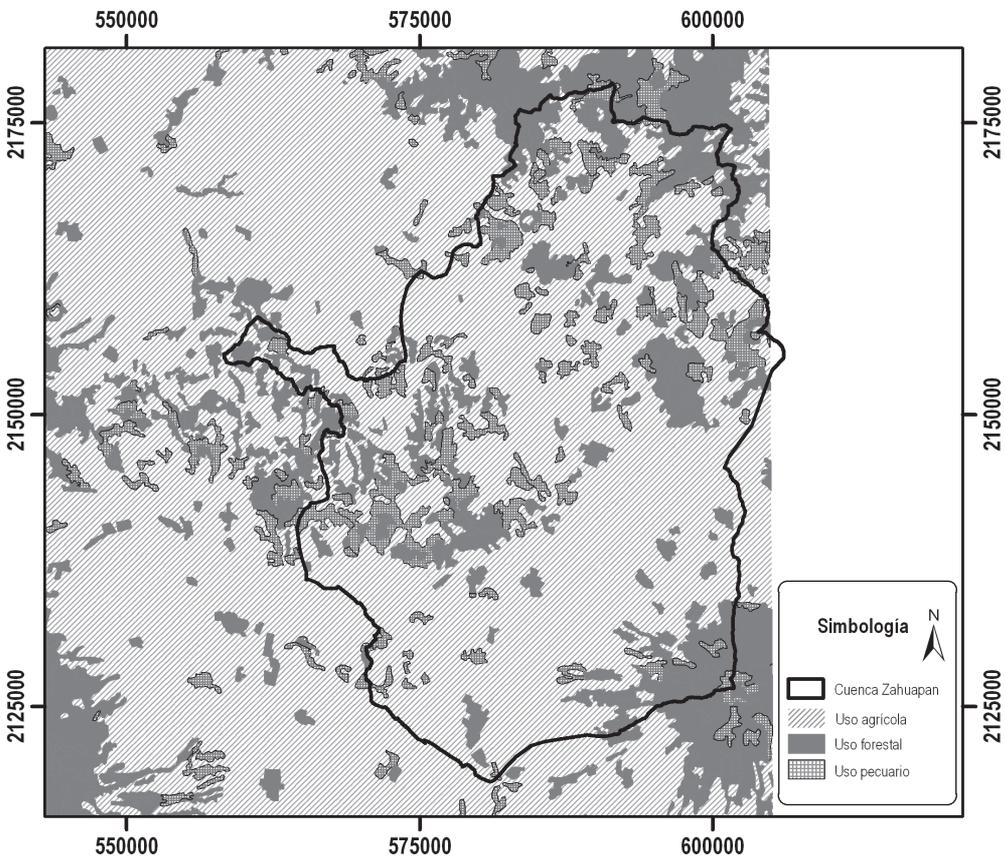


Figura 1.16. Uso de suelo en la Cuenca del Río Zahuapan para 1992 en la Serie II de INEGI.

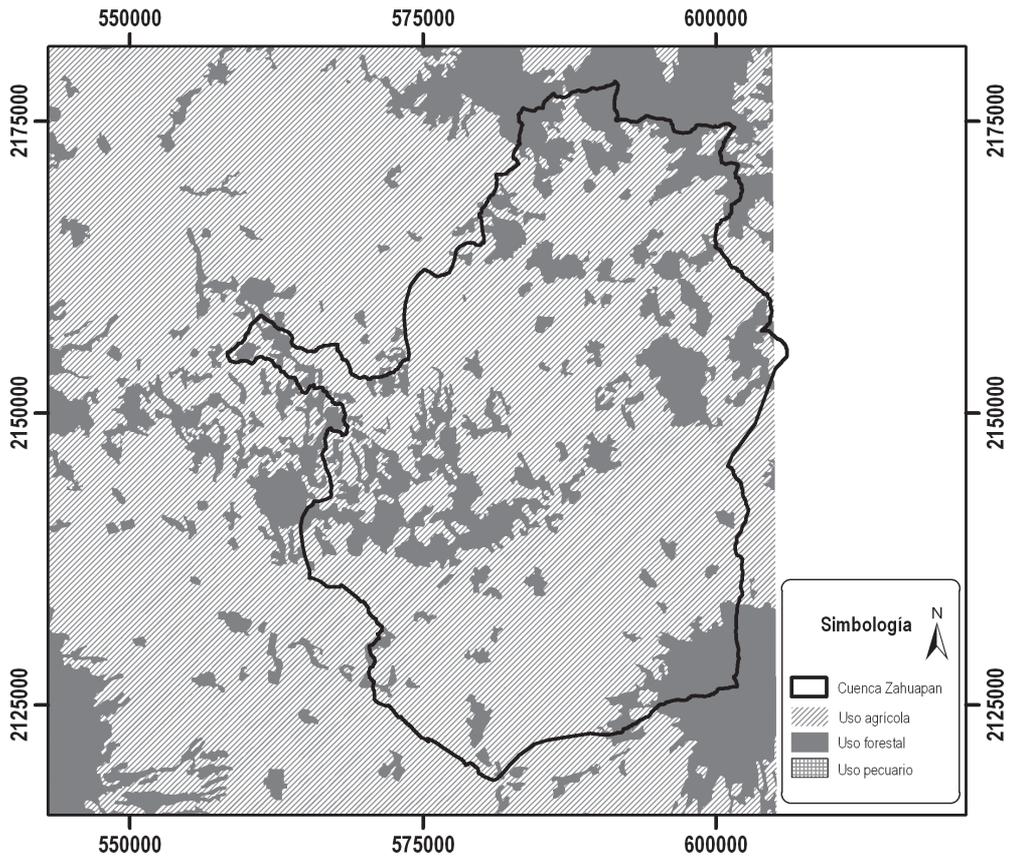


Figura 1.17. Uso de suelo en la Cuenca del Río Zahuapan para 2002 en la Serie III de INEGI.

### Información de la sierra de Tlaxco

En base a la cobertura aérea con fotografía multiespectral, realizada en 2008, se digitalizó, con interpretación monoscópica, la información de vegetación (Figura 1.18) clasificándola en cuatro categorías:

- vegetación abierta, aquellas áreas donde la cobertura vegetal representa menos del 10% de la superficie
- vegetación densa o cerrada, áreas con cobertura vegetal mayor al 30% de la superficie.
- área sin vegetación.
- área agrícola, delimitación de parcelas para producción de cultivos agrícolas.

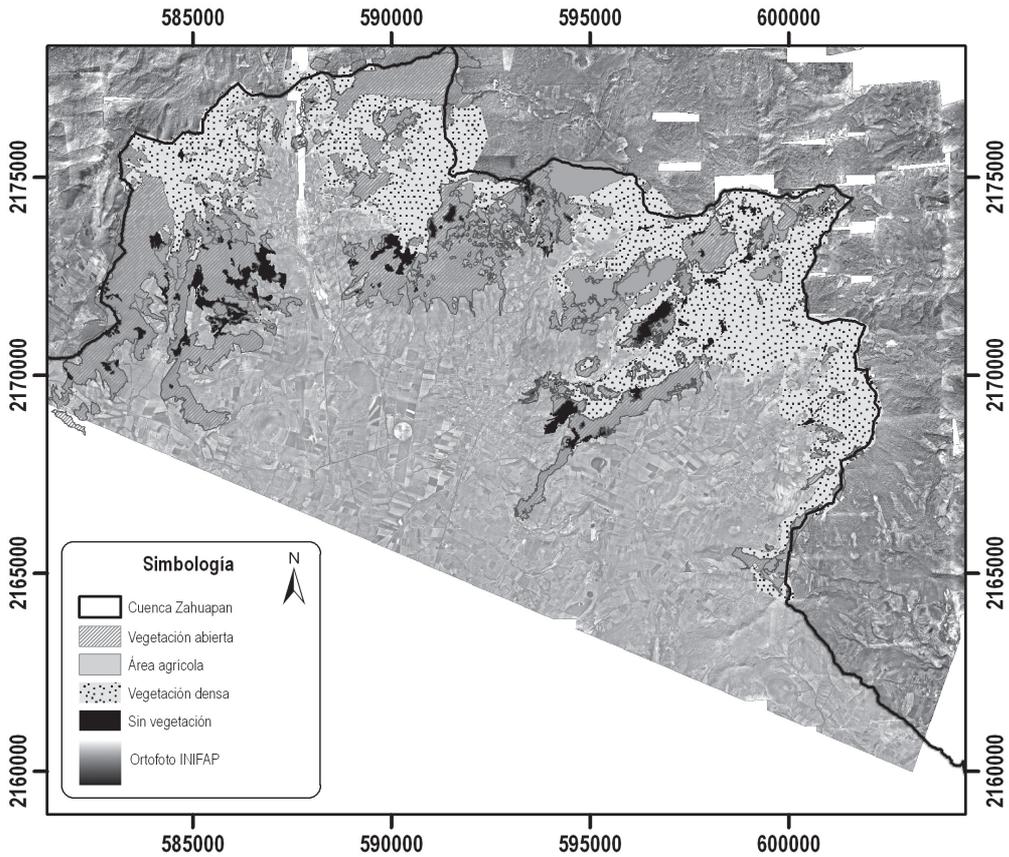


Figura 1.18. Características de la vegetación en la Sierra de Tlaxco para 2008 al norte de la Cuenca del Río Zahuapan en base a la información de fotografía Multiespectral.

### Base de Datos Generada en Base a Ortofoto de 1995 - 1999

La información para la cuenca del Río Zahuapan contenida en las ortofotos se desagregó por medio de la digitalización de dicha información, para la realización de las diferentes coberturas se digitalizaron áreas con coberturas bien definidas por medio de interpretación monoscópica (tamaño y forma). Dentro de los criterios utilizados se generaron cuatro capas de información que describen: áreas agrícolas, áreas urbanas, cuerpos de agua y arroyos (Figura 1.19).

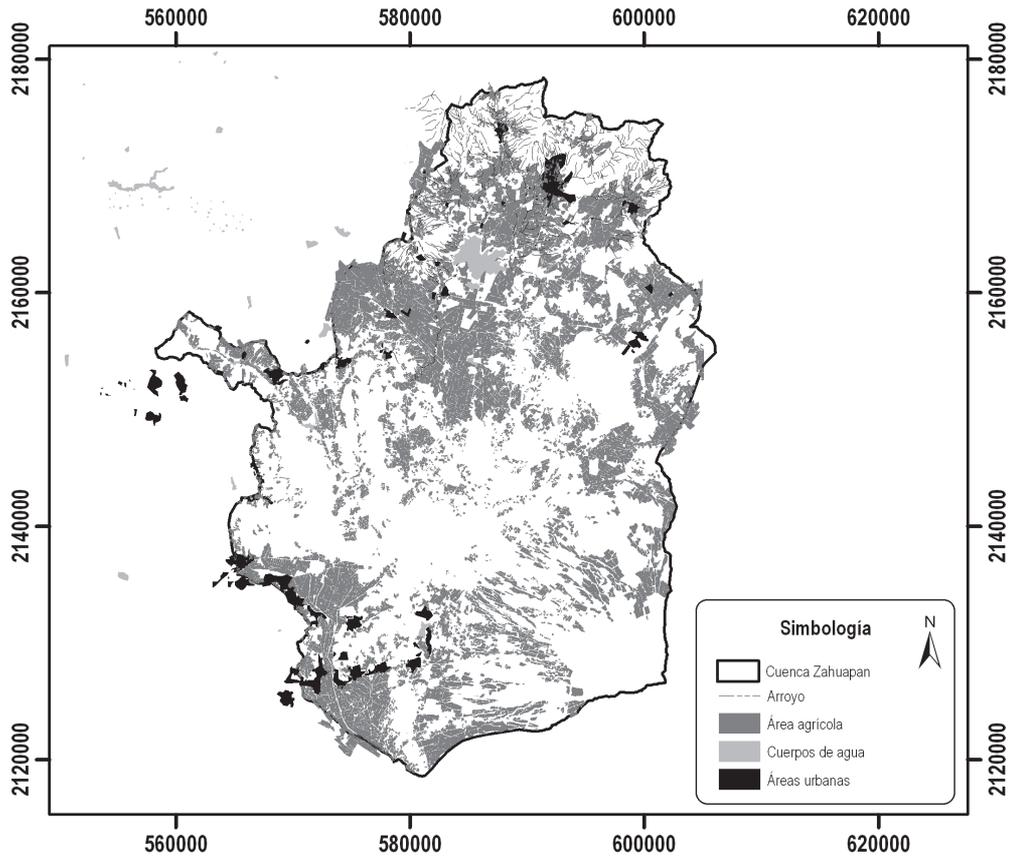


Figura 1.19. Uso de suelo en la Sierra de Tlaxco para 2008 al norte de la Cuenca del Río Zahuapan en base a la información de fotografía Multiespectral.

### Datación de agua

En esta cobertura se ubican los pozos muestreados para el estudio de datación de agua de la Cuenca del río Zahuapan. Contiene también las determinaciones de laboratorio que se utilizaron para el cálculo de datación (detallado en el capítulo Fuentes y datación de agua subterránea del estado de Tlaxcala) en cada punto de muestreo, incluyendo la edad en años por sitio (Figura 1.20).

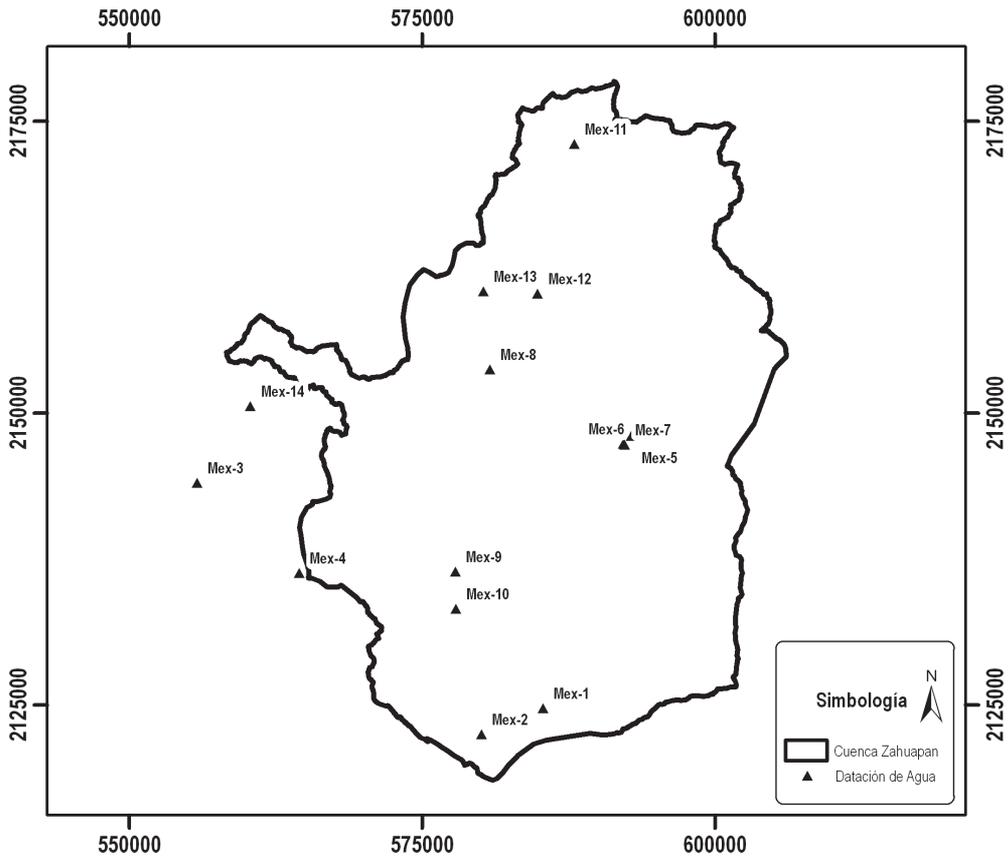


Figura 1.20. Ubicación de los pozos utilizados para el estudio de datación del agua.

## CONCLUSIONES

Este capítulo permite tener la dinámica espacial y temporal de la información geográfica temática existente (edafología, geología, uso de suelo y vegetación, entre otros), a fin de proponerse como una herramienta para el manejo y gestión de los recursos naturales, ya que de manera virtual se puede manipular y editar capas temáticas para simular acciones encaminadas al manejo de estos recursos. En el caso específico de este estudio el SIG es una herramienta eficaz para ubicación de sitios de muestreo (áreas de dendrocronología, calidad y datación de agua) ubicación de superficies que contengan características específicas para determinar acciones de manejo (área de suelos, potencial forestal y socioeconomía) por medio de la ubicación de características de suelo, pendiente, clima, delimitación de ejidos etc. que permitan el desarrollo óptimo de la

especie seleccionada o tipo de suelo. Por lo anterior, esta herramienta es un apoyo a las demás áreas de trabajo del proyecto para mejorar la perspectiva del análisis de la información existente y generada a través de muestreos de campo.

Es importante delimitar que esta información es válida en función de la periodicidad con que se actualice, debido a que corresponde a un diagnóstico de los recursos naturales al momento de realizarse el estudio, es decir, que las condiciones de los recursos, principalmente por el cambio de uso de suelo, serán diferentes en el corto y mediano plazo, y esto puede derivar en un cambio de decisión para un problema planteado.

## LITERATURA CITADA

- Alonso S., F. 2004. SIG aplicados al análisis y cartografía de riesgos climáticos. Métodos y técnicas de análisis de riesgos climáticos II curso de verano de la Asociación española de climatología. España. 70 p.
- Clarke K. C, L. S Mc Lafferty and B. J Tempalski. 1996. On Epidemiology and Geographic Information Systems: a review and discussion of future directions. *Emerg Infect Dis.* Apr-Jun; 2(2):85-92.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Alto Atoyac, Estado de Tlaxcala. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de aguas subterráneas. Subgerencia de evaluación y modelación hidrogeológica. México, D.F. 19 p.
- Dueker, K. and D. Kjerne, 1989. Multipurpose Cadastre: Terms and Definitions, In Technical Papers ASPRS/ACSM Annual Convention, American Congress on Surveying and Mapping, Bethesda, MD, April 2-7, 1989, pp. 94-103.
- Environmental System Research Institute, Inc. (ESRI). 1995. Understanding GIS. The ARC/INFO Method. Self-study workbook. USA. 529 p.
- Glennon R., B. Booth, J. Shaner, A. MacDonald and P. Sanchez. 2004. Editing GIS Features Tutorial. Environmental System Research Institute, Inc. (ESRI). Wilson. North Carolina. USA. pp 128.
- Gómez D., M. y Barredo, J.I. 2005. Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio. Madrid. Ed. Ra-Ma. Segunda Edición. 305 p.

- Goodchild M. J. 1993. The state of GIS for Environmental Problem-Solving en Goodchild, B.O. Parks & L.T. Steyaert Environmental Modeling with GIS Oxford University Press, New York, Oxford. pp. 8-15.
- Harlow, M. and A. Vienneau, 2003. ArcCatalog Tutorial. Environmental System Research Institute, Inc. (ESRI). Wilson. North Carolina. USA. 29 p.
- Heywood, I., S. Cornelius and S. Carver. 2006. An introduction to geographical information system. 3rd Ed. Prentice Hall. Harlow, England. 426 p.
- Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IIRBAH). 2010. Metodología para la implementación del perfil para la captura de los metadatos geográficos. <http://www.humboldt.org.co/humboldt/mostrarpagina.php?codpage=70004> (octubre de 2010).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010. Metadatos <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/normatividad/metadatos/Metadatos.cfm#i1> (octubre de 2010).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1990a. Guías para la interpretación de cartografía. Geología. Aguascalientes, México. 32 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1990b. Guías para la interpretación de cartografía. Edafología. Aguascalientes, México. 48 p.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2000a. Sistema nacional de fotografía aérea (SINFA). Aguascalientes, México. 23 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000b. Diccionario de datos geológicos escala 1:50,000 (vectorial). Sistema Nacional de Información Geográfica. Aguascalientes, México. 39 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2001. Diccionario de datos edafológicos escala 1:50,000 (alfanumérico). Sistema Nacional de Información Geográfica. Aguascalientes, México. 48 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2004. Estados Unidos Mexicanos, XII Censo General de Población y Vivienda 2000; Principales Resultados por Localidad (Versión Disco Compacto). Edición 2004.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005a. Guías para la interpretación de cartografía. Topografía. Aguascalientes, México. 21 p.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005b. Guías para la interpretación de cartografía geológica. Aguascalientes, México. 26 p.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2005c. Guías para la interpretación de cartografía. Uso de suelo y vegetación. Aguascalientes, México. 89p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2009. Diccionario de datos edafológicos. Serie II. Aguascalientes, México. 35 p.
- Jones, C. and McCoy J. 2001. Geoprocessing in ArcGIS Tutorial. Environmental System Research Institute, Inc. (ESRI). Wilson. North Carolina. USA. 63 p.
- Molina, S. I. 2001. Los sistemas de información geográfica en epidemiología. En Revista Salud Pública y Nutrición. Abril-Junio. 2(2).
- Moreno J., A., R. Cañada T., B. Cervera C., F. Fernández G., N. Gómez G., P. Martínez S., A. Moreno J., M. E. Prieto F., J.A. Rodríguez E. y M.J. Vidal D. 2008. Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de aprendizaje con ArcGIS. Alfaomega. México. D.F. 911 p.
- Richards, T. B, C. M. Croner, G. Rushton, C.K Brown and L. Fowler. 1999. Geographic Information Systems and public health: mapping the future. Public Health Rep. Jul-Aug; 114(4): 359-60.
- Theobald, M. D. 2000. GIS Concepts and Arc View methods. Colorado State University. USA. 133 p.
- Thiruvengadachari S. 2004. Spatial data sets in hydrology project. Hydrology Project, World Bank.

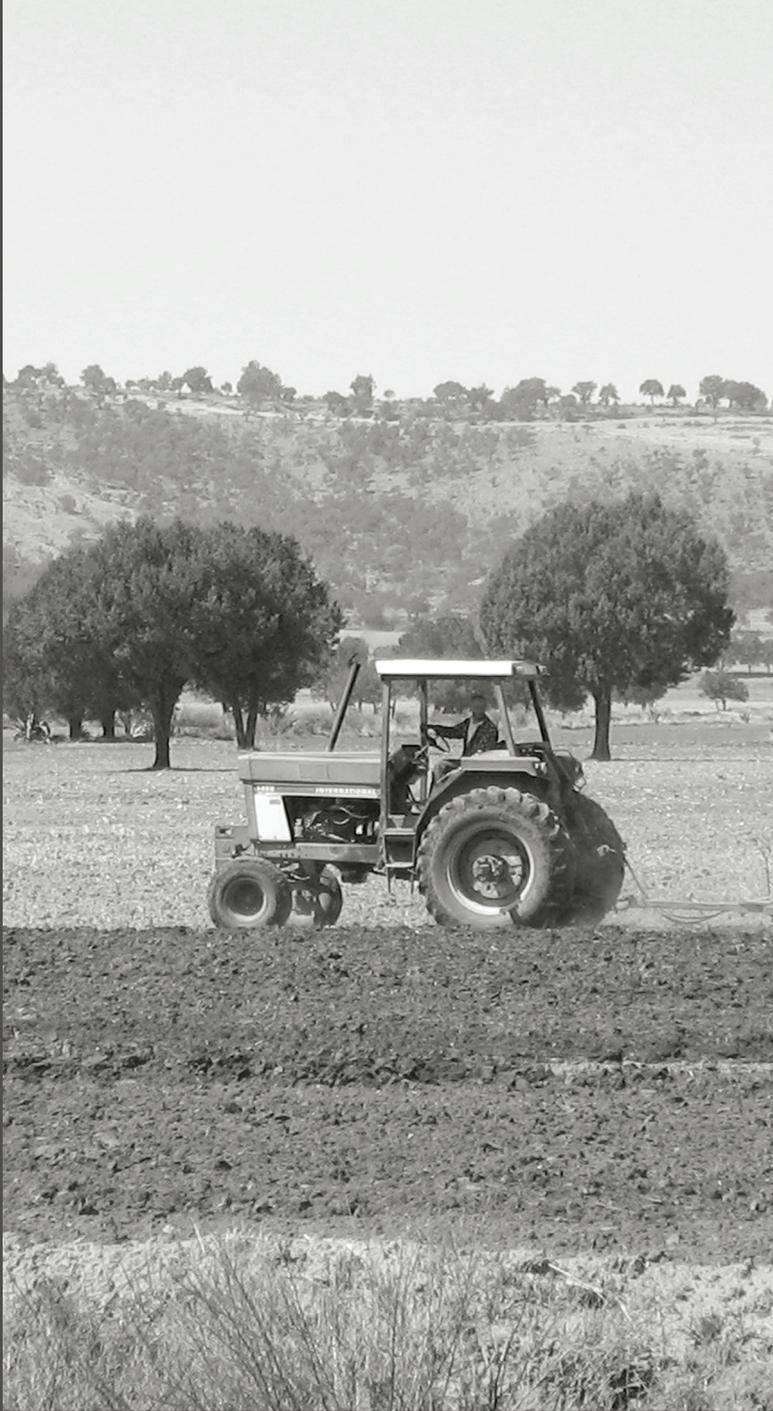
## **CARTOGRAFÍA CONSULTADA**

- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1983. Carta Edafológica E14B23. Apan. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1973. Primera Edición. Secretaría de Programación y Presupuesto. Coordinación General de los servicios nacionales de estadística, geografía e informática, Estados Unidos Mexicanos.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1983. Carta Edafológica E14B23. Tlaxco. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1975. Primera Edición. Secretaría de

- Programación y Presupuesto. Coordinación General de los servicios nacionales de estadística, geografía e informática, Estados Unidos Mexicanos.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1983. Carta Edafológica E14B32. Mariano Arista. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1973. Primera Edición. Secretaría de Programación y Presupuesto. Coordinación General de los servicios nacionales de estadística, geografía e informática, Estados Unidos Mexicanos.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1983. Carta Edafológica E14B33. Tlaxcala. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1979. Primera Edición. Secretaría de Programación y Presupuesto. Coordinación General de los servicios nacionales de estadística, geografía e informática, Estados Unidos Mexicanos.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1983. Carta Edafológica E14B42. Huejotzingo. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1975. Primera Edición. Secretaría de Programación y Presupuesto. Coordinación General de los servicios nacionales de estadística, geografía e informática, Estados Unidos Mexicanos.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1982. Carta Edafológica E14B43. Puebla. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1978. Primera Edición. Secretaría de Programación y Presupuesto. Coordinación General de los servicios nacionales de estadística, geografía e informática, Estados Unidos Mexicanos.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1983. Carta Geológica E14B22. Apan. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1977. Primera Edición. Secretaría de la Presidencia, Estados Unidos Mexicanos.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1985. Carta Geológica E14B23. Tlaxco. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1977. Primera Edición. Secretaría de la Presidencia, Estados Unidos Mexicanos.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1985. Carta Geológica E14B32. Mariano Arista. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1977. Primera Edición. Secretaría de la Presidencia, Estados Unidos Mexicanos.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1983. Carta Geológica E14B33. Tlaxcala. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1977. Primera Edición. Secretaría de la Presidencia, Estados Unidos Mexicanos.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1983. Carta Geológica E14B42. Huejotzingo. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1974. Primera Edición. Secretaría de la Presidencia, Estados Unidos Mexicanos.

- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1985. Carta Geológica E14B43. Puebla. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1978. Primera Edición. Secretaría de la Presidencia, Estados Unidos Mexicanos.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 1997. Carta Topográfica E14B22. Apan. Escala 1:50,000 Fecha de vuelo 1993. Segunda Edición. Estados Unidos Mexicanos, Aguascalientes, Ags.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 1996. Carta Topográfica E14B23. . Tlaxco. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1994. Segunda Edición. Estados Unidos Mexicanos, Aguascalientes, Ags.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).1995. Carta Topográfica E14B32. Mariano Arista. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1993. Segunda Edición. Estados Unidos Mexicanos, Aguascalientes, Ags.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).1995. Carta Topográfica E14B33. Tlaxcala. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1994. Segunda Edición. Estados Unidos Mexicanos, Aguascalientes, Ags.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).1995. Carta Topográfica E14B42. Huejotzingo. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1993. Segunda Edición 1995. Estados Unidos Mexicanos, Aguascalientes, Ags.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).1995. Carta Topográfica E14B43. Puebla. Escala 1:50,000. Fecha de vuelo 1994. Segunda Edición. Estados Unidos Mexicanos, Aguascalientes, Ags.





Ignacio Orona Castillo  
Rafael Zuñiga Tarango  
Ma. Susana García Veyna  
Manuel Fortis Hernández  
Ramón Trucios Caciono

## **CAPÍTULO II**

**SITUACIÓN SOCIOECONÓMICA DEL AGUA  
EN LA CUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN,  
TLAXCALA**



## INTRODUCCIÓN

El estado de Tlaxcala se ubica en la confluencia de tres importantes cuencas hidrológicas: la cuenca del Río Balsas que ocupa la mayor parte de su territorio con el 78.8 por ciento; la cuenca del Río Pánuco con el 18.2 por ciento, y la cuenca Tuxpan-Nautla con el 3.0 por ciento. Con esta condición geográfica, en apariencia favorable, para el Gobierno del estado representa una prioridad la conservación y manejo sustentable de los recursos naturales dada su estrecha relación con los niveles de vida de la sociedad en su conjunto.

En los últimos 50 años México ha experimentado una explotación irracional de sus recursos naturales. México cuenta con más del 10 por ciento de las especies vegetales conocidas en el mundo (Elvira, 2006 y SEMARNAT, 2009); no obstante, se ha llevado a cabo una pérdida de biodiversidad por sobreexplotación de recursos naturales que ha propiciado el avance de la desertificación del territorio provocado, principalmente, por la deforestación, prácticas agrícolas inadecuadas, sobrepastoreo, extracción de leña y urbanización (Elvira, 2006), debido a que la población demanda más servicios y tecnologías que ejercen presión sobre los recursos naturales. Adicionalmente, Lambin *et al.*, 2001 y Vitousek *et al.*, 1997 manifiestan que uno de los principales factores de transformación y deterioro de los ecosistemas lo constituyen las actividades antrópicas y que la deforestación, desertificación, pérdida de la biodiversidad y la degradación del suelo y del agua, son algunos de los impactos del incremento acelerado de la población y de sus actividades.

Entre las consecuencias obvias de esta transformación destacan la pérdida del potencial de uso de los múltiples servicios y bienes ambientales que proporcionan los ecosistemas, el calentamiento global y la alteración de los ciclos hidrológico y bioquímico, entre muchos otros (Daily, 1997).

El estado de Tlaxcala, es un claro ejemplo de lo anterior, debido a que ocupa el primer lugar de nuestro país en deterioro ambiental, ya que, solo conserva el 17 por ciento de su vegetación original. Mención aparte merece la situación del agua en la entidad, pues en los últimos 30 años se ha agotado el 80 por ciento de los 230 manantiales que existían, debido al incremento del 600 por ciento en la demanda de agua para consumo humano, aunado a los problemas de contaminación, deforestación, entre otras causas (Espejel *et al.*, 2005). La densidad de población para el año 2008 ascendió a 281 personas por kilómetro cuadrado; es decir, más de cinco veces mayor a la media nacional que es de 55 (INEGI, 2008a).

De acuerdo al volumen de agua utilizado por los diferentes sectores, las aguas superficiales existentes en Tlaxcala, se destinan principalmente al uso agrícola, y el abasto de agua a la población está garantizado por las aguas subterráneas, que suministran una dotación diaria por habitante de 192 litros. De estas aguas se extraen 55.4 millones de metros cúbicos al año, de los que 27 por ciento son tratados para reutilizarse en la industria y la agricultura. De acuerdo a la Subdirección General de Administración del Agua, dependiente de la Comisión Nacional del Agua en el estado de Tlaxcala el volumen concesionado para uso consuntivo para 2008 ascendió a 235.7 millones de metros cúbicos, el cual se distribuyó en los siguientes usos: 58.3 por ciento para uso agrícola, 33.4 por ciento para abastecimiento público y 8.3 por ciento para el uso industrial (CNA, 2010).

Se conoce que originalmente la entidad tenía una superficie de 350,000 hectáreas de bosques y en 1949, tenía sólo 108,000 hectáreas, de las cuales actualmente se reportan únicamente 52,683 hectáreas las que representan el 13.11 por ciento del territorio estatal (4,016 km<sup>2</sup>). De esta superficie, solamente se están protegiendo 16,433 hectáreas de bosque, mismas que le corresponden al área del volcán la Malinche y 36,250 hectáreas no reciben ninguna protección (Espejel y Carrasco, 1999).

Dada la problemática descrita, el objetivo de este capítulo es caracterizar el uso del suelo y el agua de la agricultura en la Cuenca del Río Zahuapan determinando la eficiencia económica con que se usa el recurso agua al asignarse a diversos usos productivos con información generada por diversas instituciones, así como con la aplicación de una encuesta de campo a productores agropecuarios de la cuenca en sus partes alta, media y baja, y a partir de dichos resultados ofrecer orientaciones en cuanto al uso de dichos recursos.

## **METODOLOGÍA**

El estado de Tlaxcala se localiza geográficamente en la región centro-oriental de la República Mexicana entre las coordenadas 97°37'07'' y 98°42'51'' de longitud oeste y 19°05'43'' y los 19°44'07'' de latitud norte situado en las tierras altas del eje neovolcánico, sobre la meseta de Anáhuac. Colinda al norte con los estados de Hidalgo y Puebla; al este y sur con el estado de Puebla; al oeste con los estados de Puebla, México e Hidalgo (Figura 2.1).

Es el estado de la federación mexicana con menor superficie ya que su extensión es de 4,060.93 kilómetros cuadrados, lo que representa el 0.2 por ciento del territorio nacional. Su altitud media es de 2,230 metros sobre el nivel del mar, por lo que su clima es templado-subhúmedo, semifrío-subhúmedo y frío. La precipitación media anual es mayor en el centro y sur, donde van de 600 a

1,200 milímetros, en tanto que en el noroeste y oriente las lluvias son menores de 500 milímetros al año (INEGI, 2008b).

El uso agropecuario del suelo se determinó mediante información del censo agropecuario realizado por el INEGI para el año 2007 (INEGI, 2007c). Para determinar la importancia de las actividades económicas en relación con el valor de la producción y el personal ocupado, así como el número de unidades económicas, se utilizó el Sistema Automatizado de Información Censal (INEGI, 2004).

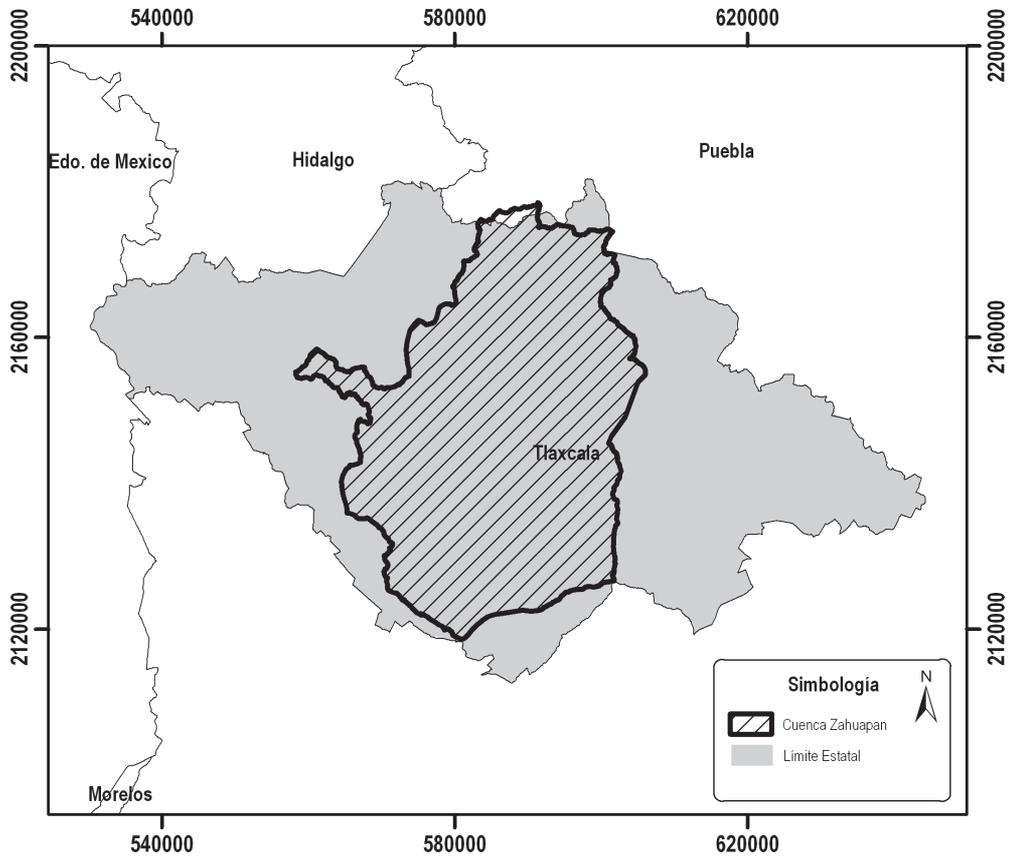


Figura 2.1. Localización del estado de Tlaxcala y la zona de estudio, Cuenca del Río Zahuapan.

Para estimar la productividad del agua, se utilizaron los valores de la producción total anual registrada para cada actividad económica por INEGI (2008b), y el gasto anual de agua reportado

para dichas actividades por la CNA a través del Registro Público de Derechos de Agua (CNA, 2008).

Para realizar la caracterización del uso del agua y el suelo, se seleccionaron 30 productores representativos de la parte alta de la cuenca (CADER Tlaxco); 30 productores representativos de la parte media de la cuenca (CADER San Cosme), y otros 30 de la parte baja de la cuenca (CADER Iztacuixtla), elegidos por personal técnico de la SAGARPA. A estos productores se les aplicó un cuestionario cuyo contenido se diseñó para lograr una descripción socioeconómica del productor, además de conocer los aspectos técnico-productivos utilizados en sus distintas actividades. Dicho instrumento se aplicó en el período comprendido de fines de junio a mediados de agosto por el personal técnico de SAGARPA, del año 2008. A continuación se describen los resultados obtenidos.

## RESULTADOS

### Análisis sociodemográfico

El Estado de Tlaxcala, con una población de 1'068,207 habitantes, de los cuales, el 51.5 por ciento son mujeres, registró 267 habitantes por kilómetro cuadrado para el año 2005, cinco veces superior al promedio nacional (53 habitantes por kilómetro cuadrado). La población total del estado de Tlaxcala estaba distribuida en 1239 localidades, el 91.8 por ciento albergaban menos de 2,500 habitantes; el 7.3 por ciento de entre 2,500 y 15,000 habitantes y sólo el 0.9 por ciento más de 15,000 habitantes (INEGI, 2005 y 2007b).

Alrededor del 80 por ciento de la población de Tlaxcala es originaria de la entidad y las tasas de inmigración y emigración de 1995 a 2000, fueron de 1.0 y 0.6 por ciento respectivamente (INEGI, 2000). El indicador de esperanza de vida de 2004 a 2008 ha sido de 74.9 a 75.9 años, ubicándose en el quinto lugar de las entidades con mayor valor en este indicador, contra una media nacional de 75.1 años en 2008. La tasa bruta de natalidad de Tlaxcala es de 19.7 nacidos vivos por cada mil habitantes, ocupa el séptimo lugar nacional cuya media es de 18.3.

Las tasas de mortalidad fetal e infantil son superiores a la media nacional. En cambio los indicadores demográficos que colocan al estado de Tlaxcala en la posición 31, 30 y 28 respectivamente, son: la relación divorcios-matrimonios que es de 4.1 (la media nacional de 13 divorcios por cada 100 matrimonios); el porcentaje de migrantes internacionales respecto a la población residente que es de 0.1 contra 0.3 en la media nacional; y porcentaje de hogares cuya jefatura es femenina con la cifra del 20 por ciento contra un 23.1 por ciento nacional. Por otra parte, la población derechohabiente a servicios médicos es de sólo un 34.9 por ciento en comparación con la cifra

nacional de 46.9 por ciento; y el índice de mortalidad masculina es de 119.8 contra la nacional de 124.5 defunciones masculinas por cada 100 femeninas (Cuadro 2.1).

En servicios de salud, año 2005, la entidad contó con 199 unidades médicas. El personal en contacto directo con los pacientes es de 1,475 médicos generales, especialistas o en adiestramiento, es decir, 137.6 médicos por cada 100,000 habitantes y 3,829 paramédicos, para toda la entidad. En el año 2000, el 97.7 por ciento de la población de Tlaxcala fueron usuarios de los servicios de salud, distribuidos de la siguiente manera: 37.4 por ciento en Secretaría de Salud, 21.2 por ciento en el IMSS, 5.2 por ciento en el ISSSTE, 0.3 por ciento en PEMEX, Defensa o Marina, 0.2 por ciento en IMSS-Solidaridad, 0.5 por ciento en otras instituciones públicas y 35.2 por ciento en instituciones privadas.

**Cuadro 2.1. Indicadores demográficos 2000 – 2008 en la entidad y a nivel nacional.**

Concepto	Año	Nacional	Entidad	Lugar Nacional
Edad mediana (años)	2005	24.0	23.0	19°
Relación hombres / mujeres	2005	94.8	94.0	19°
Tasa global de fecundidad	2008	2.1	2.2	13°
Tasa bruta de natalidad (número de nacidos vivos por mil habitantes)	2008	18.3	19.7	7°
Promedio de hijos nacidos vivos por mujer (de 12 y más años de edad)	2005	2.5	2.5	20°
Esperanza de vida	2008	75.1	75.9	5°
Migrantes internacionales (porcentaje respecto a la población residente)	2005	0.3	0.1	30°
Tiempo de duplicación (años)	2000	44.0	35.0	21°
Tasa bruta de nupcialidad (número de matrimonios por mil habitantes)	2007	5.6	5.4	23°
Relación divorcios - matrimonios (No. de divorcios por cien matrimonios)	2007	13.0	4.1	31°
Hogares con jefatura femenina (porcentaje respecto al total de hogares)	2005	23.1	20.0	28°
Población con derechohabencia a servicio médico (%)	2005	46.9	34.9	27°
Relación de dependencia	2005	66.1	68.7	13°
Tasa bruta de mortalidad en un año (No. de defunciones por mil habitantes)	2008	4.9	4.5	24°
Tasa de mortalidad fetal	2007	8.8	9.3	9°
Tasa de mortalidad infantil	2008	15.2	15.8	11°
Índice de sobremortalidad masculina	2006	124.5	119.8	27°

Fuente: INEGI. Banco de Información Económica. 2000-2008

En el rubro de trabajo, ocupación y empleo, la industria manufacturera se incrementó en personal ocupado de 1995 (19,865) a 1998 (25,684), y desde entonces, la tendencia hasta 2007 ha sido a la baja (15,840). En horas-hombre trabajadas, de 46'110,000 para 1995, pasa a un máximo de 60'897,000 en 1998; y un descenso hasta 35'715,000 en 2007. En la industria de la construcción, de 1,995 trabajadores para el año 2000 descendió notablemente hasta alcanzar en el 2007 una cifra de 815. La tasa de desocupación global, muestra una tendencia a la alza con breves períodos de recuperación, oscilando en cada año, de manera que en 2005 fue de 4.75 por ciento y en los dos primeros trimestres de 2008 de 5.67 por ciento.

En el sector educativo, en el ciclo escolar 2005-2006, se cuenta con 1,857 escuelas de nivel básico, 139 medio superior, 65 superior y 79 de capacitación para el trabajo; así como 11,437; 2,470; 2,052 y 385 maestros respectivamente, atendiendo a 267,889 alumnos en educación básica; 39,105 de media superior; 21,955 superior y 11,065 en capacitación para el trabajo. Con todo esto, se cuenta con un promedio de escolaridad de 7.6 años para el año 2000, y 8.3 años para el 2005, cifras apenas superiores a la media nacional.

Las condiciones de vivienda, en registros de 1990-2005, muestran cifras arriba de la media nacional en cuanto a servicios de agua entubada, drenaje y energía eléctrica, así como en lo referente a techos de material durable y recubrimiento de pisos y muros.

Con referencia al patrimonio cultural, se observa un decrecimiento de 136 bibliotecas públicas en la entidad federativa para el año 2004; a 129 en el año 2005; recuperando la cifra de 136 en 2007 y 2008. En tanto que la población por biblioteca pública es de 8,246 en 2004, y desciende gradualmente hasta 8,006 hacia el 2007; y se estima de 8,126 al 2008. La asistencia de visitantes a museos es creciente desde 10,032 en 2003, con 10 museos hasta 31,089 en 2006, con 13. En las cuatro zonas arqueológicas de la región el número de visitantes desciende de 60,597 en 2003, hasta 47,656 en 2006.

## **Actividades económicas**

De acuerdo a los datos del Censo Económico 2004 (INEGI, 2010), Tlaxcala cuenta con un total de 38,315 Unidades Económicas, que representan el 1.27 por ciento del total nacional. Del total de unidades económicas correspondientes al estado de Tlaxcala, el 89 por ciento están contenidas en la cuenca del Río Zahuapan, región en la que se desarrolla el presente estudio.

En el estado de Tlaxcala se emplean 125,008 personas, el 8 por ciento del personal ocupado en México, de las cuales 117,408 personas son empleadas en la cuenca del Zahuapan, representando el 94 por ciento del total estatal. Así mismo, el valor de la producción en esta área de estudio corresponde al 94.4 por ciento del total del valor de la producción generada en el estado, la cual representa un 0.5 por ciento del total nacional.

Las remuneraciones que recibe anualmente en promedio cada trabajador en Tlaxcala son de 56,624.00 pesos, inferiores al promedio nacional de 79,551.00 pesos. De acuerdo a esta misma fuente, del total del personal ocupado en la entidad, el 57.3 por ciento (71,691) son hombres y el 42.7 por ciento (53,317) son mujeres.

### **Producto interno bruto**

El Producto Interno Bruto (PIB) del estado de Tlaxcala durante el período 1999-2004 creció en 17 por ciento, (INEGI, 2007a). Por división de actividad económica, de electricidad, gas y agua registró el mayor crecimiento (53.8%), seguido por el sector agropecuario, silvicultura y pesca, con un 43.3 por ciento; al que le siguieron los sectores de transporte, almacenaje y comunicaciones así como el comercio, restaurantes y hoteles con un 38.4 y 31.3 por ciento, respectivamente. Sin embargo, se advierte que a pesar que la industria manufacturera creció sólo 7 por ciento, aporta el 28.2 por ciento del valor del PIB y que electricidad, gas y agua, a pesar de su amplia tasa de crecimiento, participa con el 1.8 por ciento de dicho valor. Por su parte, la división agropecuaria, silvicultura y pesca aportan el 6.6 por ciento del valor del PIB.

La participación que en el PIB manufacturero tuvo cada división industrial para los años 1999 y 2004 se presenta en el Cuadro 2.2, donde se advierte que productos alimenticios, bebidas y tabaco tienen la mayor importancia; sin embargo, tienden a disminuir.

Los sectores cuya participación aumentó en el período señalado son el de textiles, prendas de vestir e industria del cuero; sustancias químicas, derivados del petróleo, productos de caucho y plástico; productos metálicos, maquinaria y equipo, como se observa en el Cuadro 2.2.

Se aprecia que las actividades industriales desarrolladas en la zona de estudio son altamente contaminantes del medio ambiente, como las textiles, la de la madera y el papel, entre otras. Esta situación impacta negativamente en la calidad del agua reutilizada en la propia industria y en la agricultura; además el resto del agua desechada impacta el acuífero y el medio ambiente, pues mucha de ésta se descarga en ríos y arroyos localizados aguas abajo de la cuenca. Para disminuir el impacto ambiental de estas aguas residuales existen 52 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación, con una capacidad instalada de operación de 1.23 metros cúbicos por segundo y un caudal tratado de 0.87 metros cúbicos por segundo y 106 plantas de tratamiento de aguas residuales industriales con una capacidad instalada de operación de 0.25 metros cúbicos por segundo y un caudal tratado de 0.22 metros cúbicos por segundo (CNA, 2009).

**Cuadro 2.2. Participación de las divisiones industriales en el PIB manufacturero en el estado de Tlaxcala. Período 1999 y 2004.**

División industrial	% 1999	% 2004
Productos alimenticios, bebidas y tabaco	28.4	22.2
Textiles, prendas de vestir e industria del cuero	12.6	15.4
Industria de la madera y productos de madera	0.6	0.7
Papel, productos de papel, imprentas y editoriales	2.6	2.4
Sustancias químicas, derivados del petróleo, productos de caucho y plástico	18.7	21.9
Productos de minerales no metálicos, exceptuando derivados del petróleo y carbón	19.9	17.3
Industrias metálicas básicas	4.0	2.5
Productos metálicos, maquinaria y equipo	10.0	14.8
Otras industrias manufactureras	3.1	2.8

De acuerdo a Sepúlveda (2007), para el año 2007, la tasa de mortalidad infantil por cada cien mil habitantes por enfermedades diarreicas en menores de cinco años, para el estado de Tlaxcala fue de 18 infantes y para el 2001 de 22.8, lo que significa que la instalación de plantas tratadoras de agua han impactado favorablemente este problema. Rivera, *et al.* (2008), encontraron que los efluentes del agua residual tratada tienen valores de conductividad eléctrica mayores que 1 dS/m y por ello representan un riesgo potencial de salinización de suelos agrícolas, los cuales requieren un manejo adecuado para el control de la salinidad, sobre todo los suelos de textura arcillosa. También, determinó que los efluentes son ricos en nitrógeno y fósforo, lo cual debe considerarse en los programas de fertilización, para hacer un uso más eficiente de los fertilizantes y disminuir los costos de producción de los cultivos. En cuanto a la contaminación biológica (coliformes fecales), se encontró que todos los efluentes sobrepasaron los límites permisibles para uso agrícola, lo cual constituye un riesgo para la salud humana.

### **Unidades económicas por sector de actividad y su importancia en el estado de Tlaxcala**

Para el año 2003, de acuerdo al INEGI (2007a) el estado de Tlaxcala registró un total de 38,315 unidades económicas, de las cuales 53 por ciento fueron establecimientos de comercio al por menor, seguidos por industrias manufactureras (14.4%), y servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas (6.3%); sin embargo, su participación en el personal ocupado fue de 30.5, 39.5 y 5.3 por ciento, respectivamente. Es decir, la industria manufacturera no tiene la mayor participación en número de unidades económicas, pero es la que más aporta al

valor del PIB. En lo referente a la participación en remuneraciones totales (que para el año 2003 ascendieron a 3,676 millones de pesos) es la industria manufacturera la de mayor importancia. Información a mayor detalle se presenta en el Cuadro 2.3. La baja participación del valor de la producción agropecuaria es una característica generalizada a nivel mundial y no sólo en la zona de estudio; así, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, consigna que aún cuando el volumen de la producción agrícola se ha incrementado en los últimos años, la contribución al producto interno bruto se mantiene alrededor del 4 por ciento en la mayoría de los países miembros de ésta organización (OCDE, 2001).

**Cuadro 2.3. Unidades económicas y su participación en personal ocupado y remuneraciones totales en el estado de Tlaxcala. 2003.**

Sector de actividad	% Unidades económicas	% Personal ocupado	% Remuneración
Agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza		0.12	
Minería	0.10	0.17	0.04
Electricidad, agua y suministro de gas por ductos al consumidor final		0.80	2.62
Construcción	0.19	1.26	1.03
Industrias manufactureras	14.45	39.55	68.42
Comercio al por mayor	2.71	3.29	4.95
Comercio al por menor	53.01	30.54	8.68
Transportes, correos y almacenamiento	1.39	2.01	2.60
Información en medios masivos	0.25	0.41	0.63
Servicios financieros y de seguros	0.14	0.21	0.21
Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles	1.41	0.84	0.24
Servicios profesionales, científicos y técnicos	1.56	1.23	0.69
Dirección de corporativos y empresas			
Servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación	1.04	1.69	2.34
Servicios educativos	0.91	2.88	3.14
Servicios de salud y de asistencia social	2.63	1.78	0.55
Servicios de esparcimiento, culturales y deportivos, y otros servicios recreativos	1.10	0.81	0.15
Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas	6.35	5.35	2.23
Otros servicios excepto actividades del gobierno	12.77	7.06	1.49

## Productividad del agua

### Industria manufacturera

La productividad en general, es la relación entre la unidad de resultado y la unidad de insumo; es decir, la productividad del agua puede considerarse la cantidad o el valor del producto en función del volumen de agua consumida o desviada, o de su valor (FAO, 2003), lo que se puede expresar como el cociente: valor de la producción por metro cúbico de agua, o bien el valor de la producción sobre el valor del agua empleada.

El cálculo de éste indicador se hizo para el período 2005 al 2008 con base a la producción reportada por INEGI (2006; 2007a; 2008b) y los volúmenes asignados a la industria por la CNA (2006; 2007; 2008) a través del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA). El Cuadro 2.4 muestra la productividad del agua en la industria de Tlaxcala.

**Cuadro 2.4. Productividad del agua en la industria a partir del valor de la producción y volumen concesionado de agua para el estado de Tlaxcala.**

Año	Valor de la producción	Volumen de agua Concesionado	Productividad
	(miles de pesos)	(Mm <sup>3</sup> )	( pesos/ m <sup>3</sup> )
2005	21,848,018.00	19.3	1,132.00
2006	23,665,128.00	19.0	1,245.50
2007	23,730,934.00	19.0	1,249.00
2008	23,000,000.00	19.5	1,179.50

De acuerdo a lo anterior, por cada metro cúbico de agua utilizado en la industria se genera un valor de la producción de alrededor de 1,132.00 y 1,249.00 pesos.

Ahora bien, si el número de personas ocupadas por la industria manufacturera y de la construcción para los años 2006 y 2007 de acuerdo a INEGI (2006 y 2007a) fue de 17,129 y 16,657 respectivamente, es posible estimar a *grosso modo* hablando, que se han requerido anualmente 1,109 y 1,140 metros cúbicos de agua para mantener ocupada a una persona en este sector de la producción.

## **Características técnicas – socioeconómicas de los productores de la parte alta de la cuenca del Río Zahuapan.**

Este apartado se refiere al área de influencia del CADER Tlaxco situado en la parte alta de la cuenca del Río Zahuapan.

### **Aspectos socioeconómicos**

*Edad del productor.* El rango de edad de los productores fluctúa entre 34 y 78 años, siendo el promedio de 53 años. El número promedio de años como productores fue de 33, siendo 3 y 60 los años mínimo y máximo.

*Alfabetismo.* De esta muestra de productores, el 7 por ciento no sabe leer ni escribir y de los que sí saben el 20 por ciento cuenta con educación primaria; 17 por ciento con educación secundaria; 27 por ciento con educación preparatoria y 3 por ciento con estudios profesionales.

*Tamaño de familia.* Con relación al tamaño promedio de familia, éste asciende a seis, con un promedio de dependientes familiares por productor, de 3.5.

*Emigración.* En dos de cada diez hogares existen miembros familiares que contribuyen al gasto familiar, y en el 7 por ciento de las familias existen miembros familiares que han emigrado a Estados Unidos de manera permanente. La emigración al interior del país, ocurre en el 3 por ciento de los hogares, siendo la principal ciudad destino el Distrito Federal.

*Financiamiento y organización.* Las fuentes de financiamiento utilizadas en la agricultura provienen del Programa de Apoyo al Campo (PROCAMPO), que otorga un apoyo por hectárea o fracción de ésta a la superficie elegible, inscrita en el Directorio del PROCAMPO, y que esté sembrada con cualquier cultivo lícito o que se encuentre bajo proyecto ecológico autorizado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). El apoyo se entrega a los productores que acrediten ser propietarios o poseedores de buena fe o en posesión derivada (en arrendamiento, usufructo, aparcería) de predios con superficies elegibles en explotación inscritos en el PROCAMPO.

Otra fuente financiera se canaliza mediante Financiera Rural, cuyo objetivo es Propiciar condiciones para la recuperación del nivel de vida en el medio rural mediante la oferta de financiamiento, asesoría y capacitación, en beneficio de los productores rurales, sobre todo a través de entidades intermediarias que aseguren el impacto en ellos.

*Organización para la producción.* Del total de productores encuestados 83 por ciento trabajan por cuenta propia con su familia, y el resto de manera grupal o en cooperativa. La mano de obra empleada en los predios es fundamentalmente familiar; sin embargo, en el 63 por ciento de los

predios se ocupa mano de obra contratada durante un promedio temporal de 7 meses y medio del año.

*Disponibilidad de vehículos y tractores.* Tres cuartas partes de los productores encuestados disponen de camionetas con capacidad menor de dos toneladas; 37 por ciento con camiones de más de dos toneladas; y el 60 por ciento cuenta con tractor para realizar labores de preparación del terreno (de manera particular o en un grupo).

*Otras actividades productivas.* Un 37 por ciento de los productores, aparte de la actividad agropecuaria realizan otras actividades como: la construcción de viviendas, maquila de maquinaria agrícola, copiadores de productos agropecuarios, abogacía, producción de pulque, curtidor de pieles, entre otras.

## **Agricultura**

De la superficie agrícola registrada el 87 por ciento se maneja como agricultura de temporal, y el resto se atiende con agua de riego. De éste 13 por ciento de superficie bajo riego, una cuarta parte se irriga con agua proveniente de presas locales ubicadas en la cuenca del río Zahuapan y el resto con agua extraída de pozos profundos.

De la tierra sembrada, el 59 por ciento se hace por el propio dueño; el 16 por ciento mediante tierras rentadas, y el 25 restante se siembra a medias y con tierras prestadas.

De la superficie que se levantó información, el 42 por ciento pertenece al sector ejidal y el resto a la propiedad privada.

Bajo agricultura de temporal se siembran los siguientes cultivos:

*Maíz grano.* Del cual la superficie promedio por productor asciende a 9.3 hectáreas y destinan 56 por ciento al autoconsumo y el resto para el mercado local, donde recibieron para el año 2007 un precio promedio por tonelada de 8,022.00 pesos.

*Maíz forrajero.* Sembrado por el 20 por ciento de los productores, registrándose un rendimiento promedio en verde de 33.3 toneladas por hectárea. El 70 por ciento de la producción se destina al autoconsumo.

*Papa.* Sembrado por dos de cada diez productores, registrando una superficie sembrada promedio por productor de ocho hectáreas y un rendimiento de 24 toneladas/ha/productor.

*Trigo.* Cultivado por tres de cada diez productores de la zona en una superficie promedio por productor de 34 hectáreas. El cultivo se practica en el ciclo primavera-verano, pues las temperaturas prevalecientes en la zona así lo permiten; no así en el ciclo otoño-invierno, por

las bajas temperaturas. El rendimiento reportado fue de 3.6 toneladas por hectárea. Se destina mayormente al mercado local, donde recibieron un precio de 9,500.00 pesos la tonelada.

Bajo agricultura de riego los cultivos más comúnmente sembrados en el ciclo primavera verano son: avena, maíz, canola, alfalfa, cebolla, cilantro, rábano y tomate.

### Ganadería

La proporción de productores con algún tipo de ganado se muestra en el Cuadro 2.5, de donde se deduce que las especies animales más comunes entre los productores son las gallinas y guajolotes, seguidas por ovinos, porcinos y ganado bovino.

### Características técnicas – socioeconómicas de los productores de la parte media de la cuenca del Río Zahuapan.

Este apartado se refiere al área de influencia del CADER San Cosme situado en la parte media de la cuenca del Río Zahuapan.

**Cuadro 2.5. Proporción de productores por tipo de especie animal que poseen.**

Tipo de ganado	Proporción de productores (%)
Becerro	50
Toros	20
Vacas	20
Porcinos	20
Gallinas	60
Guajolotes	50
Ovinos	63

### Aspectos socioeconómicos

*Edad del productor.* Los productores se encuentran en un promedio de edad de 54 años, fluctuando de 30 a 78 años. El número promedio de años como productores reportado fue de 35.1 años, en un rango de 59 años como máximo y 5 como mínimo.

*Alfabetismo.* De los productores encuestados el 6.7 por ciento no sabe leer ni escribir, del resto el 83.3 por ciento dio información con respecto al nivel de estudios, de los cuales, el 40 por ciento terminó sus estudios de primaria, el 16 por ciento la secundaria completa y 8 por ciento

la universidad; el 36 por ciento no concluyó sus estudios en los diferentes niveles (24% primaria, 8% secundaria y 4% preparatoria).

*Tamaño de familia.* Las familias de los productores varían de entre 2 y 13 elementos, registrándose un promedio de 7. El número de dependientes económicos, fluctúan entre 1 y 11 con un promedio de 3.9 elementos por familia.

*Dependencia familiar y emigración.* De las 30 familias encuestadas 9 cuentan con miembros que contribuyen con el gasto familiar, oscilando entre 1 y 4 elementos por familia. En el 10 por ciento de las familias existen miembros que han emigrado a Estados Unidos de manera permanente, de los cuales el 5 por ciento envían apoyos económicos. La emigración hacia diferentes destinos al interior del país ocurre en el 13 por ciento de los hogares.

*Crédito y aseguramiento.* Para la realización de sus actividades agropecuarias, los productores reportaron que recurren a fuentes de financiamiento como FIRA, Financiera Rural Capitalizada, FONTLAX, Scotiabank.

*Organización para la producción.* Para la realización de sus actividades, la totalidad de los productores señala que trabajan solos o con su familia, aunque el 12 por ciento de ellos indica que pertenece también a un grupo o cooperativa. El 80 por ciento de los productores reporta que, aparte del responsable, trabajan en su unidad de producción un promedio de 2.5 personas sin pago. Así mismo, el 50 por ciento de los productores dicen tener un promedio de 4.3 personas con pago trabajando para ellos en un tiempo promedio de 3.6 meses en el año, fluctuando el número máximo y mínimo de meses entre 1 y 12.

*Afiliación a organizaciones.* El 16 por ciento de los encuestados indica que pertenecen a una unión cooperativa o sociedad. De ellos, el 20 por ciento lo hace con el objetivo de obtener crédito para apoyar a sus actividades en el campo, el 6.3 por ciento se integró a una cooperativa o sociedad para facilitar la compra de insumos para la producción y la transformación de la misma dando a su producto un valor agregado. El 12.5 por ciento lo hizo para obtener otro tipo de apoyos a la producción.

*Disponibilidad de vehículos y tractores.* El 52 por ciento de los productores cuentan con una camioneta con capacidad de dos o menos toneladas, de ellos el 4.3 por ciento tiene dos. El 26 por ciento poseen camiones de más de dos toneladas. El 43.5 por ciento de los encuestados tienen tractores, de los cuales en el período evaluado el 39.1 por ciento de los tractores estaban funcionando.

*Otras actividades productivas.* El 35 por ciento de los productores, aparte de las actividades agropecuarias se dedican a otras actividades como apoyo a su economía familiar. El 4.3 por ciento señala que se dedica a actividades como artesanías y comercio; el 13 por ciento se

dedica al área de la construcción como albañiles, y otro porcentaje igual en actividades como empleados en organizaciones públicas y privadas.

## Agricultura

De la superficie agrícola registrada el 95 por ciento se maneja como agricultura de temporal, y el resto se atiende con agua de riego. De éste 5 por ciento de superficie bajo riego, tres cuartas partes se irriga con agua de escurrimientos pluviales dentro de la cuenca del río Zahuapan y el resto con agua extraída de pozos profundos localizados principalmente en los márgenes del citado río.

De la tierra sembrada, el 71 por ciento la siembra el propio dueño; el 17.5 por ciento como tierras rentadas y el 11.6 restante se siembran a medias y con tierras prestadas. Asimismo, De la superficie de las tierras de las cuales se levantó información, el 40 por ciento son tierras ejidales, el 11.8 son comunales, y el 48.1 por ciento son de propiedad privada.

En San Cosme no se reportan cultivos bajo riego sembrados en el ciclo otoño-invierno del año 2007, pero en el ciclo primavera-verano del mismo año los cultivos sembrados fueron: maíz, lechuga, cilantro, brócoli y trigo.

Bajo agricultura de temporal se siembran los siguientes cultivos: avena, avena forrajera, cebada, haba, maíz forrajero, maíz en grano, papa, trigo y frijol.

*Avena.* El 31 por ciento de los productores del total de los encuestados la cultivan obteniendo en promedio un rendimiento de 1.56 toneladas por hectárea, destinando un 87.7 por ciento al autoconsumo. Se cultiva en el ciclo primavera-verano en un 77.8 por ciento, el resto en el ciclo otoño-invierno. Un productor de cada nueve utiliza además del tractor animales de tiro para las labores de cultivo.

*Avena forrajera.* Se cultiva por el 6.9 por ciento del total de los productores con un rendimiento promedio de 8.6 toneladas por hectárea en el ciclo primavera-verano, destinando la totalidad de la producción al autoconsumo.

*Cebada.* El 10.3 por ciento de los productores la cultivan con un rendimiento de 2.17 toneladas por hectárea en el ciclo primavera-verano. El 25 por ciento de la producción se comercializa con un ingreso promedio de 4,150.00 pesos por hectárea. No utilizan semilla mejorada y aplican fertilizantes químicos, herbicidas o insecticidas y reciben asistencia técnica gratuita. Utilizan tractores en el proceso de cultivo y el 50 por ciento reporta el uso adicional de animales de tiro en el mismo.

*Haba.* Se cultiva por el 13.8 por ciento de los productores encuestados con un rendimiento de 0.6 toneladas por hectárea en el ciclo primavera-verano. El 70 por ciento de la producción se destina al autoconsumo. El ingreso promedio es de 4,233.00 pesos por hectárea vendida.

*Maíz forrajero.* El 3.45 por ciento de los productores cultivan el maíz forrajero con un rendimiento promedio de 2 toneladas por hectárea. Se utiliza para autoconsumo.

*Maíz de grano.* Se cultiva por el 82.8 por ciento de los productores con un rendimiento promedio de 1.8 toneladas por hectárea en el ciclo primavera-verano. El 32 por ciento de la producción se comercializa con un promedio de 4,189.00 pesos por hectárea.

*Papa.* Se cultiva por el 3.45 por ciento de los productores con un rendimiento de 15 toneladas por hectárea en el ciclo primavera-verano, con un autoconsumo del 50 por ciento. Se obtienen ingresos de 15,000.00 pesos por hectárea. En el proceso de cultivo utilizan fertilizantes químicos y herbicidas, así como animales de tiro.

*Trigo.* Uno de cada diez productores lo cultivan con un rendimiento de 2 toneladas por hectárea en el ciclo primavera-verano. Se comercializa el 27 por ciento de la producción a razón de 5,600.00 pesos por hectárea en promedio. El 33 por ciento de los productores de trigo utilizan semilla mejorada; todos aplican fertilizantes químicos y herbicidas; dos de cada tres productores usan además abonos naturales. Para el manejo de los terrenos y el proceso de cultivo el 66.6 por ciento usa tractor y el resto animales de tiro.

*Frijol.* En el ciclo primavera-verano, el 6.9 por ciento de los productores cultivan el frijol con un rendimiento promedio de 0.28 toneladas por hectárea utilizado en un 100 por ciento al autoconsumo. El cincuenta por ciento de los productores de frijol utilizan para el mejoramiento del suelo fertilizantes químicos y herbicidas; y para la labranza, usan tanto tractor como animales de tiro.

## **Ganadería**

La proporción de productores con algún tipo de ganado se muestra en el Cuadro 2.6 en el cual se observa el orden de preferencia. El ganado avícola (gallinas) y equino en primer lugar, seguidos por ganado bovino, avícola (guajolotes) y equino (mulas y machos). Aquí podemos observar también que la proporción de productores que crían animales de carga y tiro es alta.

## **Características técnicas – socioeconómicas de los productores de la parte baja de la cuenca del Río Zahuapan.**

Este apartado se refiere al área de influencia del CADER Iztacuixtla situado en la parte baja de la cuenca del Río Zahuapan.

**Cuadro 2.6. Proporción de productores que poseen especies animales en el CADER San Cosme, Tlaxcala, 2008.**

Tipo de ganado	Proporción de productores (%)
Gallinas	34.0
Caballos y yeguas	34.0
Vacas	31.0
Guajolotes	31.0
Mulas y machos	31.0
Becerras	20.7
Porcinos	21.0
Toros	10.3
Burros	7.0
Patos	6.9
Pollos de engorda	3.4
Chivos	3.4

### Aspectos socioeconómicos

*Edad del productor.* El rango de edad de los productores fluctúa entre 38 y 78 años, siendo el promedio de 59 años. El número promedio de años como productores fue de 40, siendo 15 y 60 los años mínimo y máximo.

*Alfabetismo.* De esta muestra de productores, el tres por ciento no sabe leer ni escribir y de los que sí saben el 55 por ciento cuenta con educación primaria; 27 por ciento con educación secundaria; 14 por ciento con educación preparatoria y 5 por ciento con estudios profesionales.

*Tamaño de familia.* Con relación al tamaño promedio de familia, éste asciende a siete, con un promedio de dependientes familiares por productor, de tres.

*Dependencia familiar y emigración.* En 2 de cada 10 hogares existen miembros familiares que contribuyen al gasto familiar, y en el 10 por ciento de las familias existen miembros familiares que han emigrado a Estados Unidos de manera permanente.

La emigración al interior del país, ocurre en dos de cada diez hogares, siendo las principales ciudades destino el Distrito Federal (66.67%), Michoacán (16.7%) y Puebla (16.7%).

*Organización para la producción.* Del total de productores encuestados 93 por ciento trabajan por cuenta propia con su familia, y el resto de manera grupal o en cooperativa. La mano de obra empleada en los predios es fundamentalmente familiar. En promedio ocupan dos personas más, aparte del jefe de familia.

Un tercio de las unidades productivas ocupan mano de obra pagada, sobre todo en las épocas de alta demanda de trabajo por el cultivo (cosecha, siembra, riegos, etc.). El tiempo promedio de ocupación de éste tipo de mano de obra es de 6 meses cada año.

*Disponibilidad de vehículos y tractores.* Dos tercios de los productores encuestados disponen de camionetas con capacidad menor de 2 toneladas; 14 por ciento con camiones de más de 2 toneladas; y la mitad cuenta con tractor para realizar labores de preparación del terreno (de manera particular o en un grupo).

*Otras actividades productivas.* La actividad más común, complementaria a las agropecuarias a que se dedica el productor agropecuario es el comercio; de esta manera, 3 de cada 10 productores se dedican a ello. Otra actividad la constituye la construcción de viviendas; a la cual se dedica el 3 por ciento de los productores. 10 por ciento de los productores encuestados se dedica además a la actividad textil.

## **Agricultura**

De la superficie agrícola registrada el 39 por ciento se maneja como agricultura de temporal, y el resto 61 por ciento se atiende con agua de riego. De éste 61 por ciento de superficie bajo riego, el 79 por ciento se irriga con agua proveniente del río Zahuapan (donde fluyen las aguas negras tratadas y no tratadas, provenientes de las ciudades de Tlaxcala, Apizaco y otras poblaciones) y el resto con agua extraída de pozos profundos localizados principalmente en las márgenes del citado río.

De la tierra sembrada, el 86.2 por ciento es sembrada por el propio dueño; el 9 por ciento como tierras rentadas y el 4.8 por ciento restante se siembran a medias y con tierras prestadas. Asimismo, el tipo de tenencia de la tierra es ejidal (33%) y pequeña propiedad privada (67%).

De la superficie total de la cual se levantó información, el 33 por ciento pertenece al sector ejidal y el resto a la propiedad privada.

Los cultivos más comúnmente sembrados en el ciclo primavera verano y que son auxiliados con riego son: avena, maíz, canola, alfalfa, cebolla, cilantro, rábano y tomate. A continuación se describe cada uno de ellos.

*Avena.* Se siembra por el 3 por ciento de los productores, y de acuerdo al INEGI (2007a), el rendimiento promedio en el CADER Iztacuixtla asciende a 14.3 toneladas por hectárea al año, siendo un cultivo registrado para el ciclo primavera-verano, atendido con agua derivada

del río Zahuapan y con agua de pozo profundo. De acuerdo con los informantes encuestados, al cultivo le aplican una lámina de riego de 25 centímetros, lo cual ocurre normalmente en el establecimiento, las lluvias que ocurren en la zona ayudan a que el cultivo concluya sin problema su ciclo productivo. Los productores destinan el 100 por ciento de la producción de avena a la alimentación de su ganado.

Si se considera el rendimiento y lámina de riego aplicada a la avena forrajera reportados por el productor, se obtiene un producto promedio del agua de 5.7 kilogramos por metro cúbico de agua. Sin embargo, si se consideran los rendimientos reportados por INEGI (2007a), que son de 17.58 toneladas por hectárea, dicho indicador se elevaría a 7.03 kilogramos por metro cúbico de agua. En términos de valor, dicho indicador sería de 1.85 y 2.28 pesos por kilogramo de avena forrajera verde considerando el rendimiento reportado por el productor y el reportado por INEGI, respectivamente.

*Maíz.* Este cultivo se siembra por siete de cada diez productores y el rendimiento reportado por los productores asciende a 2.9 toneladas por hectárea, el mismo que el reportado por INEGI (2007a). Es un cultivo del ciclo primavera-verano atendido con agua derivada del río Zahuapan y con agua de pozo profundo. La lámina de riego aplicada al cultivo es de 16 centímetros, lo cual ocurre normalmente en el establecimiento, las lluvias que ocurren en la zona ayudan a que el cultivo concluya sin problema su ciclo productivo. Al riego aplicado en el establecimiento del cultivo se le conoce como “riego de punta”. Los productores destinan el 100 por ciento de la producción del maíz a la alimentación de su ganado.

Si se considera el rendimiento y lámina de riego aplicada al maíz grano reportados por el productor, se obtiene un producto promedio del agua de 1.80 kilogramos por metro cúbico de agua. Sin embargo, si se consideran los rendimientos reportados por INEGI (2007a), que son de 3.1 toneladas por hectárea, dicho indicador se elevaría a 1.93 kilogramos por metro cúbico de agua. En términos de valor, dicho indicador sería de 4.15 y 4.45 pesos por kilogramo de forraje verde considerando el rendimiento reportado por el productor y el reportado por INEGI, respectivamente.

*Canola.* Su cultivo apoya la alimentación del ganado por su alto contenido de lípidos y de proteínas y se cultiva por un bajo porcentaje de productores (3%). El rendimiento reportado por INEGI en el año 2007, fue de 600 kilos por hectárea. Destinado el 100 por ciento de la producción al autoconsumo. Es un cultivo del ciclo primavera-verano atendido con agua derivada del río Zahuapan y con agua de pozo profundo.

En este cultivo no se estimó el producto medio del agua debido a que no se registró la lámina de riego aplicada al mismo.

*Alfalfa.* Se cultiva por nueve de cada diez productores, quienes reportan un rendimiento anual promedio de 24 toneladas por hectárea, diferente al reportado por INEGI, que para el año 2007

afirma fue de 51 toneladas por hectárea. Se riega con agua de pozo principalmente, ya que se destina a la alimentación del ganado bovino de leche. La lámina de riego aplicada al año es de 43 centímetros y se cosecha forraje sólo de los meses de abril a octubre, pues el clima prevalente de noviembre a marzo no lo permite por las bajas temperaturas que se registran. Se destina fundamentalmente al autoconsumo; es decir, el productor lo usa para alimentar su ganado.

Si se considera el rendimiento y lámina de riego aplicada a la alfalfa, reportados por el productor, se obtiene un producto promedio del agua de 5.58 kilogramos por metro cúbico de agua. Sin embargo, si se consideran los rendimientos reportados por INEGI (2007a), que son de 51 toneladas por hectárea, dicho indicador se elevaría a 11.86 kilogramos por metro cúbico de agua. En términos de valor, dicho indicador sería de 2.40 y 5.20 pesos por kilogramo de alfalfa en verde considerando el rendimiento reportado por el productor y el reportado por INEGI, respectivamente. La productividad física y económica del cultivo de alfalfa en verde reportada por Orona, et al., (2008) para el Valle de León, Guanajuato es similar que la encontrada en ésta zona.

*Hortalizas.* Los cultivos de éste tipo en la zona son: cebolla, cilantro, rábanos y tomate. Se practican en el período primavera-verano y se siembran fundamentalmente para venderse en el mercado local y de la Ciudad de México.

Cabe destacar que aunque existen predios irrigados sólo con agua de pozo profundo, prevalece el uso de las aguas del Río Zahuapan, situación no deseable para los consumidores de estas hortalizas, ya que buena parte del volumen de agua que escurre por el río proviene de las aguas negras generadas por poblados y ciudades. Los rendimientos registrados por INEGI en el año 2007 para estos cultivos son de 23, 4, 8 y 12.4 toneladas por hectárea para cebolla, cilantro, rábanos y tomate, respectivamente.

Considerando los rendimientos promedio reportados por el INEGI en el año 2007 para el estado de Tlaxcala, y las láminas de riego aplicadas por el productor de hortalizas, el producto medio del agua de riego para cebolla y cilantro es de 3.2 y 0.57 kilos por metro cúbico de agua aplicada. Sin embargo, cabe señalar que no se considera la lámina de riego completa, sino sólo la aplicada con agua de pozo profundo, ya que una vez iniciado el período de lluvias se riega con aguas provenientes del río Zahuapan, por lo cual, si se contabilizara el volumen total aplicado, seguramente ello significaría un menor producto promedio por metro cúbico de agua utilizado en estos cultivos. Para los cultivos de rábano y tomate no se estimó esta medida debido a que no se captaron en campo láminas de riego aplicadas al cultivo.

#### *Agricultura de temporal*

Bajo la condición de cultivos de temporal, es decir, donde se utiliza sólo la precipitación natural, se reportan los siguientes cultivos: maíz, alfalfa, avena y rábano, mismos que a continuación se describen.

*Maíz.* Este cultivo, bajo condiciones de temporal se siembra por 6 de cada 10 productores que obtienen un rendimiento promedio por hectárea de dos toneladas; es decir, una tercera parte menos que lo obtenido bajo condiciones de riego. La superficie promedio sembrada por productor asciende a 2.5 hectáreas y del total de producción destinan 92 por ciento al autoconsumo y el resto para el mercado local.

*Avena.* Se siembra bajo condiciones de temporal por el 3 por ciento de los productores de la zona y su producción se utiliza para satisfacer las necesidades de alimentación del ganado bovino. El rendimiento obtenido se desconoce debido a que se carece de cultura para registrarlo pues normalmente cortan cuando tienen necesidad de forraje. La tecnología de producción utilizada bajo condiciones de temporal en avena es la misma que la descrita para avena de riego respecto al uso de semillas, agroquímicos y fuerza de tracción mecánica y animal.

*Rábano.* Al igual que el cultivo de avena, éste se siembra por una baja proporción de productores durante el período primavera-verano bajo condiciones de temporal debido a que la precipitación que ocurre en la zona posibilita esta situación. Su producción se destina al mercado local y los rendimientos alcanzados bajo condiciones de temporal se desconocen por los productores que lo siembran. Bajo una situación de riego, INEGI reporta 8 toneladas por hectárea.

*Alfalfa.* Este cultivo se siembra por el 2 por ciento de los productores del CADER Iztacuitla bajo condiciones de temporal, dado que la precipitación regional (de alrededor de 900 mm anuales) lo permite. Sólo en las épocas secas y frías el cultivo queda sometido a estrés hídrico intenso, por lo que hay baja producción (meses de noviembre a marzo). Debido a que el cultivo es de autoconsumo, el productor ignora el rendimiento logrado por hectárea anualmente, ya que corta conforme tiene necesidad de forraje pues el cultivo es para satisfacer las necesidades propias de su ganado.

## **Ganadería**

*Ganado bovino.* Del total de productores encuestados el 97 por ciento se dedica a la actividad ganadera. El promedio de ganado bovino por productor es de 14 animales con un valor máximo de 60 y un mínimo de cinco. La característica del manejo del ganado es que el total se encuentra bajo condiciones estabuladas; es decir, no se pastorea.

La tecnología de producción indica que el 100 por ciento del ganado es atendido con desparasitadores externos e internos. Tres de cada cuatro animales son alimentados complementando su dieta con sales minerales y al 93 por ciento del ganado se le suministran alimentos o raciones balanceadas para la producción de leche. La ordeña se realiza de manera mecanizada por el 50 por ciento de los productores y el resto de forma manual, y en la reproducción del ganado, una de cada cinco vacas son inseminadas por monta animal directa y el resto artificialmente con semen de razas especializadas en la producción de leche para mantener la producción, la cual se reporta en promedio de 16.4 litros por día.

El número promedio de vacas ordeñadas por productor es de 8 y el precio de venta por litro es de 4.00 pesos, de donde se deriva que por concepto de leche los ingresos promedio del productor ascienden a 524.80 pesos por día.

Además de ingresos por leche, obtienen también por venta de becerros y vacas de desecho. El kilo de carne de becerro en pie registró un precio promedio de 30.80 pesos; el de vaca de desecho de 28.00 pesos; el de porcinos 20.80 pesos el kilo en pie; una gallina a 47.50 pesos, y un guajolote a 250.00 pesos. La proporción de productores con algún tipo de ganado se muestra en el Cuadro 2.7, de donde se deduce que las especies animales más comunes entre los productores son las gallinas y guajolotes, seguidas por ovinos, porcinos y ganado bovino.

**Cuadro 2.7. Proporción de productores por tipo de especie animal que poseen.**

Tipo de ganado	Proporción de productores (%)
Becerro	17
Toros	17
Vacas	35
Porcinos	62
Gallinas	97
Guajolotes	86
Ovinos	38

## CONCLUSIONES

El estado de Tlaxcala a pesar de representar el 0.2 por ciento de la superficie nacional participa con el 0.6 por ciento del Producto Interno Bruto Nacional.

Las actividades económicas que mayor crecimiento presentaron fueron: la división de electricidad, agua y gas, y el sector agropecuario. Por su parte, la industria manufacturera, a pesar de una mayor aportación a PIB creció solamente 7 por ciento de 1999 a 2004. Dentro del PIB manufacturero, la división industrial alimentos, bebidas y tabaco tiene la mayor participación (22.2% en 2004); sin embargo, ésta disminuyó aproximadamente 6 por ciento en comparación a 1999.

Los textiles y prendas de vestir, así como la industria del cuero, registraron un crecimiento neto de 2.8 por ciento en el mismo periodo. A pesar que las unidades económicas registradas como industrias manufactureras, representan el 14.4 por ciento del total, éstas emplean al 39.5 del personal ocupado.

Por otro lado, el agua para uso agropecuario requiere un promedio del 85 por ciento de las aguas superficiales y arriba del 50 por ciento de aguas subterráneas; mientras que alrededor del 37 por ciento de las aguas subterráneas son requeridas en el abasto público. Con respecto a la industria autoabastecida, esta se mantiene con un 7 por ciento del total del volumen del agua concesionada para cada año. Por lo tanto, de acuerdo con los valores de producción de la industria, la productividad del agua ( $\$/m^3$ ) alcanzada por la industria en Tlaxcala para el año 2008 fue de 1,179.50 pesos, mientras que la estimada para uso agrícola fluctuó entre 1.93 y 5.00 pesos para los cultivos de maíz grano y alfalfa, respectivamente.

## LITERATURA CITADA

- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2006. Estadísticas del Agua en México, Edición 2006. SEMARNAT, Comisión Nacional del Agua, México, D. F. 240 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2007. Estadísticas del Agua en México, Edición 2007. SEMARNAT, Comisión Nacional del Agua, México, D.F. 259 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2008. Estadísticas del Agua en México, Edición 2008. SEMARNAT, Comisión Nacional del Agua, México, D.F. 228 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2009. Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y tratamiento de aguas residuales en operación. México. 29 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2010. Estadísticas del Agua en México, Edición 2010. SEMARNAT, Comisión Nacional del Agua, D.F. 250 p.
- Daily, G. C. 1997. Nature`s Services. Societal dependence on natural ecosystems. Island Press, Washington, D.C., USA.
- Elvira Q., J. R. 2006. El Cambio de uso de suelo y sus repercusiones en la atmósfera. pp. 191-194. In: Urbina S., J. y J. Martínez F. (Compiladores). Más allá del cambio climático. Las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global. Algunos peligros del cambio climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología – Universidad Nacional Autónoma de México (SEMARNAT-INE-UNAM). 287 p.
- Espejel, R., A. y G. R. Carrasco. 1999. El deterioro ambiental en Tlaxcala y las políticas de desarrollo estatal 1988-1999. Gaceta Ecológica 52: 21-52. INE-SEMARNAT, México.

- Espejel, R., T. González y D. Perón. 2005. El índice de deterioro ambiental en los municipios de Tlaxcala: una propuesta metodológica. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. (online) 2005. México. Consultado en: <http://seminario de investigacion\protocolo\Instituto Nacional de Ecologia.htm> (Julio de 2009).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. XII Censo General de Población y Vivienda 2000. <http://www.inegi.gob.mx>. (Mayo de 2010).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2004. Sistema Automatizado de Información Censal (SAIC® 5.0). Censos económicos 2004. Consultado en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/censos/ce2004/saic.asp> (Octubre de 2010).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005. II Conteo de Población y Vivienda 2005. Revisado en <http://www.inegi.gob.mx>. (Julio de 2010).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2006. Sistema para la Consulta del Anuario Estadístico del Estado de Tlaxcala, Edición 2006 Consultado en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/aee06/estatal/tlax/index.htm>. (Julio de 2008).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007a. Banco de Información Económica. 2000-2008. Producto Interno Bruto por Entidad Federativa. Consultado en: [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx) (11 de junio de 2007).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007b. II Conteo de Población y Vivienda 2005. Versión disco compacto.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007c. Sistema para la Consulta del Anuario Estadístico del Estado de Tlaxcala, Edición 2007. Consultado en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee07/estatal/tlax/index.htm> (Julio de 2008).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2008a. Marco Geoestadístico Municipal, Versión Digital 3.1.1.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2008b. Sistema para la Consulta del Anuario Estadístico de Tlaxcala, 2008. Consultado en <http://www.tlaxcala.gob.mx/copladet/anuario/2008/aee.htm>.(Julio de 2009).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010. Portal de Internet del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. El INEGI en su entidad. Tlaxcala. Consulta en: <http://www.inegi.org.mx>. (Julio de 2010).

- Lambin, E. F., B. L. Turner, J. Helmut, S. B. Geist, S. B. Agbola, A. Arild, J. W. Bruce, O. T. Coomes, R. Dirzo, G. Fischer, C. Folke, P. S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemans, X. Li, E.F. Moran, M. Martimore, P. S. Ramakrishnan, J. F. Richards, H. Skanes, W. Steffen, G.D. Stone, U. Svedin, T. Veldkamp, A. Vogel and C. J. Xu. 2001. The cause of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* 11:261-269.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). 2001. *Environmental Indicators for Agriculture. Methods and Results, Volume 3*. Paris, France. 409 p.
- Orona C., I., F. Domínguez P., J. Estrada A., R. Zúñiga T., M. Rivera G., E. Salazar S., y M. Fortis, H. 2008. Productividad del agua en las actividades productivas del Municipio de León, Guanajuato, México. *Revista Agrofaz*, Vol. 8, No. 3. pp. 57-66.
- Rivera G. M., J. Estrada A., R. Trucios C., J. L. González B., J. A. Muñoz V., y L. M. Valenzuela N. 2008. Caracterización físico química y biológica de las aguas residuales tratadas del estado de Tlaxcala. *Revista Agrofaz*, Vol. 8, No. 3. pp. 41-48.
- Sepúlveda, J. 2007. Aumento de la sobrepoblación en menores de cinco años en México: la estrategia diagonal. *Salud Pública de México*. Vol. 49, suplemento 1. 10 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2009. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. *Compendio de estadísticas ambientales*. México. 2008. pp. 358.
- Vitousek, P. M., H. A. Mooney, J. Lubchenco and J. M. Melillo. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277:494-499. World Resources Institute. 2000. *A guide to world resources 2000-2001: People and Ecosystems, The Fraying Web of Life*. Washington DC. 24 p.





José Villanueva Díaz  
Julián Cerano Paredes  
Juan Estrada Ávalos  
Vidal Guerra De la Cruz  
David W. Stahle  
Vicenta Constante García  
Prisma Ruiz Aguilar  
Gabriel F. Cardoza Martínez  
Omar A. Palacios Villa

## **CAPÍTULO III**

**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD  
HIDROCLIMÁTICA EN EL ESTADO DE  
TLAXCALA, MÉXICO**



## INTRODUCCIÓN

El estudio histórico del clima es un aspecto básico para entender y hacer inferencias sobre el clima del futuro. La información meteorológica, específicamente de la precipitación registrada por instrumentos de medición en la red de estaciones es relativamente de corta extensión, en algunas ocasiones inferior a 20 años y los registros más completos para algunos estados de México no sobrepasan 80 años (IMTA, 2000).

Los anillos de crecimiento de los árboles son la fuente indirecta o *proxy* de resolución anual que se puede utilizar para estudiar las condiciones hidroclimáticas del pasado, aprovechando, la gran longevidad de algunas especies de árboles, lo que permite adentrarse en el pasado por varios cientos de años e inclusive milenios (Fritts, 1976).

El estado de Tlaxcala, ocupa el primer lugar de nuestro país en deterioro ambiental, ya que, entre otras cosas, sólo conserva el 17% de su vegetación original (Espejel *et al.*, 2005). Durante las últimas décadas del siglo XX y principios del siglo XXI, se incrementaron en esta región los problemas de erosión de suelo, deforestación de bosques, contaminación del agua, aire y pérdida de la biodiversidad. Mención especial merece la situación del agua en la entidad, pues en los últimos 30 años se ha agotado el 80% de los 230 manantiales que existían y muchos de los afluentes, se confinan en represas con fines agrícolas principalmente, situación derivada del incremento en la demanda de este recurso, que se estima ha sido de más del 600% (Espejel *et al.*, 2005).

En el pasado reciente, el estado de Tlaxcala contaba con 350,000 ha de bosque, para 1949, se había reducido a 108,000 ha, de las cuales en la actualidad se reportan sólo 52,683 ha, que representan 13.11% de la superficie estatal (4,016 km<sup>2</sup>). De esta superficie, solamente 16,433 ha de bosque se encuentran bajo protección y se localizan en su mayoría en el área del parque nacional *La Malinche* y el resto (36,250 ha) no reciben ninguna protección (Espejel y Carrasco, 1999; Guerra *et al.*, 2007).

La deforestación origina serios impactos ecológicos y sociales, ya que los bosques actúan como reguladores del ambiente y son la principal fuente de materia prima (celulosa) para la industria local (Guerra *et al.*, 2007). Por ello, es necesario planificar las actividades relacionadas con los aprovechamientos forestales que permita auditar y vigilar la masa forestal que no cuenta con un programa de manejo basado en estrategias de desarrollo sustentable.

Por lo anterior, es importante generar conocimiento sobre la variabilidad hidroclimática en las áreas boscosas remanentes, que por su gran importancia en el flujo superficial del agua y recarga de los acuíferos en la zona, se deben conservar. La información paleo-climática permite derivar conocimiento histórico sobre la variabilidad hidroclimática, la presencia de eventos climáticos extremos, su ciclicidad en el tiempo e impacto de patrones atmosféricos circulatorios; de esta manera, se estará en posibilidad de desarrollar programas de aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos disponibles y planear el uso del agua en escenarios climáticos venideros producto del calentamiento global. El objetivo de este estudio fue determinar la variabilidad hidroclimática en el estado de Tlaxcala y el efecto de patrones de circulación general como es el caso del fenómeno del Niño-Oscilación del Sur.

## METODOLOGÍA

### Localización de los sitios de muestreo

Se seleccionaron tres sitios de muestreo, uno en la parte oriental del estado, que corresponde a Santa María de las Cuevas, del municipio de Alzayanca, otro en la parte sur, perteneciente al Parque Nacional *La Malinche* y un tercer sitio *Villareal*, localizado al noreste del estado de Tlaxcala en el municipio de Terrenate. Los sitios se seleccionaron por ser áreas que constituyen desde el punto de vista ecológico, zonas importantes para la recarga de los mantos acuíferos y principalmente por presentar arbolado con potencial para la generación de series paleoclimáticas, de utilidad para analizar la variabilidad del clima en los últimos siglos.

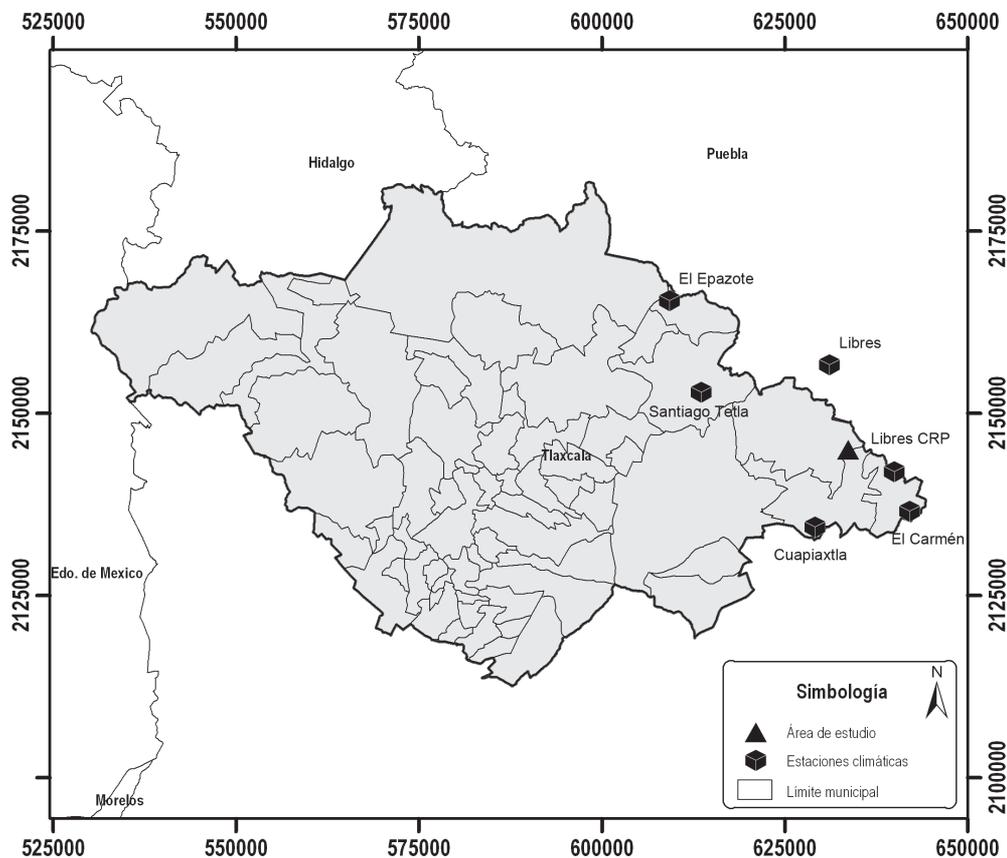
El ejido de Santa María de las Cuevas, municipio de Alzayanca, se encuentra localizado en la porción oriental del estado de Tlaxcala ( $19^{\circ} 23' 41.4''\text{N}$ ,  $97^{\circ} 43' 34.5''\text{W}$ ), a una elevación de 2,582 m (Figura 3.1). En el sitio, la vegetación dominante es el pino piñonero (*Pinus cembroides* Zucc.) asociado con cactáceas (*Opuntia spp*), yucas (*Yucca spp*), heno y pastos nativos.

El pino piñonero es una especie propia de climas semiáridos y es por ende, de alta sensibilidad climática a fluctuaciones de precipitación, que se denota por crecimientos anuales muy variables en grosor (Constante *et al.*, 2009; Villanueva *et al.*, 2009).

El parque nacional *La Malinche* se ubica al sur del estado de Tlaxcala y forma parte del Eje Neovolcánico Transversal, es el quinto parque con mayor extensión de los 85 parques nacionales existentes en México, comprende una superficie total de 45,852 ha, de las cuales 31,418 ha se encuentran en el estado de Tlaxcala y 14,433 ha en el estado de Puebla (Figura 3.2).

El sitio *Villareal* se localiza en el municipio de Terrenate al noreste del estado en las coordenadas geográficas  $19^{\circ} 32'$  de latitud norte y  $97^{\circ} 53'$  longitud oeste a una elevación de 3,120 m (Figura

3.2). La vegetación es un bosque mixto con presencia de *Pseudotsuga menziesii*, *Abies religiosa* y otras coníferas. Árboles de *Pseudotsuga menziesii* se muestrearon en esta y otras localidades circunvecinas para generar una cronología representativa de toda esta región, con fines de reconstrucción paleoclimática.



**Figura 3.1.** Localización del sitio de muestreo de pino piñonero, Santa María de las Cuevas, Altzayanca, Tlaxcala y las estaciones climáticas empleadas para el análisis dendroclimático.

Las especies estudiadas fueron *Pinus cembroides* para el sitio Santa María de las Cuevas, *Pinus hartwegii* para el sitio La Malinche y *Pseudotsuga menziesii* para la región noreste del estado. El tipo de muestreo utilizado fue selectivo, enfocado particularmente hacia arbolado viejo, no obstante también se incluyó arbolado joven para facilitar el fechado en la parte más reciente de

los crecimientos. Se obtuvieron los núcleos, virutas o incrementos con un taladro de *Pressler* tanto para árboles de *P. cembroides*, *P. hartwegii* y como para *P. menziesii*, se obtuvieron de dos a tres muestras por árbol (Villanueva *et al.*, 2009). El proceso de montado, pulido y fechado de cada uno de los anillos de crecimiento anual se realizó en base a técnicas dendrocronológicas estándar (Figura 3.3) (Stokes y Smiley, 1968; Fritts, 1976).

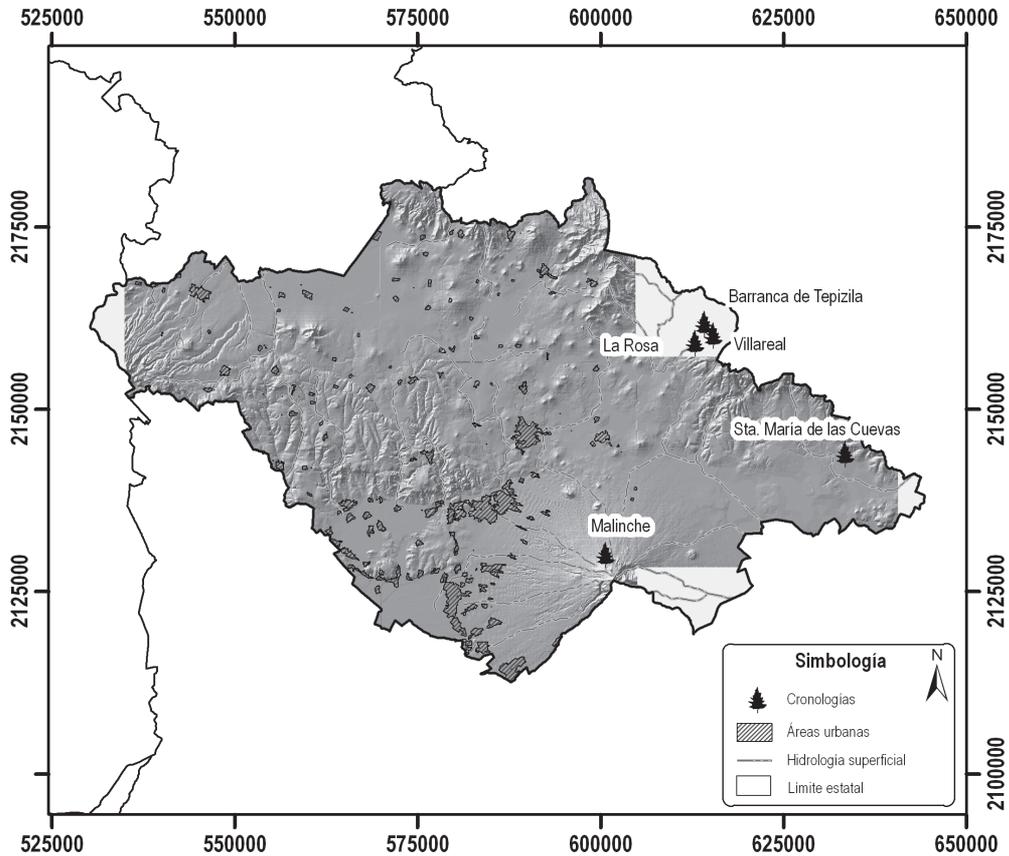
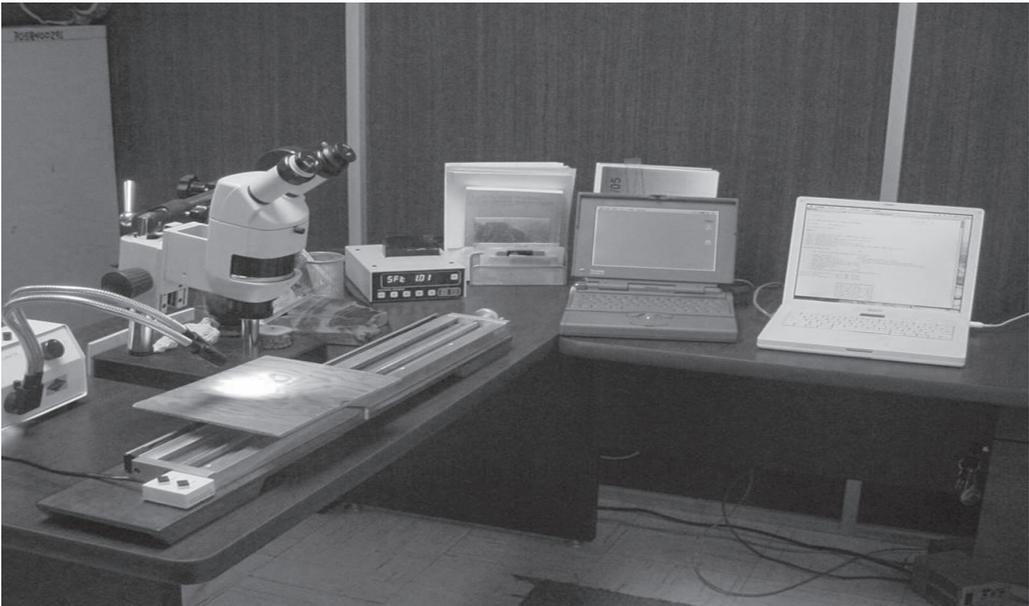


Figura 3.2. Localización de sitios donde se realizaron cronologías para el estado de Tlaxcala.

Posterior al prefchado, asignación de fechas a cada anillo de crecimiento, se midió su anchura anillo por anillo empleando el sistema de medición VELMEX con precisión de 0.001 mm (Robinson y Evans, 1980) (Figura 3.4), generadas las bases de datos se ejecutó el programa COFECHA (Holmes, 1983) para verificar la calidad del fechado y la medición, las series de ancho de anillo se estandarizaron con el programa ARSTAN para generar series de tiempo dendrocronológicas (Cook y Holmes, 1984).



**Figura 3.3. Anillos de crecimiento, *Proxy* para la reconstrucción de series paleoclimáticas. La amplitud de los crecimientos anuales indican las condiciones ambientales de la región donde se desarrolló la especie. Anillos anchos generalmente reflejan buenas condiciones climáticas y crecimientos pequeños condiciones de estrés o baja disponibilidad de humedad.**



**Figura 3.4. Sistema de medición VELMEX, empleado para la medición del ancho de los anillos de crecimiento.**

Las cronologías fueron comparadas con datos de precipitación de estaciones climáticas cercanas, Libres (97° 45' 00'' W, 19° 30' 00'' N), Libres CRP (97° 40' 00'' W, 19° 22' 01'' N), El Epazote (97° 57' 28'' W, 19° 34' 51'' N), Cuapiaxtla (97° 46' 12'' W, 19° 17' 56'' N), El Carmen (97° 38' 49'' W, 19° 19' 04'' N) y Santiago Tetla (97° 55' 01'' W, 19° 28' 01'' N), para Santa María de las Cuevas, que comprenden los registros regionales promedio para el período de 1966 a 2002 (Figura 3.1).

Para *La Malinche* se tomaron los datos climáticos de las estaciones Huejotzingo, Buenavista, Zitlaltepec, San Miguel y Capulac, estaciones más cercanas que comprenden el periodo de 1944 a 2001, para la región noreste se emplearon los datos climáticos de las estaciones Huamantla, Ixtacamaxtitlan, Guadalupe y San Antonio, entre la variable precipitación y los índices de anillo se desarrolló una función de respuesta, para determinar que período de lluvia anual es la que está influyendo en el crecimiento de la especie y se realizaron reconstrucciones estacionales de precipitación. En las reconstrucciones, se determinó la presencia de eventos húmedos, secos, su frecuencia en el tiempo y sus impactos sociales y económicos.

Los datos de precipitación también fueron comparados con los índices de patrones atmosféricos de circulación general, como es el caso del Niño Oscilación del Sur y el fenómeno del Monzón de Norteamérica.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los árboles muestreados de pino piñonero en el rodal del sitio Santa María de las Cuevas fueron relativamente jóvenes con edades en el rango de 50 a 130 años, lo que representa un 94.5% de la población muestreada, el resto (5.5%) estuvo representado por individuos más longevos (Cuadro 3.1).

Los diámetros observados en los ejemplares muestreados, fluctuaron entre 5 y 85 cm y el 91.4% de los árboles mostró diámetros entre 10 y 60 cm (Cuadro 3.2). Se determinó una correlación alta y significativa ( $r = 0.87$   $p < 0.001$ ) entre el diámetro y la edad del árbol, por lo que para esta especie y para este sitio en particular es factible estimar la edad de los individuos de pino piñonero, con base en el grosor de su tronco principal.

### Reconstrucción de la precipitación

Del total de muestras obtenidas, se seleccionaron 51 radios y se generó una cronología de anillo total de 158 años (1850-2008).

**Cuadro 3.1. Clases de edad para los individuos muestreados de *P. cembroides* en Santa María de las Cuevas, Altzayanca, Tlaxcala.**

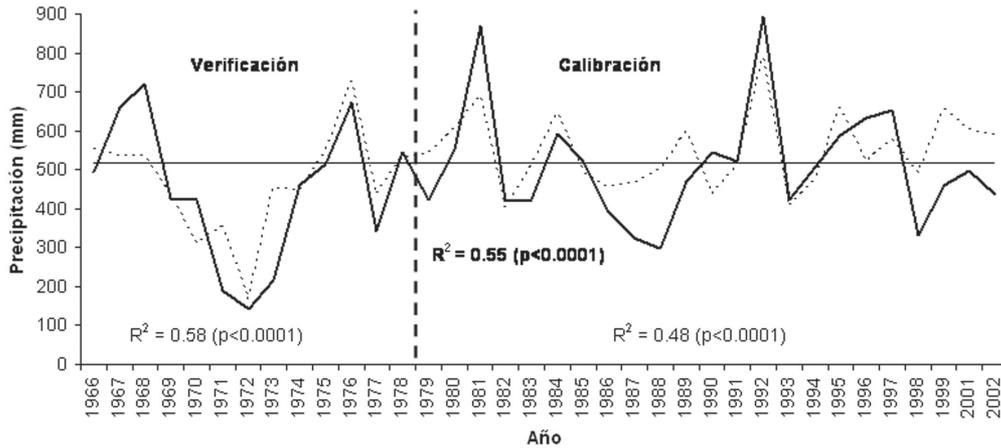
No. de clases	Intervalo de clase	Clases de edad		
		Punto medio de clase	Frecuencia de clase	Frecuencia acumulada
1	< 50	< 50	2	2
2	50 - 70	60	39	41
3	71 - 90	80	32	73
4	91 - 110	100	30	103
5	111 - 130	120	21	124
6	131 - 150	140	3	127
7	151 - 170	160	2	129

**Cuadro 3.2. Clases de diámetro para los ejemplares de *P. cembroides* en Santa María de las Cuevas, Altzayanca, Tlaxcala.**

No. de clases	Intervalo de clase	Clases diamétricas		
		Punto medio de clase	Frecuencia de clase	Frecuencia acumulada
1	1 - 9.9	5	3	3
2	10 - 19.9	15	28	31
3	20 - 29.9	25	30	61
4	30 - 39.9	35	19	80
5	40 - 49.9	45	26	106
6	50 - 59.9	55	15	121
7	60 - 69.9	65	4	125
8	70 - 79.9	75	3	128
9	80 - 89	85	1	129

La cronología indicó una correlación entre series de 0.67 ( $p < 0.001$ ), aceptable para fines de reconstrucción climática. Al correlacionar el índice de ancho de anillo y los datos disponibles de precipitación regional, compuesta por las seis estaciones meteorológicas, se obtuvo una correlación altamente significativa ( $r = 0.74$ ,  $p < 0.001$ ) para la precipitación acumulada anual (enero-diciembre). Para propósitos de reconstrucción, se generó un modelo lineal que permitió reconstruir la precipitación para el período común de los datos observados, los datos fueron calibrados en el subperíodo 1979-2002 y verificados en 1966-1978 (Figura 3.5). El análisis de calibración entre los datos de precipitación reconstruida y los datos de precipitación observada, indicaron una correlación de 0.69 ( $R^2 = 0.48$ ,  $p < 0.001$ ). La verificación indicó una correlación

0.76 ( $R^2 = 0.58$ ,  $p < 0.0001$ ), lo que explica el 58% de la variabilidad de la precipitación para dicho periodo.



**Figura 3.5. Calibración y verificación entre la precipitación total anual reconstruida (línea continua) y la precipitación regional observada (línea punteada).**

Debido a que tanto la calibración como la verificación fueron significativas, se utilizó el periodo total de los datos regionales de precipitación (1966-2002) para propósitos de reconstrucción. La ecuación lineal bivariada mostró una correlación de 0.74 ( $R^2 = 0.55$ ,  $p < 0.0001$ ), es decir que el modelo explica el 55% de la variabilidad en la precipitación anual para esta región, porcentaje considerado como excelente para esta especie (Figura 3.5).

El modelo utilizado para la reconstrucción fue el siguiente:

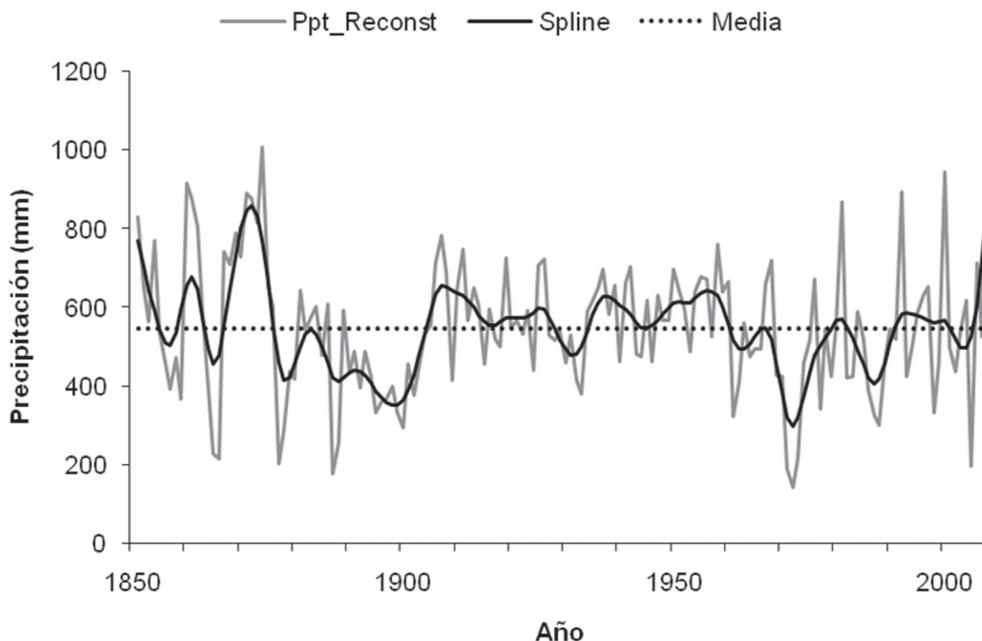
$$Y_t = 254.7054 + 298.1782 * X_t$$

Donde:

$Y_t$  = Valor de precipitación total anual (mm) reconstruido para un año en específico

$X_t$  = Índice de Ancho de Anillo Anual (IAA)

La precipitación reconstruida para el periodo 1850-2008 para la región de Santa María de las Cuevas, muestra gran variabilidad interanual (alta frecuencia), decenal y multidecenal (baja frecuencia) de los valores de precipitación total anual (Figura 3.6).



**Figura 3.6. Reconstrucción de la precipitación anual para la región oriental del estado de Tlaxcala. Valores por debajo de la línea horizontal punteada señalan condiciones de sequía, caso específico las décadas de 1890, 1840, 1980 y 1990.**

Se reconstruyeron sequías de alta intensidad para los periodos: 1855-1860, 1864-1867, 1877-1904, 1929-1934, 1961-1978, 1983-1990 y 2001-2005. De igual manera, se reconstruyeron importantes periodos húmedos, entre los que destacan: 1859-1864, 1867-1876, 1905-1927, 1935-1960, 1979-1982 y 1991-2000.

La reconstrucción muestra dos sequías prolongadas que impactaron la parte oriental del estado de Tlaxcala, 1877-1904 y 1961-1991.

### **Período 1877-1904**

Entre 1875 y 1910 se registraron 17 años de sequía en la región comprendida por los estados de Guanajuato, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala. Se encontró que la incidencia de estas sequías, particularmente en el período 1877 a 1908 tuvo un impacto negativo en la producción nacional de maíz, trigo y frijol (Castorena *et al.*, 1983; García, 1997). Se detalla que esta producción, presentó en 1896 un mínimo parcial, que coincidió con la sequía de ese año, la cual se extendió

para todo el centro y norte de México y que se ha atribuido a la presencia multianual del Niño-Oscilación del Sur en su fase fría (Seager *et al.*, 2009).

El periodo reportado por Castorena *et al.* (1983) como de alta frecuencia de sequías (1875-1910), que afectó el centro del país, incluido el estado de Tlaxcala, coincide de manera notable con el periodo de 1877 a 1905 observado en la presente reconstrucción de precipitación.

Lo anterior se corrobora con otros estudios dendroclimáticos desarrollados para el centro del país. Therrell *et al.* (2006), reconstruyeron las cosechas históricas de maíz para los últimos 527 años (1474-2001). En su investigación, describe el mismo periodo de 1890 a 1903 como de prolongada hambruna, debido a la sequía extrema que impidió la cosecha de cultivos, tal situación, aunada al acaparamiento de alimentos, pudieron haber sido un factor adicional para el levantamiento social, que conllevó al surgimiento de la Revolución Mexicana (Florescano y Swan, 1995).

En general es un período considerado como de sequía nacional, conflictos sociales, y es a su vez reportado en otras reconstrucciones que abarcan grandes zonas de la República Mexicana tales como Coahuila, Durango, Chihuahua, Baja California Sur y Sonora (Stahle *et al.*, 1998; Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Cerano, 2004; Cerano *et al.*, 2009; Villanueva *et al.*, 2009).

### **Periodo de 1961-1991**

Para este período de sequía prolongada, sólo pocos años logran sobrepasar el promedio de precipitación (1967, 1968, 1969, 1976, 1977, 1981, 1982, 1984). Resultados similares se reportan a su vez para otras regiones del país. La década de 1970 se conoció como de extrema sequía para el norte de México. Dichos años secos también se han reportado para todo el norte y parte del centro de México (Florescano, 1980; CENAPRED, 2001; Cerano, 2004; Villanueva *et al.*, 2007).

En el centro del país, y en especial en el estado de Tlaxcala, este periodo de sequía extrema causó grandes estragos en las cosechas, sobre todo de maíz, además ocasionó que parte del agua que se dedicaba a la agricultura, se destinara a otras demandas de primera necesidad. Lo anterior, se reflejó en desempleo, migraciones, disgregación de familias campesinas, miseria y hambre continua en el campo (Florescano, 1980; Castorena *et al.*, 1983; Therrell *et al.*, 2002). Sequías recientes como la ocurrida en los años de 1997 y 1998 redujeron en más del 50% la producción de maíz con efectos sociales y económicos en el estado de Tlaxcala de gran magnitud, esta situación, pone de manifiesto la importancia de analizar con detalle el cambio climático y buscar alternativas de mitigación a condiciones de menor precipitación, que tienen un impacto mayor en la producción de maíz de temporal, por ser el cultivo con mayor número de hectáreas establecidas (Conde *et al.*, 1997).

## Reconstrucción de la precipitación para la región sur de Tlaxcala

En sitios ubicados en las partes altas del volcán *La Malinche*, se colectó un total de 226 radios correspondientes a 82 árboles de la especie *Pinus hartwegii* con diámetros de 40 a 85 cm. Durante el proceso de prefechado se eliminó un gran número de muestras, lo anterior debido a que *P. hartwegii* es una especie complaciente (con crecimientos muy uniformes de un año a otro) y de crecimientos irregulares, situación que hace difícil el fechado de cada uno de sus anillos anuales. Del total de núcleos colectados, se logró fechar sólo 37 muestras, que al correrse con el programa COFECHA no mostraron problemas de cofechado. El procedimiento para la generación de la cronología de anillo total es el mismo descrito previamente para la especie de pino piñonero. La cronología final se extendió para el período 1890-2008. Para fines de reconstrucción, se integró una serie climática de precipitación regional, compuesta por las estaciones Huejotzingo, Buenavista, Zitlaltepec, San Miguel y Capulac, con datos climáticos del período 1950 a 2001, al correlacionar los registros de precipitación regional con los índices de ancho de anillo, se determinó que la lluvia que más influye en el crecimiento de *P. hartwegii* es la que comprende el período enero-septiembre (invierno-verano), donde ocurre gran parte de la precipitación anual (Figura 3.7).

Dada la relación entre la precipitación y el índice de anillo, se generó un modelo que permitió reconstruir la variabilidad de la precipitación en el período común de los datos observados (1950-2001). El modelo se calibró en el subperíodo 1950-1974 y se verificó en 1975 – 2001 (Figura 3.8). El análisis de calibración entre los datos de precipitación reconstruida y los datos de precipitación observada, indicaron una correlación de 0.84 ( $R^2 = 0.71$ ,  $p < 0.0001$ ), que explica el 70% de la variabilidad. La verificación indicó una correlación 0.71 ( $R^2 = 0.50$ ,  $p < 0.0001$ ), lo que explica el 50% de la variabilidad de la precipitación para dicho período.

Debido a que ambos períodos fueron estadísticamente significativos, para generar la ecuación de reconstrucción, se utilizó el período total de datos climáticos disponibles (1950-2001), que indicaron una correlación de 0.76 ( $R^2 = 0.58$ ,  $p < 0.001$ ), es decir, el modelo explica el 58% de la variabilidad en la precipitación que ocurre en el período estacional enero-septiembre (Figura 3.8).

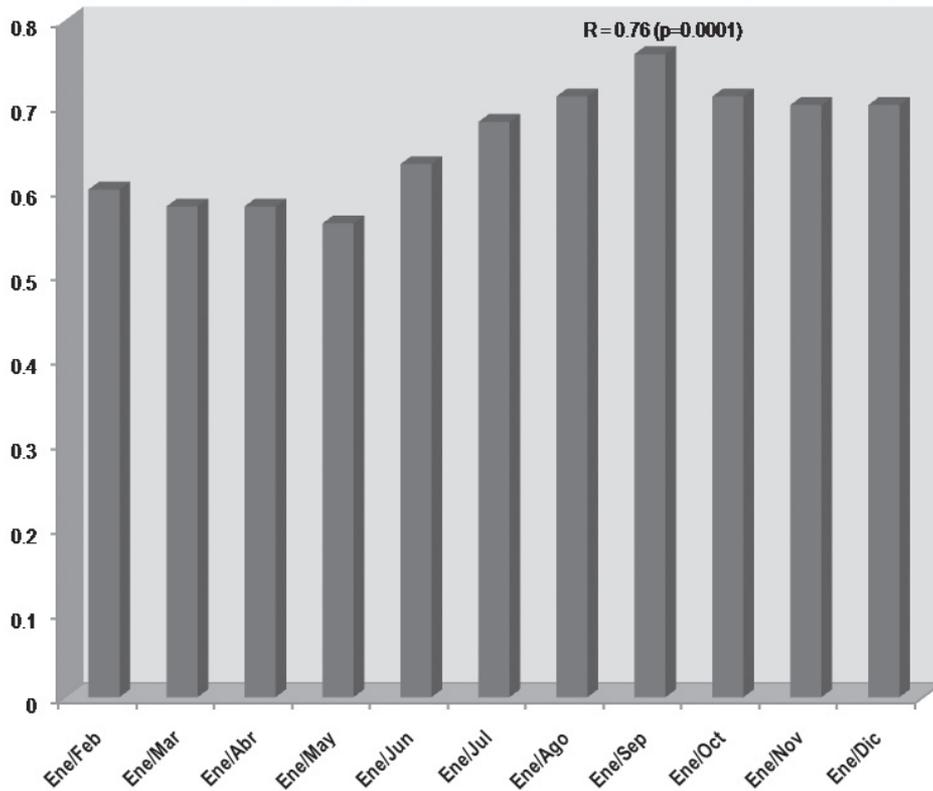
El modelo generado para la reconstrucción de precipitación para el período total de la cronología (1890 – 2008) fue el siguiente:

$$Y_t = -65.4209 + 667.3563 * X_t$$

Donde:

$Y_t$  = Valor de precipitación estacional Enero-Septiembre (mm) reconstruido para un año en específico.

$X_t$  = Índice de Ancho de Anillo para un año en específico.



**Figura 3.7. Análisis de función de respuesta que muestra el período de la precipitación anual que más influye en el crecimiento de *Pinus hartwegii*. Para este caso la barra enero-septiembre fue la más correlacionada.**

La reconstrucción de precipitación invierno- verano para el Parque Nacional *La Malinche*, al igual que la realizada para la región oriental de Tlaxcala, mostró alta variabilidad interanual y multianual (Figura 3.9).

Se reconstruyó la presencia de sequías para los períodos 1891-1894, 1897-1898, 1920-1922, 1929-1937, 1952-1954, 1963-1965, 1972-1975, 1984-1985, 1991-1996, 2003-2004 y 2006-2008. De igual manera, se observan importantes periodos húmedos (por arriba del promedio) para el periodo 1950-2001), 1895-1896, 1900-1911, 1923-1925, 1954-1959, 1966-1970, 1978-1983, 1985-1987, 1998-2001 y 2005-2006.

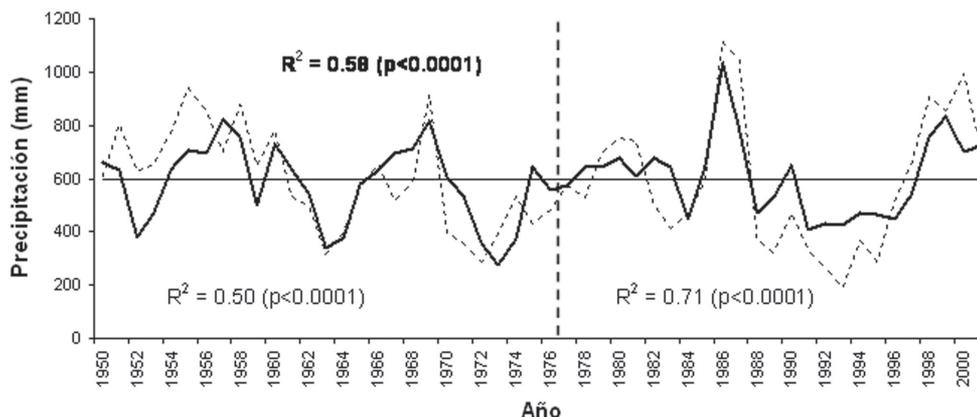
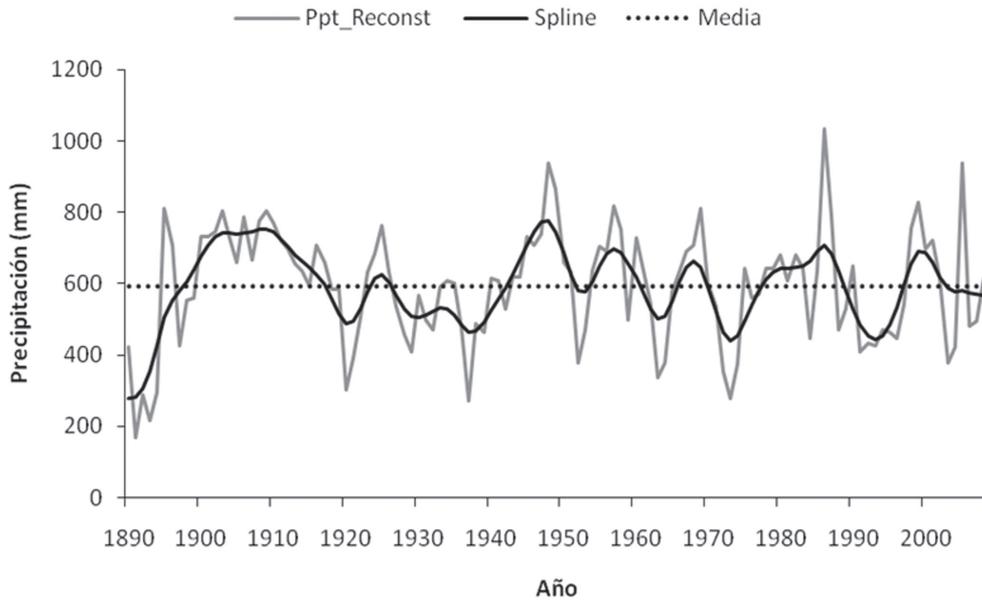


Figura 3.8. Calibración y verificación entre la precipitación estacional enero-septiembre reconstruida (línea continua) y la precipitación regional observada (línea punteada).

### Reconstrucción de la precipitación para el noreste de Tlaxcala

Para la región noreste de Tlaxcala, se logró reconstruir la variabilidad de la precipitación estacional enero-junio para el período 1719-2007 (288 años) con una cronología de *Pseudotsuga menziesii* compuesta por núcleos de crecimiento procedentes de árboles de sitios circunvecinos. El procedimiento de generación del modelo de reconstrucción fue similar al descrito para las especies previas. *Pseudotsuga menziesii* es una especie cuyo crecimiento depende de la precipitación que ocurre en el período invierno-primavera, por lo que fue factible reconstruir la precipitación estacional acumulada que se presenta en los meses de enero a junio para la extensión total de la cronología, que cubre el período 1721-2007 (Figura 3.10). Entre los eventos de sequía más importantes que han impactado esta región del estado de Tlaxcala, sobresalen los períodos 1832- 1841, 1858-1865, 1893-1898, 1914-1919, 1940-1953, 1960-1964 y 1969-1972. El año de 1998 constituye el año con menos precipitación a lo largo de la reconstrucción, año que por sus condiciones de escasa precipitación en casi todo el país tuvo un efecto devastador en los ecosistemas forestales debido a un gran número de incendios en su mayoría de origen humano, que afectaron amplias regiones de México y particularmente ecosistemas de bosque mixto en las sierras occidental, oriental y centro de México (Yocom *et al.*, 2010). La causa de esta sequía extraordinaria en México se ha atribuido al efecto del Niño-Oscilación del Sur (Magaña *et al.*, 1999; Seager *et al.*, 2009) y a posibles cambios en la cobertura vegetal, entre otros cambios de uso del suelo (Stahle *et al.*, 2009).



**Figura 3.9. Reconstrucción de la precipitación estacional invierno-verano (enero-septiembre), para la región sur del estado de Tlaxcala.**

De igual manera se reconstruyeron importantes eventos con precipitaciones superiores a la media, entre los que destacan 1808-1818, 1902-1913 y 1954-1959 (Figura 3.10). El año con mayor precipitación a lo largo de los 289 años reconstruidos fue el de 1992, que también coincide con evento intenso del Niño.

Durante el año de 2010 se generó una nueva cronología de *Pseudotsuga menziesii* para el ejido *Emiliano Zapata*, ubicado en el noreste del estado de Tlaxcala en los límites estatales con Puebla, coordenadas  $19^{\circ} 33' 13''$  N,  $97^{\circ} 53' 42''$  W y a una elevación de 2900 m. Esta cronología posee una variabilidad climática muy similar a la previamente desarrollada, lo que viene a corroborar el hecho de que en esta región de Tlaxcala y Puebla, los patrones climáticos son similares, lo cual es importante para fines de planeación de los recursos hídricos disponibles de manera conjunta (Figura 3.11).

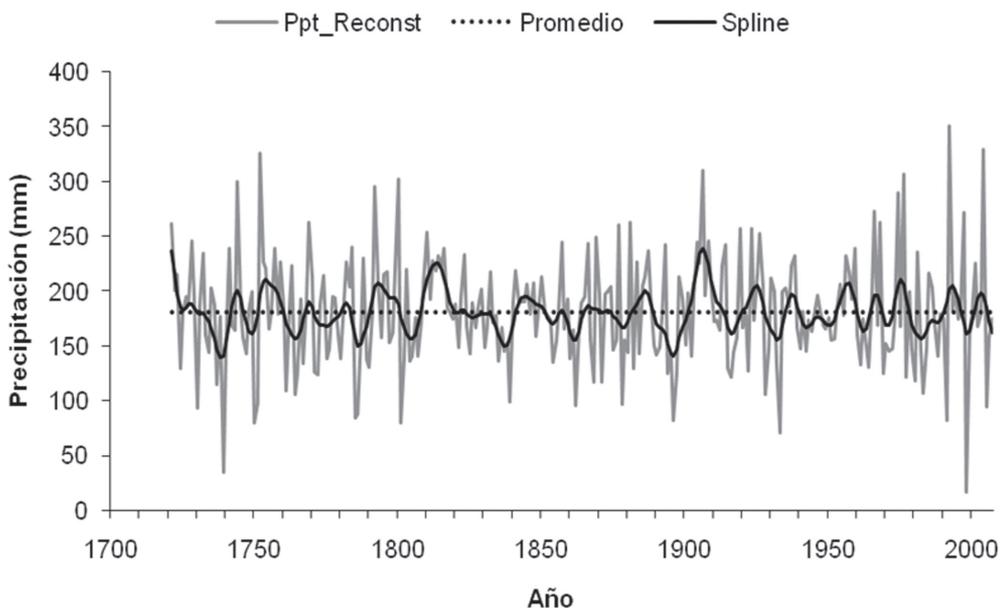
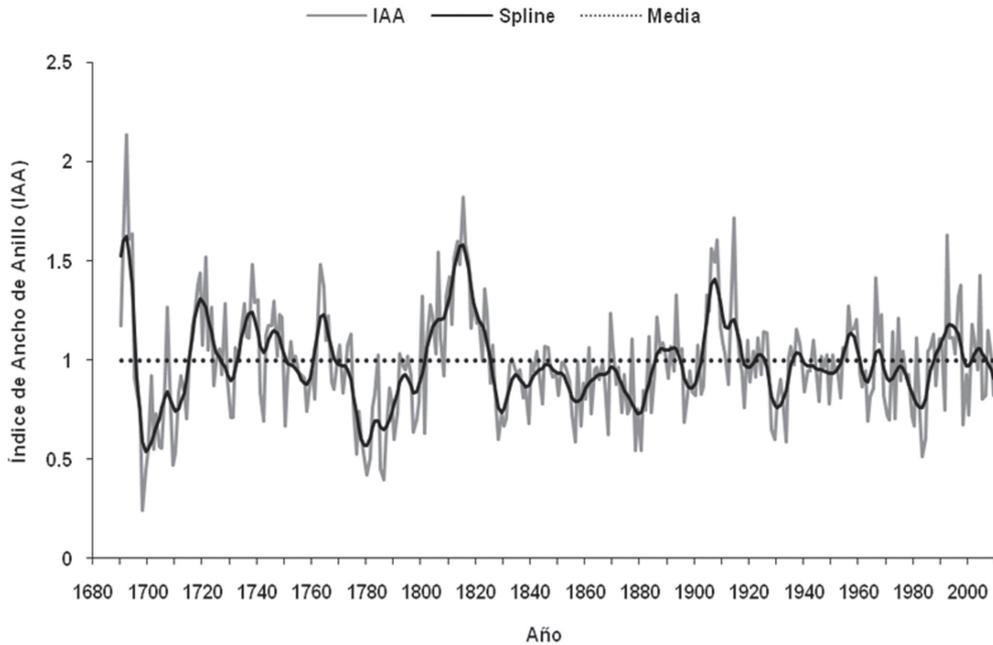


Figura 3.10. Reconstrucción de precipitación para la parte noreste del estado de Tlaxcala. El año de 1998 fue el más seco de toda la reconstrucción, que se asocia a un evento fuerte del Niño-Oscilación del Sur.

### Análisis regional de la variabilidad climática

La generación de series paleoclimáticas en las diferentes regiones del estado de Tlaxcala, permite analizar la variabilidad hidroclimática en la región. Al comparar las series reconstruidas (curvas suavizadas a nivel década) se observó que, la variabilidad climática reconstruida en *La Malinche* al sur del estado, fue muy similar a la observada para la parte oriental y noreste del estado de Tlaxcala (Figura 3.12). A nivel inter-anual se determinó que las reconstrucciones con tendencias similares fueron las de la región oriental y noreste del estado, que tuvieron una correlación significativa ( $r = 0.49$ ,  $p < 0.0000$ ,  $n = 118$ ), atribuido a su cercanía, lo cual indica que los fenómenos atmosféricos impactan por igual esta región del estado, aunque debido al factor de elevación el sitio oriental, posiblemente reciba una menor precipitación.



**Figura 3.11. Comportamiento de los índices dendrocronológicos de anillo total de *Pseudotsuga menziesii* para un sitio ubicado al noreste de Tlaxcala en los límites estatales con Puebla.**

El comportamiento de los eventos de baja frecuencia en el tiempo, permite deducir, que gran parte del estado se ha visto afectado por una misma variabilidad hidroclicmática, y en períodos específicos de extrema sequía que han impactado no sólo al estado de Tlaxcala, sino también otros estados del centro y norte del país, atribuidos a patrones de circulación general, esta variabilidad común ha sido más evidente (Figura 3.12).

### Patrones de circulación general

El análisis de los patrones atmosféricos de circulación general como El Niño Oscilación del Sur y el Monzón, para conocer su grado de afectación en la variabilidad climática de esta región del estado de Tlaxcala, no indicaron una influencia significativa en la precipitación, lo que puede atribuirse a que quizás otros fenómenos climáticos pudieran tener una mayor influencia en explicar la variabilidad hidroclicmática de esta región del país; sin embargo, eventos intensos de El Niño que afectaron otras regiones de México, también afectaron el estado de Tlaxcala, lo que indica que cuando este fenómeno atmosférico es de alta intensidad, influye en la variabilidad de la precipitación de esta región de México, que deriva en una mayor o menor disponibilidad de agua.

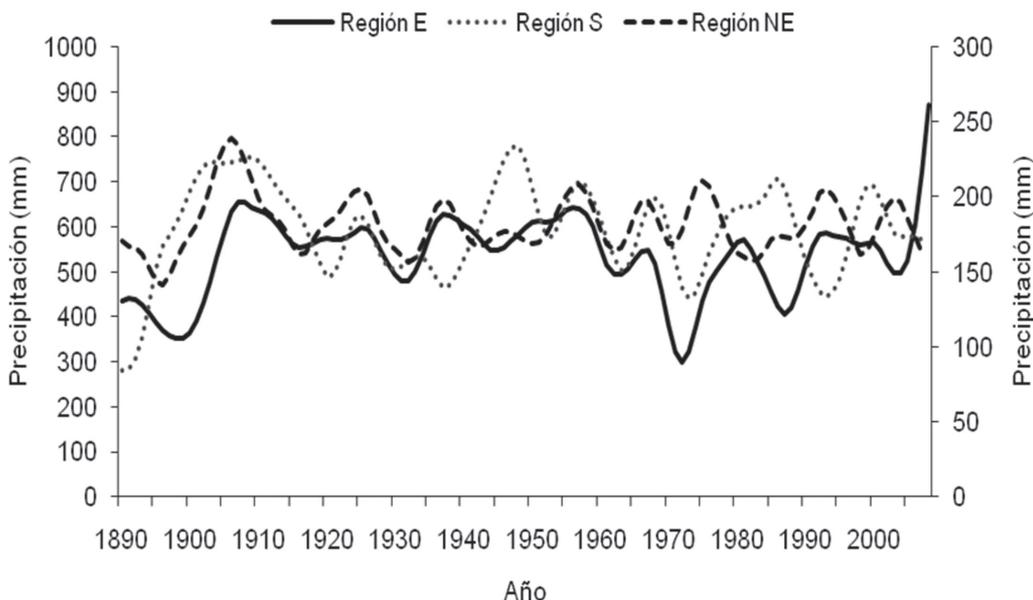


Figura 3.12. Comparación entre las reconstrucciones de precipitación para las regiones noreste, este y sur del estado de Tlaxcala.

### Impactos de El Niño Oscilación del Sur

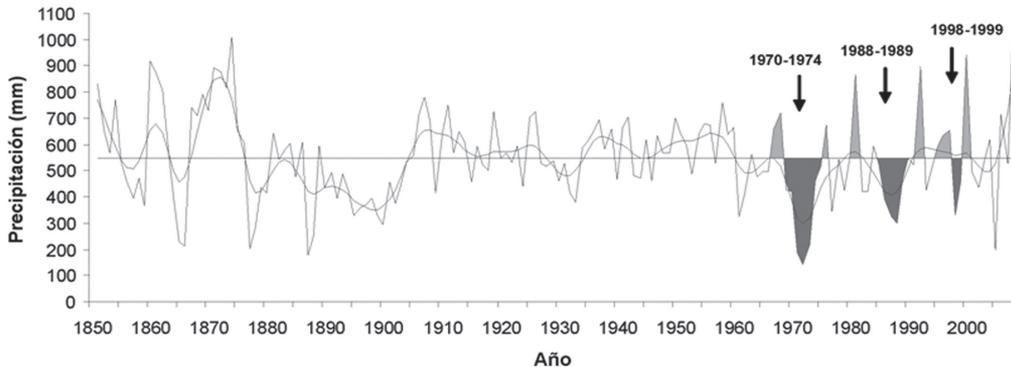
Durante mucho tiempo, uno de los grandes retos científicos ha sido el entender las variaciones climáticas que se producen año tras año para poder predecirlas. En las últimas décadas, se ha encontrado que gran parte de dichas fluctuaciones climáticas están altamente relacionadas con el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en Inglés) (Díaz y Markgraf, 1992).

Los episodios Cálido/El Niño y Frío/La Niña, forman parte de ENSO. Tanto El Niño como La Niña son los ejemplos más evidentes de la variabilidad climática global, con repercusiones en la distribución y volumen de precipitación a nivel mundial.

La precipitación en el norte de México y suroeste de Estados Unidos se correlaciona significativamente con los índices del ENSO (Stahle *et al.*, 1998; Magaña *et al.*, 1999). La influencia del ENSO en la variabilidad del clima del norte de México se registra fielmente en los anillos de crecimiento de ciertas especies arbóreas como *Psuedotsuga menziesii* y otras coníferas (Stahle y Cleaveland, 1993; Cerano *et al.*, 2009; Villanueva *et al.*, 2009).

Para el centro de México este fenómeno no es tan intenso como para el norte del país, no obstante eventos considerados intensos como los registrados en los periodos 1970-1974, 1988-1989 y 1998-1999 si han afectado gran parte del territorio nacional, entre ellos el estado de Tlaxcala, donde eventos cálidos y fríos han incrementado y disminuido la precipitación, respectivamente; tal es el caso de eventos la Niña, que provocaron fuertes sequías en los periodos 1970-1974, 1988-1989 y 1998-1999; mientras que eventos cálidos El Niño, incrementaron la precipitación en los años de 1958, 1968, 1976, 1982, 1986, 1997 y 2000 (Figura 3.13).

El conocer la influencia histórica de ENSO en la variabilidad climática del estado de Tlaxcala, contribuirá notablemente a generar acciones de planeación y de mitigación para el manejo de los recursos hídricos, particularmente en esta década donde los avances tecnológicos permiten predecir la presencia e intensidad de este fenómeno.



**Figura 3.13. Influencia de ENSO sobre la variabilidad de la precipitación para el estado de Tlaxcala. En los últimos 50 años, eventos La Niña (iluminado bajo la horizontal) y El Niño (iluminado sobre la horizontal) se han presentado en esta región y afectado la disponibilidad de los recursos hídricos.**

## CONCLUSIONES

La reconstrucción de precipitación anual para la región oriental de Tlaxcala cubrió un periodo de 158 años (1850-2008) y mostró alta variabilidad inter-anual y multianual. Para esta región se presentaron sequias intensas los periodos 1855-1860, 1864-1867, 1877-1904, 1929-1934, 1961-1978, 1983-1990 y 2001-2005, con repercusiones económicas y sociales de gran relevancia. Se reconstruyeron periodos húmedos en 1859-1864, 1867-1876, 1905-1927, 1935-1960, 1979-1982 y 1991-2000.

La reconstrucción estacional invierno-verano (enero-septiembre) para la región sur de Tlaxcala, se extendió por 119 años (1890-2008) y mostró sequías cada veinte y treinta años, es decir, 1890, 1920, 1940, 1970 y 1990. Se presentaron eventos húmedos en los periodos 1895-1896, 1900-1911, 1923-1925, 1954-1959, 1966-1970, 1978-1983, 1985-1987, 1998-2001 y 2005-2006 y se asociaron con eventos extremos de alta intensidad de ENSO.

La reconstrucción para la región noreste que comprende el período de 1719-2007, indica intensas sequías en los periodos de 1832-1841, 1858-1865, 1893-1898, 1914-1919, 1940-1953, 1960-1964 y 1969-1972. De igual manera, se presentaron buenas condiciones de lluvia en los periodos de 1808-1818, 1902-1913 y 1954-1959.

El impacto de patrones circulatorios como El Niño Oscilación del Sur y el Monzón mexicano en la precipitación de esta región, no evidenció una respuesta significativa para el intervalo total de los registros de estos fenómenos atmosféricos, sin embargo, eventos extremos del Niño indican su impacto positivo en esta región de México al propiciar sequías intensas o periodos con elevada precipitación. En años específicos El Niño influye significativamente sobre la variabilidad de la precipitación en esta región del país.

En términos de manejo de agua, las reconstrucciones de precipitación indican gran variabilidad inter-anual que afecta de manera directa su disponibilidad. Esta situación, aunada a una deforestación intensa, que en Tlaxcala ha eliminado más del 90% de la vegetación original, trae consigo un impacto significativo en el ciclo hidrológico, con alta incidencia en problemas de erosión, calidad de agua y recarga de mantos acuíferos.

Los eventos hidrológicos extremos (sequías y periodos húmedos), tienen mayor repercusión en sitios con alto disturbio ecológico como lo son los ecosistemas de montaña de Tlaxcala. Las instituciones encargadas de la planeación y manejo de los recursos hídricos, deben considerar la variabilidad climática detectada en este tipo de estudios, con miras a desarrollar modelos para escenarios climáticos venideros, que permitan una mejor planeación de los recursos hídricos y que fomenten la conservación y restauración de ecosistemas degradados, que en el estado de Tlaxcala se ubican en las partes altas de las cuencas donde se genera la mayor parte del agua.

## LITERATURA CITADA

Castorena, G.; E. Sánchez, E. Florescano, G. Padilla y L. Rodríguez. 1983. Análisis histórico de las sequías en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Dirección de formación y divulgación. Comisión del Plan Nacional Hidráulico. 158 p.

- Centro de Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2001. Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. Atlas Nacional de Riesgo de la República Mexicana. México.
- Cerano, J. 2004. Reconstrucción de 350 años de precipitación invierno-primavera para Saltillo, Coahuila. Tesis Profesional. Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Buenavista, Saltillo, Coahuila. 152 p.
- Cerano P., J., J. Villanueva D., P. Z. Fulé, J. G. Arreola A., I. Sánchez C. y R. D. Valdez C. 2009. Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*. 15 (2): 27-44.
- Conde, C., D. Liverman, M. Flores, R. Ferrer, R. Araujo, E. Betancourt, G. Villareal, C. Gay. 1997. Vulnerability of rainfed crops in Mexico to climate change. *Climate Research* 9: 1-23.
- Cleaveland, M. K.; D. W. Stahle, M. D. Therrell, J. Villanueva D., B. T. Burns. 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59: 369-388.
- Constante, G. V., J. Villanueva D., J. Cerano P., E. Cornejo O., S. Valencia M. 2009. Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción estacional para el sureste de Coahuila. *Ciencia Forestal en México* 34(106): 17-39.
- Cook, E. R. and R. H. Holmes. 1984. Program ARSTAN and users manual. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona. Tucson, AZ. 15 p.
- Díaz H. F. and V. Markgraf. 1992. El Niño. Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation. Cambridge Univ. Press. 476 p.
- Díaz, S., M. D. Therrell, D. W. Stahle, M. K. Cleaveland. 2002. Chihuahua (Mexico) winter – spring precipitation reconstructed from tree – rings, 1647- 1992. *Climate Research*. 22: 237-244.
- Espejel, R., A. y G.R. Carrasco. 1999. El deterioro ambiental en Tlaxcala y las políticas de desarrollo estatal 1988-1999. *Gaceta Ecológica* 52: 21-52. INE-SEMARNAT, México.
- Espejel, R., T. González y D. Perón. 2005. El índice de deterioro ambiental en los municipios de Tlaxcala: una propuesta metodológica. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. (online) 2005. México. Consultado en: <http://seminario de investigaci3n/protocolo/Instituto Nacional de Ecología.htm> (25 de febrero de 2009).
- Florescano, E. M. 1980. Análisis histórico de las sequías en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México. D. F. 158 p.
- Florescano, E. y S. Swan. 1995. Breve historia de la sequía en México. Universidad Veracruzana. México. 246 p.

- Fritts, H. C. 1976. Tree rings and climate. Academic Press Inc (London), Ltd. 565 p.
- García, A. V. 1997. Las "sequías" y sus impactos en las sociedades del México decimonónico. 1856-1900. CIESAS, México. 32 p.
- Guerra de la C., V., F. Carrillo A., M. Acosta M., F. Islas G., E. Flores A., C. Mallén R., E. Buendía R. 2007. El manejo forestal en el estado de Tlaxcala: una revisión del desarrollo de la silvicultura. Folleto Técnico No. 25. INIFAP. Centro de Investigación Regional Centro, Campo Experimental Tlaxcala. 67 p.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assited quality control in tree-ring dating and mesurement. Tree-Ring Bulletin 43: 69-78.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2000. Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC). Software. Jiutepec, Morelos, México.
- Magaña, V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrizosa E. y J. Pérez. 1999. El Niño y el clima. Magaña, V. (editor). Los impactos de El Niño en México. SEP - CONACYT. Mexico. pp. 23 - 68.
- Robinson, W. J. y R. Evans. 1980. A microcomputer-based tree-ring measuring system. Tree-Ring Bulletin. 40:59-64.
- Seager R., M. Ting, M. Davis, M. Cane, N. Naik, J. Nakamura, C. Li, E. Cook y D. W. Stahle. 2009. Mexican drought: an observational modeling and tree-ring study of variability and climate change. *Atmósfera* 22(1): 1-31.
- Stahle, D.W. and M. K. Cleaveland. 1993. Southern Oscillation extremes reconstructed from tree-rings of the Sierra Madre Occidental and Southern Great Plains. *Journal of Climate* 6: 129-140.
- Stahle, D.W., R.D. Dárrigo, P.J. Krusic, M.K. Cleaveland, E.R. Cook, R.J. Allan, J.E. Cole, R.B. Dunbar, M.D. Therrell, D.A. Guy. M.D. Moore, M.A. Stokes, B.T. Burns, J. Villanueva-Diaz, and L.G. Thompson. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 70(10): 2137-2152.
- Stahle, D.W., E. R. Cook, J. Villanueva D., F. K. Fye, D. J. Burnett, R. D. Griffin, R. Acuña S., R. Seager, R. R. Heim Jr. 2009. Early 21st-century drought in Mexico. *Eos* 90 (17): 89-90.
- Stokes, M. A. and T. L. Smiley. 1968. An Introduction to Tree-Ring Dating. University of Chicago Press, Chicago. 73 p.

- Therrell, M. D., D. W. Stahle, M. K. Cleaveland and J. Villanueva D. 2002. Warm season tree growth and precipitation over México. *Journal of Geophysical Research*, 107 (D14): ACL 6-1 – ACL. 6-8.
- Therrell, M. D., D. W. Stahle, J. Villanueva, E. Cornejo and M. K. Cleaveland. 2006. Tree-ring reconstructed maize yield in central Mexico: 1474 - 2001. *Climate Change*, 74: 493-504.
- Villanueva, J., D. W. Stahle, B. H. Luckman, J. Cerano, M. D. Therrel y M. K. Cleaveland. 2007. Winter-spring precipitation reconstruction for tree rings for northeast Mexico. *Climate Change*, 83: 117-131.
- Villanueva J., J. Cerano P., V. Constante, G., L. E. Montes, L. Vázquez S. 2009. Muestreo Dendrocronológico: colecta, preparación y procesamiento de núcleos de crecimiento y secciones transversales. INIFAP-CENID-RASPA. Folleto Técnico 13. Gómez Palacio, Durango. 49 p.
- Yocom, L. L., P. Z. Fulé, P. M. Brown, J. Cerano, J. Villanueva D., D. A. Falk, E. Cornejo O. 2010. El Niño-Southern Oscillation effect on a fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology* 91(6): 1660-1671.



Miguel Rivera González  
Juan Estrada Ávalos  
Ramón Trucios Caciano  
Jose A. Montemayor Trejo  
Miriam M. Tostado Plascencia

## **CAPÍTULO IV**

**FUENTES Y DATACIÓN DE AGUA  
SUBTERRÁNEA DEL ESTADO DE  
TLAXCALA**



## ACUÍFEROS

El estado de Tlaxcala cuenta con cuatro acuíferos principales: Alto Atoyac, Huamantla, Soltepec y Emiliano Zapata ó Zahuapan (Munive, 2008), que de acuerdo a la distribución espacial corresponden a cada una de las cuencas hidrográficas (Figura 4.1). El volumen de extracción anual de los cuatro acuíferos es de 214.7 millones de metros cúbicos ( $\text{Mm}^3$ ) y la recarga de 363.3  $\text{Mm}^3$ , lo cual genera un balance positivo de 154.4  $\text{Mm}^3/\text{año}$ .

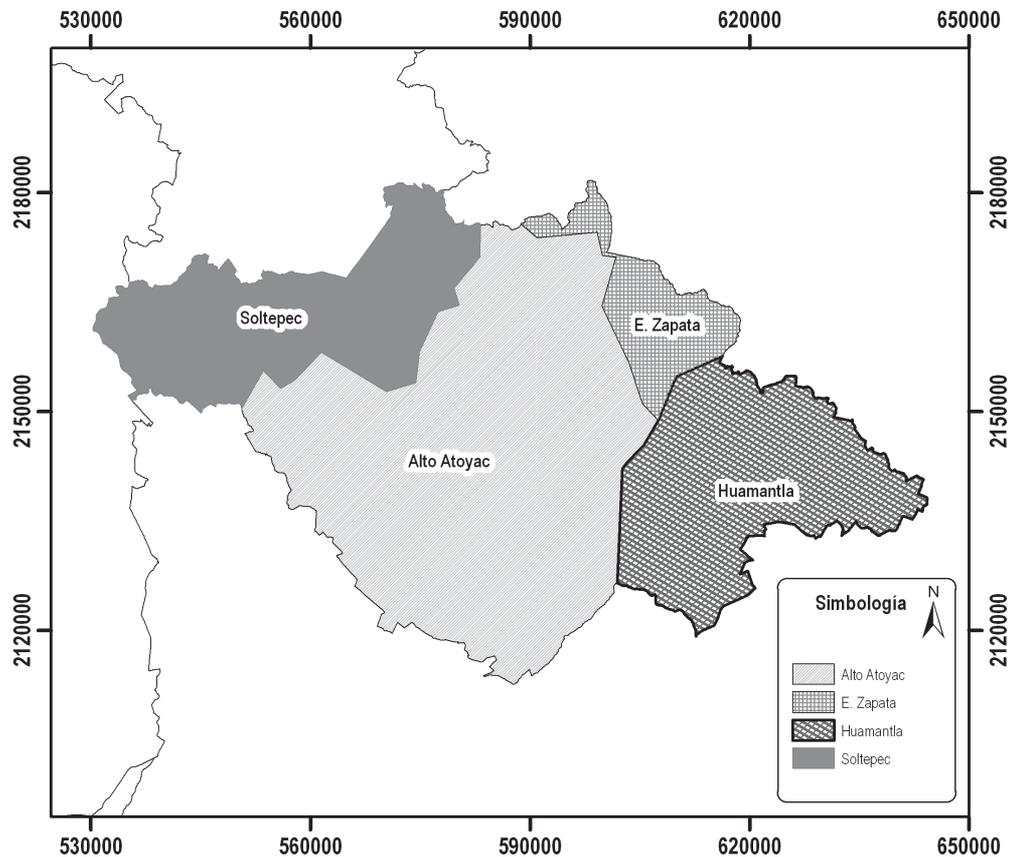


Figura 4.1. Delimitación de acuíferos en el estado de Tlaxcala.

El acuífero Alto Atoyac tiene el mayor volumen de recarga de 170 Mm<sup>3</sup>/año y también es el de mayor volumen de extracción de los cuatro acuíferos. En cuanto al volumen de agua de reserva o volumen disponible, el acuífero Soltepec ocupa el primer lugar con un volumen de 91.4 Mm<sup>3</sup>/año siguiéndole en orden descendente el Alto Atoyac, Huamantla y Emiliano Zapata con volúmenes de 38.9, 13.9 y 10.5 Mm<sup>3</sup>/año respectivamente.

**Cuadro 4.1. Balance de los acuíferos del el estado de Tlaxcala (Munive, 2008).**

Acuífero	Recarga (Mm <sup>3</sup> )	Extracción (Mm <sup>3</sup> )	Disponibilidad (Mm <sup>3</sup> )
Alto Atoyac	170.7	132.1	38.6
Soltepec	109.8	18.4	91.4
Huamantla	77.7	63.8	13.9
Emiliano Zapata	10.9	0.4	10.5
Total	363.4	214.7	154.4

No obstante el balance positivo de los acuíferos, existe un desequilibrio en el volumen de agua disponible por habitante por año, la mayor disponibilidad la presenta el acuífero de Soltepec con 2,019 m<sup>3</sup>/hab-año y los acuíferos Huamantla, Zahuapan o Emiliano Zapata y Alto Atoyac con 1,283, 473 y 310 m<sup>3</sup>/hab-año respectivamente (Cuadro 4.2).

**Cuadro 4.2. Disponibilidad de agua subterránea por habitante por año en los acuíferos del estado de Tlaxcala (Munive, 2008).**

Acuífero	Habitantes (Nº)	Superficie (km <sup>2</sup> )	Volumen (Mm <sup>3</sup> )	Volumen disponible (m <sup>3</sup> /hab-año)
Soltepec	67,385	736	136.1	2,019
Huamantla	125,144	968	160.1	1,283
Emiliano Zapata ó Zahuapan	346,553	1573	165.0	473
Alto Atoyac	423,565	637	131.6	310

## POZOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

En la Cuenca del Río Zahuapan (acuíferos, alto Atoyac y Emiliano Zapata ó Zahuapan) existen 798 pozos profundos (Figura 4.2) con los que se extraen 125 Mm<sup>3</sup> por año de agua subterránea, el 47% corresponde a uso público urbano, el 39.2% se destina para la agricultura, el 13% para uso industrial, el uso pecuario y otros servicios es inferior a 1% (Cuadro 4.3). La mayor densidad de pozos se localiza en el acuífero Alto Atoyac.

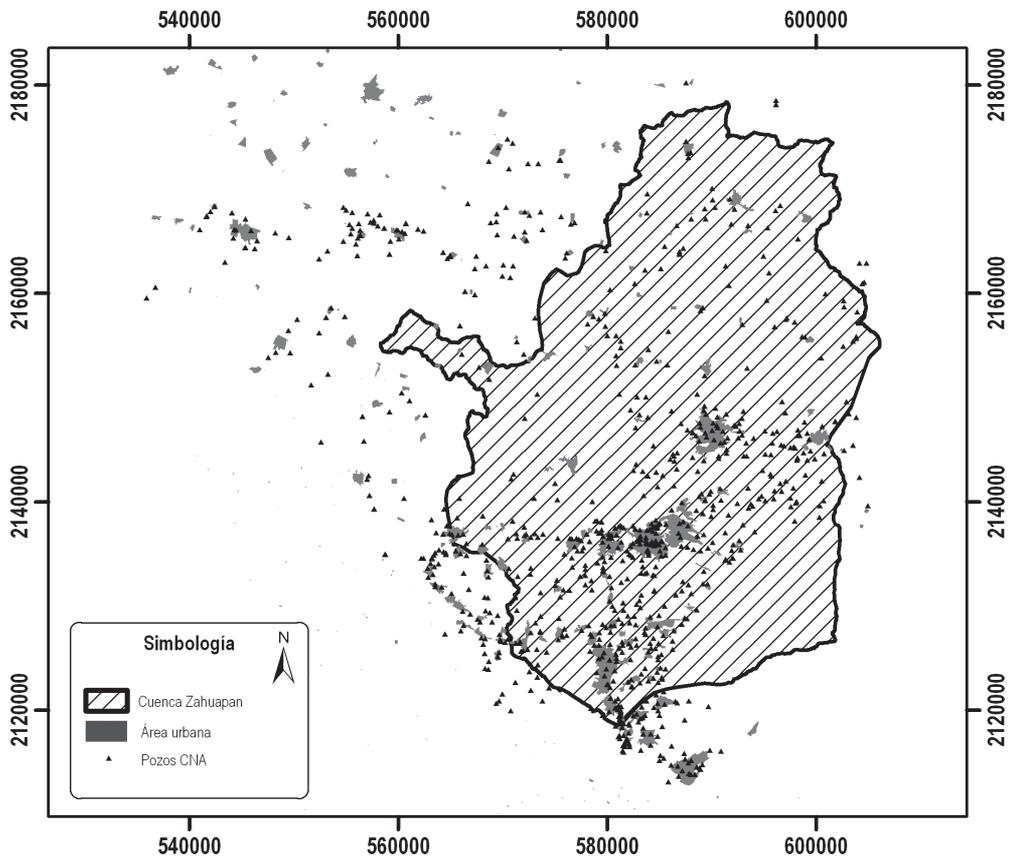


Figura 4.2. Ubicación de los pozos de agua subterránea en la cuenca del río Zahuapan.

**Cuadro 4.3. Usos y volumen de agua subterránea en la cuenca del río Zahuapan (acuíferos Alto Atoyac y Alto Atoyac-Zahuapan), Tlaxcala.**

Uso	Volumen	Porcentaje
	(m <sup>3</sup> )	(%)
Público Urbano	59,488,104	47.25
Agrícola	49,678,471	39.46
Doméstico	14,612	0.01
Industrial	16,408,771	13.03
Pecuario	267,931	0.21
Usos múltiples	37,421	0.03
Total	125,895,313	100.00

## DATACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

### Técnicas de datación de agua

El agua que recarga un acuífero lleva la firma química de la atmósfera de la cual fue derivada. Las concentraciones atmosféricas de tales componentes como los clorofluorocarbonos (CFC) y el Tritio (<sup>3</sup>H) cambian a través del tiempo. Si se asume que el agua infiltrada está en equilibrio con la atmósfera, las concentraciones de estos componentes en las aguas subterráneas reflejan sus concentraciones atmosféricas en el momento en que se aisló el agua de la atmósfera. Los trazadores ambientales y los isótopos presentes en una muestra de agua subterránea se derivaron de la atmósfera en el momento de la recarga. La toma de muestras y métodos de análisis deben minimizar o eliminar el contacto de la muestra de agua con la atmósfera en el momento en que se realiza el muestreo. Algunas de las técnicas utilizadas para determinar la edad del agua subterránea se describen brevemente a continuación.

### Clorofluorocarbonos

Los Clorofluorocarbonos (CFC) son compuestos orgánicos sintéticos estables que se fabricaron por primera vez en 1930 para utilizarse como refrigerantes, propelentes de aerosoles, productos de limpieza, solventes y agentes espumantes en la fabricación de espuma de caucho y plásticos (Busenberg y Plummer, 1992). Los CFC son finalmente liberados a la atmósfera e hidrosfera, y la reducción de la capa de ozono de la tierra se atribuye a la rápida acumulación atmosférica de estos compuestos (Molina y Rowland, 1974). El método desarrollado por Busenberg y Plummer (1992) utiliza CFC como herramienta de datación; el triclorofluorometano (CCl<sub>3</sub>F o CFC-11), diclorodifluorometano (CCL<sub>2</sub>F<sub>2</sub> ó CFC-12), y triclorotrifluoroetano (C<sub>2</sub>Cl<sub>3</sub>F<sub>3</sub> ó Cl<sub>2</sub>FC-CCIF<sub>2</sub> ó CFC-

113). CFC-11 y CFC-12 constituyen el 77 por ciento de la producción mundial total de CFC (Derra, 1990). Los clorofluorocarbonos CFC-11, CFC-12 y CFC-113 tienen una vida atmosférica relativamente larga,  $45 \pm 7$  años,  $87 \pm 17$  años, y  $100 \pm 32$  años, respectivamente (Volk *et al.*, 1997). La concentración de CFC en el agua subterránea es una función de la concentración atmosférica de CFC en el momento de la recarga, la temperatura de recarga y los procesos químicos y físicos que afectan a la solubilidad de los CFCs a lo largo del flujo del agua subterránea (Cook *et al.*, 1995).

### **Tritio**

El Tritio ( $^3\text{H}$ ) es el isótopo radiactivo del hidrógeno, tiene una vida media de 12.43 años (Agencia Internacional de Energía Atómica IAEA, 1981) y es desde 1952 un excelente indicador de recarga de agua subterránea (Clark y Fritz, 1997).  $^3\text{H}$  se libera a la atmósfera por espelación de rayos cósmicos, pero la fuente principal son los ensayos atmosféricos de armas termonucleares. La unidad estándar de medida de la  $^3\text{H}$  es una unidad de Tritio (UT), por lo que una UT es equivalente a un átomo de  $^3\text{H}$  por  $10^{18}$  átomos de hidrógeno o, en términos de radiactividad, 3.2 picocuries por litro (Clark y Fritz, 1997). En 1963 se produjo la máxima cantidad de Tritio debido a pruebas nucleares, comúnmente conocida como la “bomba pico”. Las concentraciones atmosféricas han disminuido gradualmente desde 1963, y el agua subterránea de hoy en día suele contener valores menores a uno hasta 10 y rara vez superior a 50 TU (Clark y Fritz, 1997).

### **Tritio/Helio**

Ambos Tritio ( $^3\text{H}$ ) y Helio ( $^3\text{He}$ ) son relativamente gases inertes. Múltiples fuentes naturales de  $^3\text{He}$  comprenden el manto y atmósfera de la tierra, inclusiones del fluido entre las rocas, y el exceso de aire atrapado en el agua subterránea durante la recarga (Schlosser, 1992). El método de datación  $^3\text{H}/^3\text{He}$  se basa en la desintegración radiactiva de  $^3\text{H}$  a  $^3\text{He}$ . Este método separa  $^3\text{He}$  derivados de  $^3\text{H}$  del  $^3\text{He}$  derivado de fuentes naturales. Estimaciones de edad utilizando el método  $^3\text{H}/^3\text{He}$  pueden ser extremadamente precisas (error de meses) para las aguas subterráneas que contienen altas concentraciones de  $^3\text{H}$ . A diferencia de la técnica de datación de los CFC, la técnica  $^3\text{H}/^3\text{He}$  se puede utilizar en los sitios que están contaminados con compuestos orgánicos.

### **El carbono-14**

Carbono-14 ( $^{14}\text{C}$ ) se produce continuamente en la atmósfera a través de bombardeo de rayos cósmicos de los núcleos de nitrógeno (Bradley, 1985), y también se introdujo en la atmósfera durante los ensayos de armas nucleares. Con una vida media de 5,715 años,  $^{14}\text{C}$  es útil para la datación del agua subterránea que se encuentra entre 1,000 y 30,000 años de edad (Coplen, 1993). Reacciones geoquímicas y de difusión en un acuífero, puede alterar la concentración de

<sup>14</sup>C. Un modelo de reacción geoquímica (Plummer *et al.*, 1983, 1991 y 1994) mejora la exactitud de la datación del agua subterránea.

## **METODOLOGÍA**

La metodología empleada para datar el agua subterránea consistió en realizar las siguientes actividades: Selección y ubicación de los puntos de muestreo, muestreo y preparación de las muestras de agua, análisis químico y datación del agua.

### **Selección y ubicación de los puntos de muestreo**

Se seleccionaron 14 pozos de agua subterránea distribuidos en 10 municipios del estado de Tlaxcala (Figura 4.3), 6 pozos son de uso agrícola, 5 de uso doméstico y 3 de uso industrial. Los pozos de uso industrial se ubicaron en el municipio de Apizaco, los de uso agrícola en los municipios de Zacatelco, Ixtacuixtla, San Lucas Tecopilco, Totolac, Tlaxcala y los de uso doméstico en los municipios de Miguel Hidalgo, Ixtacuixtla, Tlaxco, Atlangatepec y Santa María España. En el cuadro 4.4 se presentan las coordenadas y las claves de descripción de las muestras.

### **Muestreo y Preparación de las Muestras de Agua**

Una vez identificados los pozos para la datación del agua en los diferentes municipios del estado de Tlaxcala, se realizó un recorrido a cada uno de los pozos seleccionados para la recolección de las muestras. En cada punto de muestreo se recolectaron 2 muestras de agua en envases de plástico de un litro, posteriormente una de las muestras tomadas fue filtrada en campo utilizando una bomba de vacío conectada a un depósito de filtrado provisto de una membrana de nitrato de celulosa de un diámetro de 4.7 cm y un tamaño de poro de 0.45 µm, con la finalidad de eliminar los sólidos en suspensión y evitar posibles riesgos de contaminación biológica, posterior a esto las muestras fueron colocadas en una hielera para su conservación y evitar posibles cambios de temperatura que pudieran dañar la muestra. El equipo utilizado se muestra en la Figura 4.4.

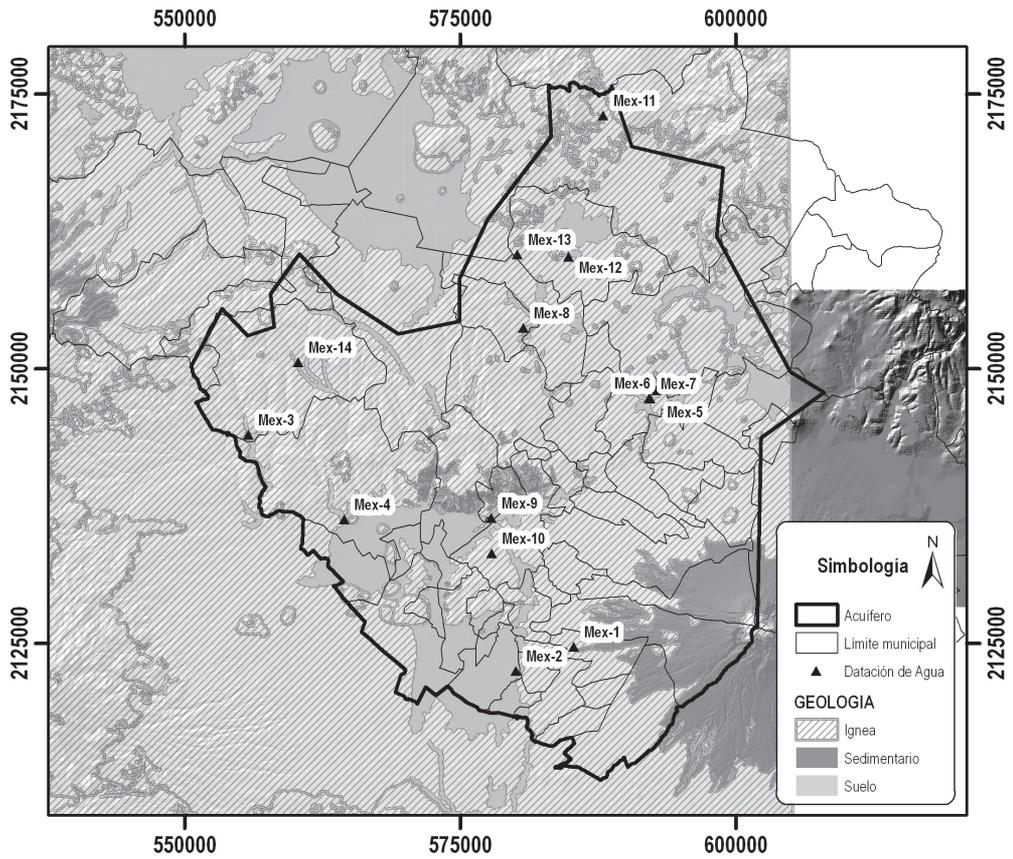


Figura 4.3. Ubicación y distribución de los pozos de agua subterránea utilizados para la datación en el acuífero Alto Atoyac.

**Cuadro 4.4. Características y ubicación de los pozos seleccionados para la datación de agua.**

Descripción de la muestra	Municipio	Uso
Mex-1	Miguel Hidalgo	Domestico
Mex-2	Zacatelco	Agrícola
Mex-3	Ixtacuixtla	Agrícola
Mex-4	Ixtacuixtla	Domestico
Mex-5	Apizaco	Industrial
Mex-6	Apizaco	Industrial
Mex-7	Apizaco	Industrial
Mex-8	San Lucas Tecopilco	Agrícola
Mex-9	Totolac	Agrícola
Mex-10	Tlaxcala	Agrícola
Mex-11	Tlaxco	Domestico
Mex-12	Atlangatepec	Agrícola
Mex-13	Atlangatepec	Domestico
Mex-14	Santa María Española	Domestico

#### **Análisis químico de las muestras de agua**

Una de las dos muestras recolectadas en cada punto de muestreo, fueron llevadas al Laboratorio de análisis de Agua-Suelo-Planta del CENID-RASPA para efectuar un análisis químico el cual consistió en determinar los siguientes parámetros: potencial hidrógeno o pH, conductividad eléctrica (CE), cationes y aniones solubles, tipo de sal predominante, relación absorción sodio (RAS), Boro y Nitratos.

#### **Datación del agua subterránea**

Las muestras de agua fueron enviadas al laboratorio de la Universidad de Arizona de los Estados Unidos para su datación. Para datar el agua se utilizó la técnica isotópica de carbono 14. Como apoyo para la datación se envió un plano geológico del estado de Tlaxcala así como valores promedio de pH de los suelos aledaños a los pozos de agua subterránea seleccionados para la datación. Los valores promedio de pH fueron obtenidos de las cartas de suelos de INEGI del estado de Tlaxcala.



Figura 4.4. Equipo utilizado para filtrar el agua en campo, eliminar sólidos en suspensión y evitar riesgos de contaminación biológica.

## RESULTADOS

### Analisis químico de las muestras de agua

Salinidad y sodicidad.- El pozo identificado como Mex-9 mostró valores de conductividad eléctrica (CE) que restringen su uso agrícola de ligero a moderado. Los valores combinados de CE y la relación de absorción de sodio (RAS) mostraron que el agua de los pozos Mex-3 y 9 no tiene restricción de uso, Mex-2, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12 y 13 tienen restricción de uso de ligero a moderado y las muestras Mex-1 y 11 tienen un grado de restricción de uso severo de acuerdo con la clasificación propuesta por Ayers y Westcot (1987) (Cuadro 4.5).

Contenido de nitratos.- En general, el contenido de nitratos ( $\text{NO}_3$ ) no restringe el uso del agua para la agricultura, a excepción del pozo Mex-2 que mostró restricción de ligera a moderada con una concentración de 5 mg/l (Ayers y Westcot, 1987).

### **Clasificación del agua**

El diagrama de Piper es una herramienta gráfica muy útil en la interpretación geoquímica del agua subterránea que permite analizar los iones presentes en el agua con el propósito de investigar entre otras cosas el origen de los constituyentes disueltos en las aguas y problemas geoquímicos relacionados (Donado, 1999).

El diagrama combina dos triángulos y un rombo. En el triángulo izquierdo se grafican los cationes mayores (calcio, magnesio y potasio) y en el derecho los aniones mayores (bicarbonatos, sulfatos y cloruros), cada vértice representa el 100% de cada elemento.

En el rombo central se indica la composición relativa del agua se representa la composición del agua deducida a partir de los cationes y aniones.

A cada composición aniónica o catiónica le corresponde un punto en cada triángulo y si se proyecta una línea paralela a partir de cada punto, la intersección de ambas líneas en el rombo forma el tercer punto que es representativo de la composición iónica global del agua. Al graficar la muestra, su clasificación dependerá de su ubicación en el diagrama (Figura 4.5), de tal manera que la clasificación de agua puede ser:

1. Aguas sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas.
2. Aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas.
3. Aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas.
4. Aguas bicarbonatadas sódicas.
5. Aguas magnésicas.
6. Aguas cálcicas.
7. Aguas sódicas.
8. Aguas sulfatadas.
9. Aguas bicarbonatadas.
10. Aguas cloruradas.

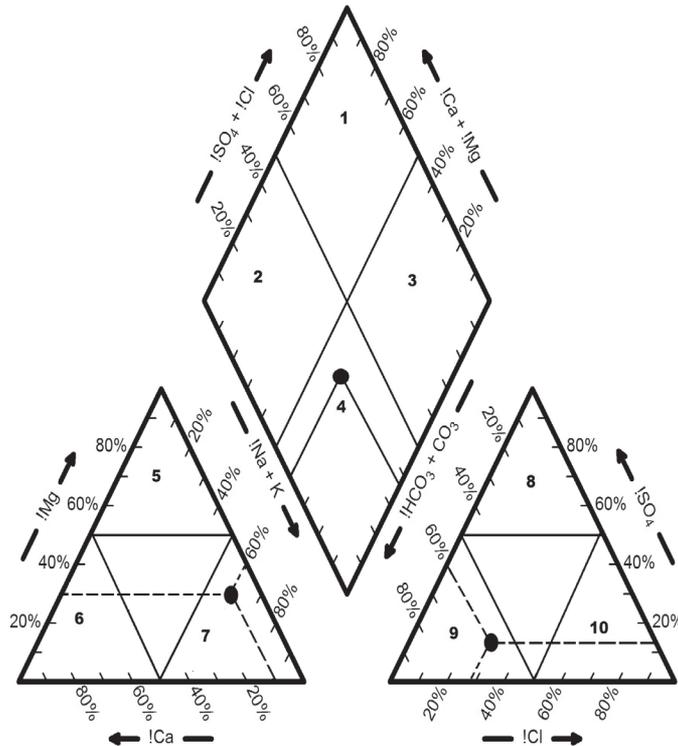


Figura 4.5. Diagrama de Piper.

En este diagrama, la intersección de las paralelas (formadas a partir de los puntos de aniones y cationes) queda en el campo 4 de la figura, entonces el agua es de tipo bicarbonatada de sodio.

Los resultados del análisis de las muestras de agua que se presentan en el cuadro 4.5 (aniones, cationes, pH y conductividad eléctrica), se procesaron con el programa Rockware Aq·QA® versión 1.1 (Rokware Inc. Golden, Colorado, USA) para la construcción del diagrama de Piper.

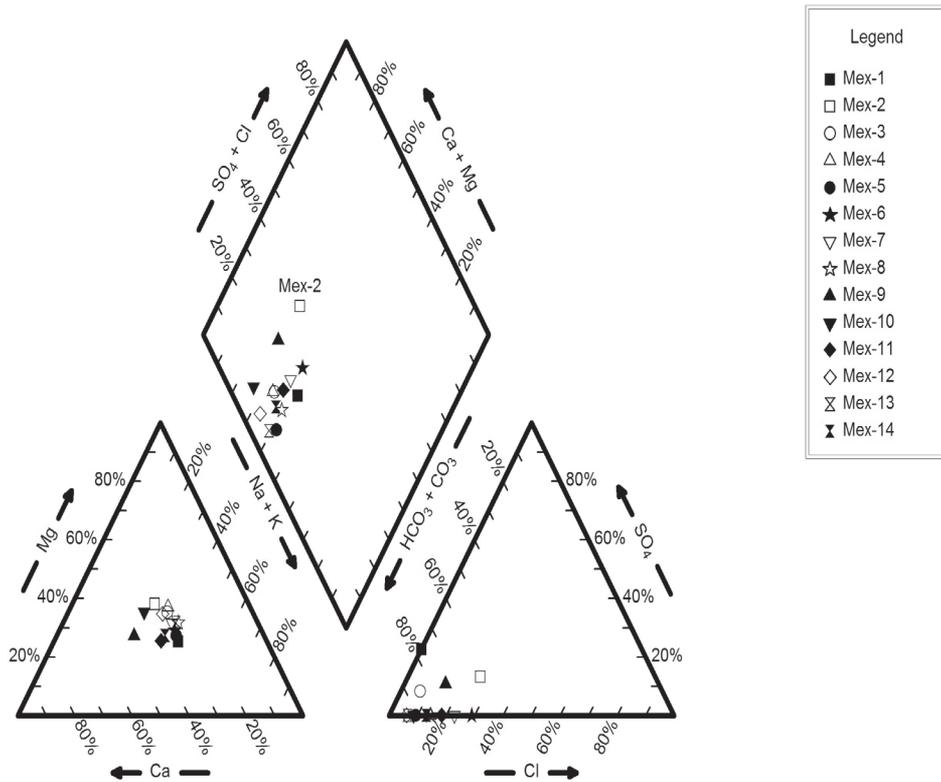


Figura 4.6. Diagrama de piper para las muestras recolectadas.

Como se puede observar en la figura 4.6, la clasificación general de todas las muestras, en cuanto a aniones, es claramente bicarbonatada, mientras que para los cationes las muestras Mex- 2, 3, 4, 7, 8,12 y 13 predomina el magnesio, la muestra Mex-6 contiene mayor contenido de sodio y el resto Mex- 1, 5, 9, 10, 11 y 14 el calcio es el ión predominante.

Los bicarbonatos de calcio y magnesio son sales consideradas de baja nocividad, debido a su baja solubilidad (De la Peña, 1984); sin embargo, el bicarbonato de sodio es considerado de mayor nocividad debido a su alta solubilidad.

**Cuadro 4.5. Calidad del agua subterránea de la cuenca del río Zahuapan, Tlaxcala.**

Parámetro	Muestra													
	Mex-1	Mex-2	Mex-3	Mex-4	Mex-5	Mex-6	Mex-7	Mex-8	Mex-9	Mex-10	Mex-11	Mex-12	Mex-13	Mex-14
pH	6.73	6.69	6.69	7.04	6.70	5.92	6.46	7.26	6.64	7.63	7.39	7.80	7.78	7.08
CE (dS/m)	0.11	0.22	0.31	0.62	0.36	0.49	0.53	0.32	0.75	0.30	0.15	0.25	0.39	0.29
Cationes solubles														
Ca ( meq/l)	0.46	0.81	1.22	2.16	1.42	1.83	1.89	1.11	3.93	1.42	0.64	1.08	1.42	1.24
Mg (meq/l)	0.37	0.93	1.43	2.76	1.25	1.74	1.96	1.26	2.34	1.31	0.44	1.17	1.55	0.97
Na (meq/l)	0.44	0.49	1.08	2.16	1.37	1.99	1.93	1.26	1.94	0.65	0.44	0.83	1.53	1.01
K (meq/l)	0.20	0.22	0.33	0.40	0.55	0.44	0.46	0.35	0.41	0.34	0.21	0.30	0.41	0.34
Aniones solubles														
CO <sub>3</sub> (meq/l)	0.00	0.00	0.00	0.45	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.21	0.00	0.21	0.37	0.00
HCO <sub>3</sub> (meq/l)	1.17	1.75	3.59	6.08	4.22	5.37	5.34	3.17	6.96	3.19	1.44	2.95	4.21	3.13
CL (meq/l)	0.00	0.50	0.20	0.90	0.30	0.60	0.90	0.50	0.90	0.30	0.30	0.20	0.30	0.40
SO <sub>4</sub> (meq/l)	0.24	0.26	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sal Predominante	BC	BM	CM	BM	BC	BS	BM	BS	BC	BC	BC	BM	BM	BC
RAS	0.70	0.50	0.90	1.40	1.20	1.50	1.40	1.20	1.10	0.60	0.60	0.80	1.30	1.00
Nitratos (ppm)	0.20	5.60	0.40	4.70	0.80	1.10	1.00	0.00	4.20	1.60	1.70	0.90	1.20	2.00

BC = Bicarbonato de Calcio; BM = Bicarbonato de Magnesio; BS = Bicarbonato de Sodio; CM = Carbonato de Magnesio

## Procedimiento de Datación del Agua Subterránea

Las mediciones del carbono 14 (<sup>14</sup>C) fueron hechas en las instalaciones del acelerador de la *Nacional Science Foundation* de Arizona mientras que las mediciones del valor delta del carbono 13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) fueron hechas en el laboratorio de isotopía ambiental, ambos de la Universidad de Arizona, EUA.

Para contabilizar los cambios del contenido de carbono inorgánico disuelto (CID) en el agua subterránea y dada la disponibilidad de datos de  $\delta^{13}\text{C}$  y de <sup>14</sup>C, se eligió el método de isótopos estables del carbono de acuerdo a Clark y Fritz (1997); ya que los valores del radiocarbono medidos no pueden ser utilizados directamente para estimar el tiempo de residencia promedio de las aguas subterráneas.

El método de isótopos estables del carbono usa los cambios en el  $\delta^{13}\text{C}$  para estimar los factores de dilución del <sup>14</sup>C original en las aguas subterráneas durante su tiempo de recarga y con ello calcular el tiempo de residencia promedio.

El procedimiento se basa en que el  $^{14}\text{C}$  del agua de recarga es producto del gas del suelo que contiene  $\text{CO}_2$  el cual proviene de la descomposición de material vegetal y una concentración de  $^{14}\text{C}$  similar al de su atmósfera contemporánea. El valor del  $\delta^{13}\text{C}$  del gas del suelo es determinado por factores como los contenidos relativos de material vegetal de plantas  $\text{C}_3$  y  $\text{C}_4$  en el suelo y la difusión de  $\text{CO}_2$ . Este  $^{14}\text{C}$  es diluido por  $^{14}\text{C}$  adicional cuando el agua de infiltración que contiene  $\text{CO}_2$  disuelve la calcita mineral presente, de acuerdo a la reacción siguiente:



Si la mayor parte de esta disolución se realiza con calcita antigua que no contiene  $^{14}\text{C}$ , el bicarbonato producido tendrá un contenido de  $\delta^{13}\text{C}$  cercano a 0‰, y un contenido de  $^{14}\text{C}$  igual a cero es decir, tendrá un porcentaje de carbono moderno o reciente nulo (pCR) o igual a cero.

Un factor de dilución (q) para el  $^{14}\text{C}$  se define de la forma siguiente:

$$q = a^{14}\text{C}_{\text{CID}} / a^{14}\text{C}_{\text{rec}} \quad (4.2)$$

Donde el término  $a^{14}\text{C}$ , significa la actividad del  $^{14}\text{C}$  expresada, por ejemplo, como porcentaje de carbono reciente (pCR); CID es el carbono inorgánico disuelto y rec se refiere a la recarga.

Usando un balance isotópico basado en los datos del  $\delta^{13}\text{C}$ , que puede ser también expresado de la siguiente manera:

$$q = (\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{rec}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}) \quad (4.3)$$

Donde carb, es el carbonato disuelto de la calcita. Considerando el fraccionamiento entre gas del suelo y carbono inorgánico disuelto (CID):

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{rec}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{soil CO}_2} + \epsilon_{\text{CID-soilCO}_2} \quad (4.4)$$

Donde  $\epsilon_{\text{DIC-soil CO}_2}$  es el factor de fraccionamiento entre CID y el  $\text{CO}_2$  del gas del suelo, y es dependiente del pH a condición de que el pH sea superior a 7, en cuyo caso CID será casi enteramente bicarbonato. Y el valor del  $\epsilon_{\text{CID-soil CO}_2}$  permanecerá constante a 5.7‰.

Para aplicar el método de corrección de  $\delta^{13}\text{C}$  a los datos del acuífero en Tlaxcala, se consideraron los siguientes supuestos:

1. Que los sedimentos del acuífero contiene algo de carbonato, posiblemente en los sedimentos del lago, y tal carbonato tiene pCR = 0 y un valor de  $\delta^{13}\text{C} > -1.5\%$ , deducido anteriormente. Valores de 0‰ y 2 ‰ se utilizará para ilustración.

2. Que el gas del suelo en la región de Tlaxcala tiene valores  $\delta^{13}\text{C}$ , de acuerdo a uno de los siguientes casos: A). descomposición de material vegetal que consta de 100% de plantas  $\text{C}_3$  de entrada, representando por la vegetación natural; B) descomposición de material vegetal que consiste en 25% de plantas  $\text{C}_4$  y el 75% de plantas  $\text{C}_3$ ; y C). La descomposición de material vegetal que consiste de alrededor de 40%  $\text{C}_4$  y 60%  $\text{C}_3$ . Los casos B y C consideran prácticas agrícolas a largo plazo, en particular la importancia del maíz como cultivo. Los valores  $\delta^{13}\text{C}$  del gas del suelo para los casos A, B y C son: -23.0, -19.9 y -18.0‰, respectivamente, asumiendo valores de 25‰ y 12.5‰ para material de plantas  $\text{C}_3$  y  $\text{C}_4$  respectivamente y un cambio de isótopos del 2‰, debido a la difusión de  $\text{CO}_2$  fuera del suelo.
3. Que la infiltración del agua de lluvia en la superficie del suelo se comporta de dos maneras: el pH del suelo característico en todas las zonas de recarga es 5.0 a 5.5; o el pH del suelo en las zonas de recarga varía según el sitio donde se obtuvo la muestra (con correspondientes valores de  $\epsilon_{\text{CID-soil CO}_2}$  del suelo de Clark y Fritz, 1997). Valores de pH del suelo de 5 a 5.5 parecen ser frecuentes en la zona, y corresponden al rango de pH esperado del agua de lluvia. Valores superiores pueden representar perturbaciones locales de la química del suelo.

Para realizar los cálculos de la datación del agua subterránea de Tlaxcala, se consideró que el  $\delta^{13}\text{C}$  corresponde a un 40% de plantas  $\text{C}_4$  y un 60% de plantas  $\text{C}_3$  y tomando en cuenta los valores de pH de los suelos de los sitios de muestreo.

En el cuadro 4.6 se presentan las edades de las aguas subterráneas. Las muestras Mex-8 y Mex-9 tomadas en los municipios de San Lucas Tecopilco y Totolac presentan resultados no razonable por lo cual no se pudo realizar su datación debido a que presentaron ambos valores de pCR y  $\delta^{13}\text{C}$  altos, una combinación no observada usualmente en aguas naturales. En otro estudio (no publicado) muestras de similares características isotópicas fueron colectadas de depósitos donde la presión del aire o la exposición al concreto tuvieron efectos potenciales sobre ambos parámetros. Las muestras Mex-5, Mex-3 y Mex-1 de los municipios de Apizaco, Ixtacuixtla y Miguel Hidalgo presentan edades de 1549, 5817 y 3421 años respectivamente, el resto de las muestras presentan edades iguales o menores de 55 años.

**Cuadro 4.6. Edad del agua subterránea en la cuenca del río Zahuapan, Tlaxcala.**

Muestra	pCR	$\delta^{13}\text{C}$ CID	$\delta^{13}\text{C}$ soil	pH	$\epsilon_{\text{DIC-soil CO}_2}$	q	a0	Edad (años)	
Mex-1	64.0	-12.1	-18	6.8	5.5	0	0.97	66.1	3421
Mex-2	80.3	-8.3	-18	8.2	5.7	0	0.67	119.0	≤ 55
Mex-3	30.3	-10.9	-18	5.6	0.2	0	0.61	49.5	5817
Mex-4	93.9	-10.2	-18	9.7	5.7	0	0.83	113.2	≤ 55
Mex-5	28.1	-6.1	-18	5.1	0.0	0	0.34	82.9	1549
Mex-6	11.6	-1.5	-18	5.1	0.0	0	0.08	139.2	≤ 55
Mex-7	29.8	-3.9	-18	5.1	0.0	0	0.22	137.5	≤ 55
Mex-8	104.5	-6.2	-18	6.2	2.5	0	0.40	261.3	NR
Mex-9	93.9	-8.3	-18	5.8	1.3	0	0.50	188.9	NR
Mex-10	67.5	-7.3	-18	7.8	5.7	0	0.59	113.7	≤ 55
Mex-11	102.0	-13.2	-18	5.9	1.4	0	0.80	128.3	≤ 55
Mex-12	83.3	-10.4	-18	6.4	3.4	0	0.71	116.9	≤ 55
Mex-13	54.7	-7.0	-18	5.5	0.0	0	0.39	140.7	≤ 55
Mex-14	72.3	-11.3	-18	5.6	0.2	0	0.63	113.9	≤ 55

*pCR= Porcentaje de carbono moderno o reciente;  $\delta^{13}\text{C}$  C<sub>DIC</sub>= Valor delta del <sup>13</sup>C del carbono inorgánico disuelto;  $\delta^{13}\text{C}$  soil= Valor delta del <sup>13</sup>C del suelo; pH= valores de pH de cada uno de los sitios de muestreo;  $\epsilon_{\text{pCID-soil CO}_2}$  = Factor de fraccionamiento entre el carbono inorgánico disuelto(CID) y el CO<sub>2</sub> del gas del suelo; q = Factor de dilución; a0= actividad del <sup>14</sup>C. ; NR= Muestra de agua no datada por dar resultados erróneos.*

Las muestras de agua que presentan las edades más antiguas se localizan en rocas ígneas (Toba Andesítica) (Figura 4.7) en climas templado subhúmedo tipo C(W.2) (w) (Figura 4.8) y dos de estas muestras se localizan cercanas a manantiales (Figura 4.9).

### **Evaluación de los posibles riesgos de salinización de los suelos y la contaminación de acuíferos**

Uno de los principales problemas ambientales que enfrenta la cuenca del río Zahuapan del estado de Tlaxcala es la contaminación que causan las aguas residuales a los ríos y acuíferos. Actualmente se generan 1,488 l/s de aguas residuales, de las cuales 467 l/s (32%) no son tratadas. Aunado a esto todos los efluentes de las plantas de tratamiento sobrepasan el límite máximo permisible de coliformes fecales, lo cual constituye un riesgo de contaminación biológica para cultivos y humanos (Rico, 2008).

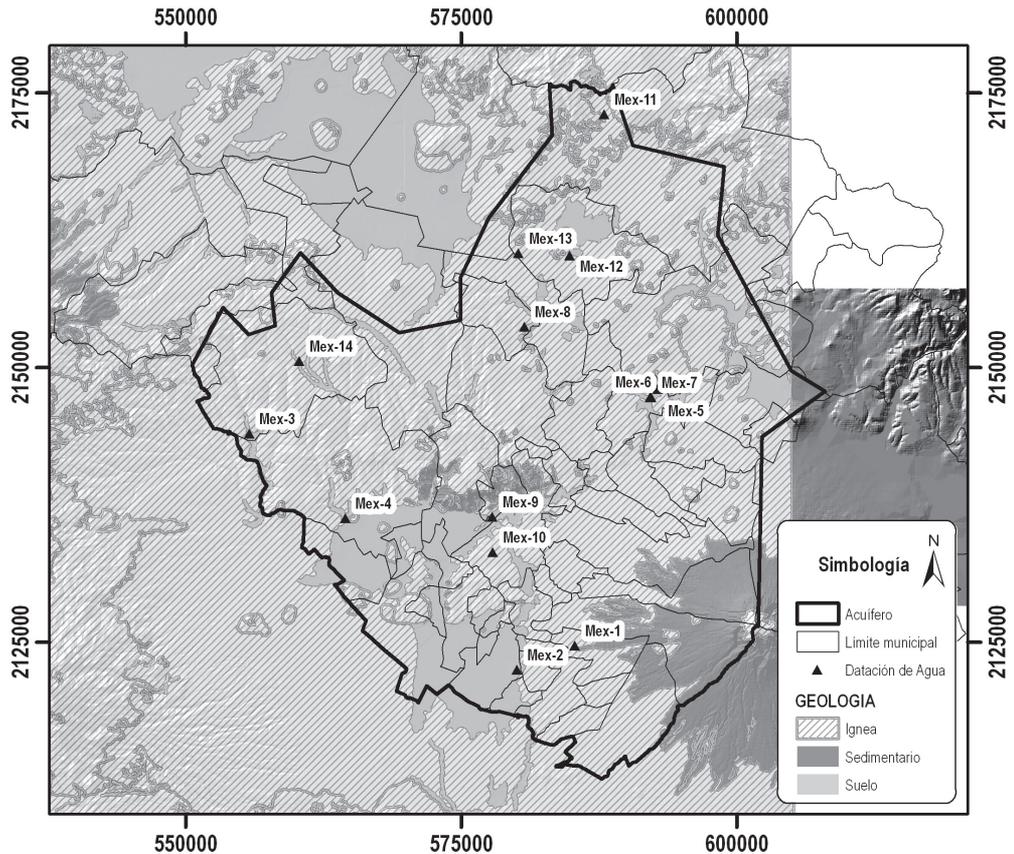


Figura 4.7. Geología de los puntos de muestreo.

A nivel nacional se han realizado trabajos de investigación cuyo tema central ha sido el estudio de la aguas residuales; en ellos, se ha determinado que la calidad del agua presenta variación espacial y temporal en función del aprovechamiento que se le haya dado, el proceso de tratamiento y la época en que se analice (Cortés y Ortiz, 2003; Palomo y Figueroa, 2006; Palomo *et al.*, 2007).

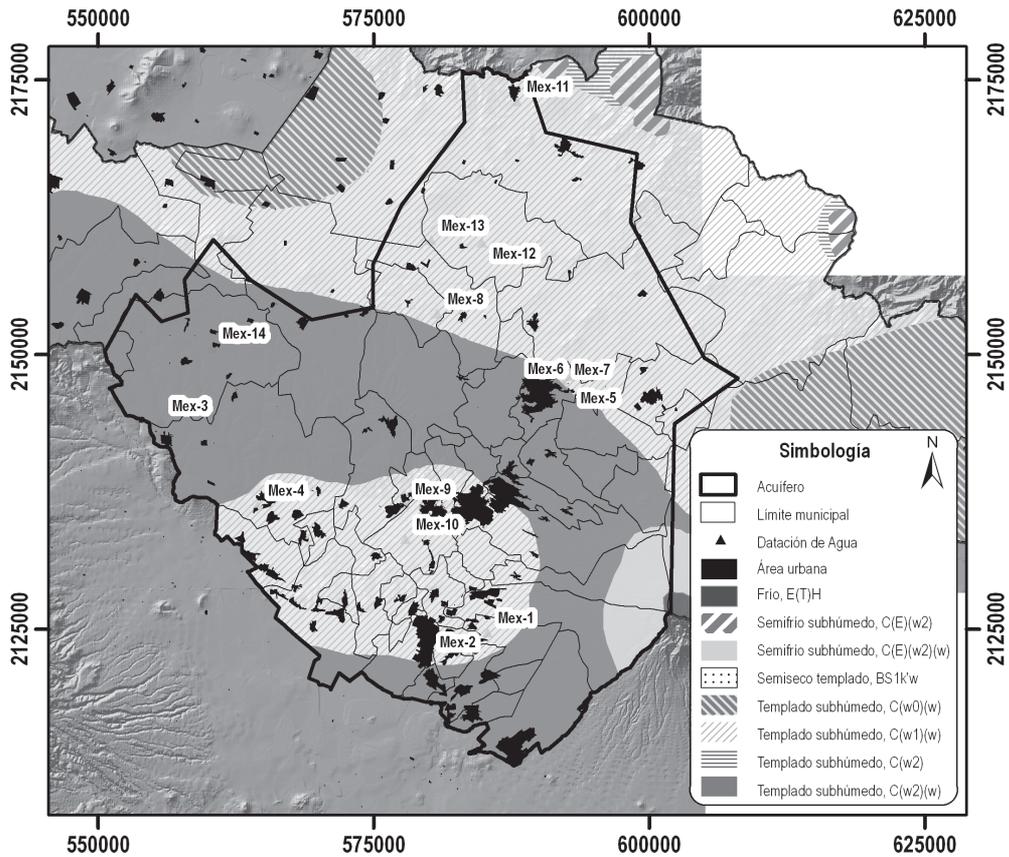


Figura 4.8. Climas del acuífero Alto Atoyac.

Las aguas residuales tratadas presentan diferentes calidades en función de la concentración de los elementos nocivos y de la carga biológica que contengan; por consiguiente, tienen diferentes efectos sobre las características del suelo, particularmente cuando se utilizan para riego agrícola (González *et al.*, 2003; Vera *et al.*, 2005) y en la recuperación de suelos salinos y sódicos (Arana *et al.*, 2000). Otros estudios se han enfocado al diagnóstico de calidad con base en las características de salinidad, DBO, contenido de grasas, nitrógeno, fósforo y microorganismos (Frias *et al.*, 1992) y al efecto de las aguas residuales sobre la fertilidad del suelo y la producción de cultivos (Zavaleta, 1987; Gutiérrez, 1990; Díaz y González, 2000).

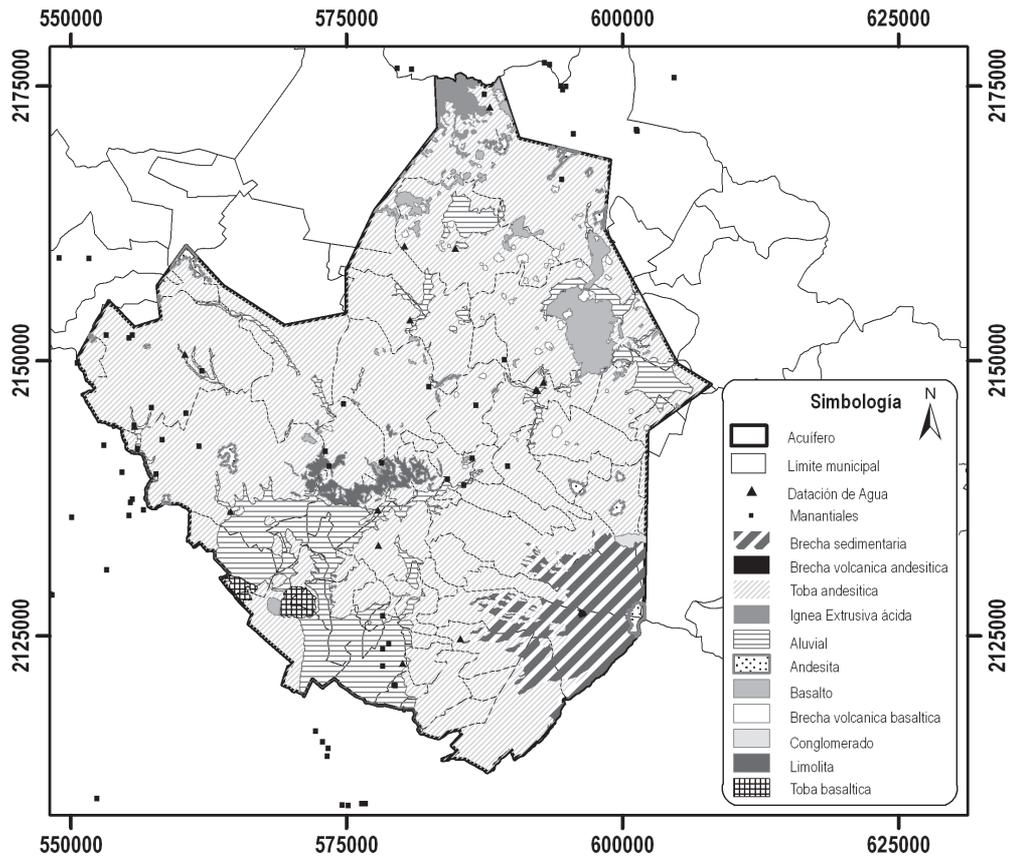


Figura 4.9. Geología del lugar y localización de manantiales.

### Evaluación del posible riesgo de salinización de los suelos

Con los valores de la conductividad eléctrica de los efluentes de las plantas de tratamiento se efectuó una clasificación desde el punto de vista de salinidad.

De acuerdo con la clasificación del agua con fines de riego propuesta por Gupta, (1994), la mayoría de los efluentes de las plantas de tratamiento clasifican como agua de buena calidad (Cuadro 4.7). La conductividad eléctrica varió en el rango de 0.612 a 1.69 dS/m. Los efluentes de las plantas de tratamiento Espíritu Santo, Ixtlacuixtla y Muñoz con conductividad eléctrica superior a 2 dS/m quedando clasificadas como salina. Los de las plantas de Tlaxco y Xicotencatl

tuvieron una clasificación de muy alta salinidad debida a la conductividad eléctrica de 4.4 y 7.1 dS/m respectivamente. El nivel de tolerancia a la salinidad del agua de riego de la mayoría de los cultivos hortícolas varía en el rango de 0.6 a 2.0 dS/m, valores superiores a este rango disminuyen el rendimiento potencial de estos cultivos (Mass, 1984). Miyamoto *et al.* (1986) reportaron que el agua de riego con conductividad eléctrica de 1 dS/m incrementó la salinidad del suelo a 3.5 dS/m en un período de 8 años, si no se aplica la fracción de lixiviación para control de la salinidad; sin embargo, este valor se incrementa a 1.5 dS/m si se aplica una fracción de lixiviación del 20% en cada riego.

### **Descargas no reguladas**

En el estado de Tlaxcala, se descargan 458.9 l/s de aguas residuales no tratadas, el 25% de este caudal se genera en los municipios de Tepetitla, Zacatelco, Apizaco y Nativitas (Cuadro 4.8). Algunas descargas clandestinas se realizan al río y a barrancas (Figura 4.10).

### **Riesgo potencial de contaminación de aguas subterráneas**

Uno de los riesgos potenciales de las descargas clandestinas es la posible contaminación de las aguas subterráneas, principalmente en los sitios donde la descarga está en la cercanía de algún aprovechamiento de agua subterránea. Se seleccionaron las longitudes o cercanía de las descargas clandestinas a los pozos en un rango de 17 a 160 m (Cuadro 4.7). La cercanía de las descargas clandestinas a los pozos de bombeo menores de 100 m constituyen un riesgo de contaminación del acuífero.

**Cuadro 4.7. Conductividad eléctrica y clasificación del agua residual tratada en las plantas de la cuenca del Río Zahuapan y el estado de Tlaxcala.**

<b>Planta de tratamiento</b>	<b>CE (dS/m)</b>	<b>Clasificación (Clase)</b>
Mazatecochco	0.910	Buena
Quilehltla	1.054	Buena
Atotonilco	1.682	Buena
Espíritu Santo	2.014	Salina
Xalostoc	1.690	Buena
Tocatlan	2.312	Salina
Villalta	1.571	Buena
Ixtlacuixtla	2.070	Salina
Tetla	1.151	Buena
Tlaxco	4.400	Muy salina
Ignacio Zaragoza	1.648	Buena
Muñoz	2.504	Salina
Tlaxcala (CGE-T)	1.100	Buena
Apetatitlan Tlatempan (CGE-T)	0.771	Buena
Atotonilco Tecomalucan	1.695	Buena
Tepeyanco (CGE-T) 1a entrada	1.294	Buena
Tepeyanco 2° entrada		Buena
Apizaco "B" (CGE-T)	0.612	Buena
San Andrés Cuamilpa	1.652	Buena
Atexcatzinco	1.028	Buena
Xicotencatl	7.100	Muy salina

**Cuadro 4.6. Caudal de aguas residuales no tratadas por municipios en el estado de Tlaxcala.**

<b>Municipio</b>	<b>Población habitantes</b>	<b>Consumo l/hab-día</b>	<b>Agua Residual l/s</b>
Santa Cruz	14729	250	12.75
Tenancingo	10559	250	7.10
Teolocholco	19868	250	9.30
Tepetitla	16105	250	21.30
Tepeyanco	8532	200	5.60
Tetlatlahuca	11268	250	2.30
Tlaxcala	83737	250	8.00
Tlaxco	17780	250	1.55
Tocatlan	5011	200	3.40
Totolac	19604	250	6.30
Tzompantepec	12201	250	12.80
Xaloztoc	13129	250	5.50
Xaltocan	7253	200	NR
Xicohtzinco	10732	250	10.30
Yauhquemecan	26225	250	1.90
Zacatelco	35036	250	26.50
Apizaco	72927	250	49.30
Nativitas	21235	250	17.70
<b>Total</b>			<b>458.90</b>

NR= No registrado.

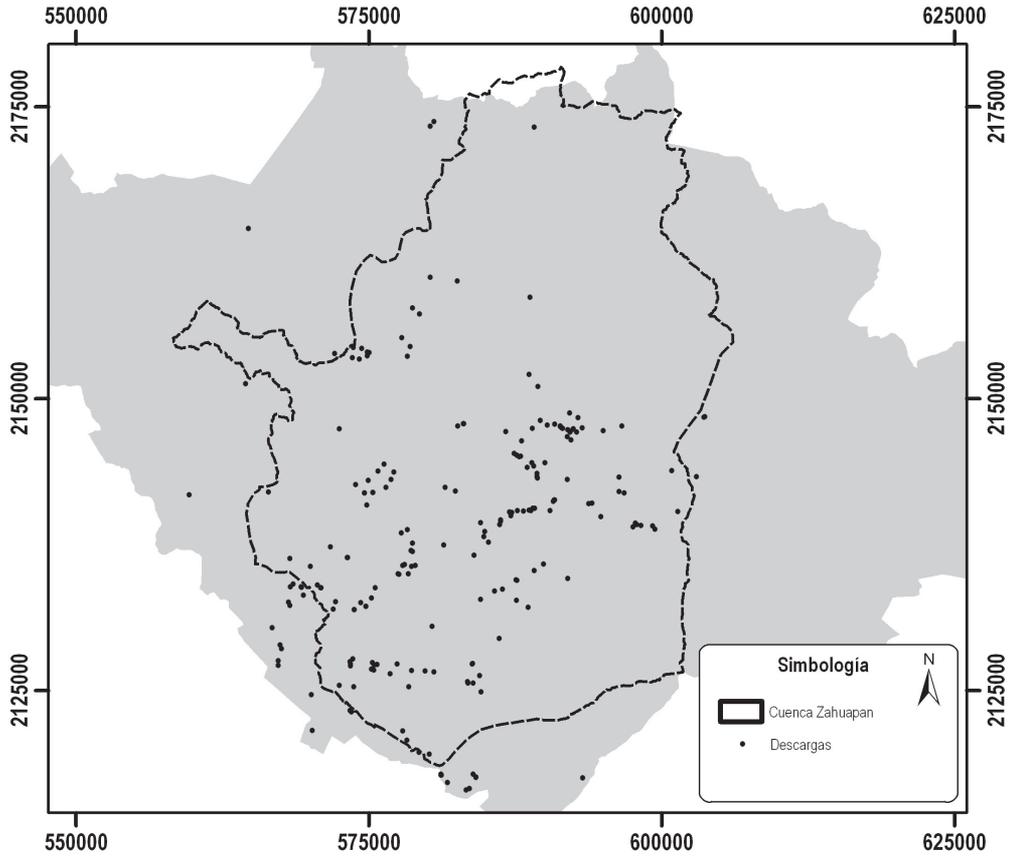


Figura 4.10. Ubicación de las descargas clandestinas de agua residual en la cuenca del río Zahuapan.

**Cuadro 4.7. Ubicación geográfica en coordenadas UTM y distancia entre las descargas de agua residual clandestinas y los aprovechamientos de agua subterránea cercanos en el estado de Tlaxcala.**

Municipio	Localidad	Descarga clandestina		Pozo cercano		Dist. (m)
		Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	
Atlangatepec	Benito Juárez	19.536667	-98.235278	19.536389	-98.234444	93
Muñoz de Domingo Arenas	San José Cuametzingo	19.513056	-98.249722	19.513083	-98.250139	44
Apizaco	San Luis Apizaquito	19.416667	-98.121944	19.4175	-98.120278	137
Apizaco	San Luis Apizaquito	19.416667	-98.121944	19.418056	-98.122222	157
Apizaco	Apizaco	19.419444	-98.152778	19.420278	-98.153611	127
Santa Cruz Tlaxcala	Santa Cruz Tlaxcala	19.355833	-98.154167	19.356472	-98.154389	80
Amaxac de Guerrero	C. Altayonco	19.351944	-98.170556	19.351361	-98.170028	82
Apetatitlan	Belén Atzitzimitlan	19.345278	-98.179722	19.345139	-98.1795	28
Apetatitlan	Tecolotla	19.335833	-98.192500	19.336389	-98.193889	160
Santa Ana Chiautempan	Tepetlaxco	19.303333	-98.124444	19.302778	-98.124167	68
La Magdalena Tlaltelulco	La Magdalena Tlaltelulco	19.287500	-98.195278	19.288278	-98.195528	92
Santa Ana Chiautempan	Chiautempan	19.329444	-98.225278	19.330556	-98.225	125
Tlaxcala	Santa María Acuiltapilco	19.266667	-98.234722	19.266111	-98.236111	159
Teolocholco	Teolocholco	19.237222	-98.202500	19.236944	-98.203611	121
Tetlatlahuca	Santa Cruz Aquiahuac	19.237222	-98.279722	19.237139	-98.279861	17
Tetlatlahuca	Santa Cruz Aquiahuac	19.233056	-98.282500	19.232778	-98.283056	66
Tetlatlahuca	Tetlatlahuca	19.241667	-98.299444	19.240222	-98.299556	159
Acuamala de Miguel Hidalgo	Acuamala	19.222500	-98.201667	19.222222	-98.201389	43

## CONCLUSIONES

### Aguas Subterráneas

Para los cuatro acuíferos del estado de Tlaxcala existe un balance positivo ya que se extraen anualmente un volumen de 214.7 Mm<sup>3</sup> y una recarga 369 Mm<sup>3</sup>.

No obstante que el balance recarga extracción es positivo para los cuatro acuíferos, existe un desequilibrio en la disponibilidad de agua per cápita, presentando los acuíferos Zahuapan y Alto Atoyac las disponibilidades de agua per cápita más bajas de 473 y 310 m<sup>3</sup>/hab-año.

De los 126 Mm<sup>3</sup> de aguas subterráneas (del acuífero alto Atoyac y Zahuapan) el 47% corresponde a uso público, el 39.2% es de uso agrícola, el 13% es industrial y menos del 1% corresponde a uso pecuario y otros servicios.

### Datación de agua subterránea

En base a la clasificación del agua con el diagrama de Piper, las muestras son predominantemente bicarbonatadas de calcio y magnesio y de acuerdo a la secuencia de Chevorateb son aguas jóvenes (Drever, 1997) éste resultado se ve reforzado con el resultado de los isótopos, los resultados arrojan que la mayoría de las muestras se consideran aguas con edades igual o menor de 55 años. Lo cual indica que el tiempo de residencia del agua es muy corto y que la recarga es rápida por lo cual se debe evitar la contaminación de los acuíferos.

Únicamente tres muestras de agua presentaron edades mayores de mil años, estas muestras se ubican en sitios donde predomina la roca ígnea (toba andesítica) en clima templado subhúmedo tipo C(W.2) (w) y cercanas a manantiales.

### Aguas Residuales

Los efluentes con conductividad eléctrica superior a 1 dS/m representan un riesgo potencial de la salinización de los suelos para uso agrícola, por lo cual, requieren un manejo adecuado para el control de la salinidad. Se recomienda determinar el RAS de los efluentes como un parámetro para evaluar los posibles riesgos de sodización de los suelos.

La concentración de coliformes fecales de todos los efluentes de las plantas de tratamiento sobrepasa los límites permisibles para uso agrícola, lo cual constituye un riesgo para la salud humana.

Se ubicaron e identificaron los pozos de bombeo de agua subterránea cercanos a descargas clandestinas de aguas residuales (longitudes menores de 100 m) los que deben ser monitoreados para identificar posibles problemas de contaminación del acuífero.

## LITERATURA CITADA

- Arana M., O. E., R. E. Arteaga T., A. Reyes R. y M. Sánchez A. 2000. Uso de ácidos y aguas residuales, en la recuperación de suelos del exlago de Texcoco. Memorias del X Congreso Nacional de Irrigación. Chihuahua Chihuahua México. pp. 56-59.
- Ayers R. S. and D. W. Westcot. 1987. La calidad del agua en la agricultura. FAO. Riego y Drenaje, 9 p.
- Bradley, R. S. 1985. Quaternary paleoclimatology: Boston, Unwin Hyman, 472 p.
- Busenberg, E. and L. N. Plummer. 1992. Use of chlorofluorocarbons (CCl<sub>3</sub>F and CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) as hydrologic tracers and age-dating tools--The alluvium and terrace system of central Oklahoma: Water Resources Research, v. 28, no. 9, pp. 2257-2283.
- Clark, I.D., and P. Fritz. 1997. Environmental isotopes in hydrogeology: New York, Lewis Publishers, 328 p.
- Cook, P. G., D. K. Solomon, L. N. Plummer, E. Busenberg, S. L. Schiff. 1995. Chlorofluorocarbons as tracers of groundwater transport processes in a shallow, silty sand aquifer: Water Resources Research, v. 31, no. 3, pp. 425-434.
- Coplen, T.B. 1993. Uses of environmental isotopes, in W.M. Alley, ed., Regional ground-water quality: New York, Van Nostrand Reinhold, pp. 227-254.
- Cortés J., J. M. y J. E. Ortiz E. 2003. Índices de calidad del agua residual del dren colector número tres del valle del Yaqui Sonora. Memorias del XII Congreso Nacional de Irrigación. Zacatecas, Zacatecas. pp. 75-78.
- De la Peña, I. 1984. Calidad de las aguas de riego. Boletín de información técnica nº 3. SARH. Distrito de riego 041, río Yaqui Sonora.
- Derra, S. 1990. CFCs-No easy solutions: Research and Development, v. 32, pp. 54-66.
- Drever, J. I. 1997. The geochemistry of Natural Waters. Prentice Hall, 3ª ed. 436 p.

- Díaz M., J.A. y A. González C. 2000. Evaluación del uso de aguas residuales en regiones administrativas, su impacto y planeación. Memorias del X. Congreso Nacional de Irrigación. Chihuahua, Chihuahua. pp. 85-91.
- Donado, L. 1999. Hidrogeología. Aplicaciones y casos de estudio latinoamericanos capítulo 3 Hidrogeoquímica.
- Frías R., J.E., M. Rivera G. y J. Fernández R. 1992. Prespectivas de las aguas residuales en la Comarca Lagunera. Resúmenes del II Congreso Regional de Investigación. DEGETA. Zona Norte. Hermosillo, Sonora. 69 p.
- González T., J. F. Mojarro D., J. N. Barrios D., A. Arellano N., J. G. López A. y J. Farías L. 2003. Efecto de la adición de agua residual urbana con diferentes niveles de tratamiento sobre el contenido de arcilla del suelo. Memorias del XII Congreso Nacional de Irrigación. Zacatecas, Zacatecas. pp. 67-74.
- Gupta R.J. 1994. Groundwater quality for irrigation In: Salinity management for sustainable agricultura. D.N.L. Rao, N.T. Singh, R.K. Tyagy(eds) Karnal India Center Soil Salinity Research Institute. pp. 89-100.
- Gutiérrez de la R., T. 1990. Uso de las aguas residuales en el riego de alfalfa. Resúmenes de Primer día de Demostración Técnica. SARH, INIFAP, CENID-RASPA. pp. 33-38
- International Atomic Energy Agency (IAEA). 1981. Statistical treatment of environmental isotope data in precipitation: Vienna, IAEA, Technical Report Series No. 206
- Mass E. V. 1984. Salt Tolerance of plants. In: Handbook of Plant. Science in Agriculture B. R. Christie (ed). CRC. Boca Raton, Florida EE.UU.
- Miyamoto S., T. Riley, G. Gobran and J. Petticrew. 1986. Effects of Saline Water Irrigation on soil salinity , pecan tree grow and nut production. Irrigation Sci. 7: pp. 83-95.
- Molina, M., and F. S. Rowland. 1974, Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom catalyzed destruction of ozone: Nature, no. 249, pp. 810-812.
- Munive de L., M. 2008. La situación actual de la Cuenca en Tlaxcala. Memorias del Foro sobre la sustentabilidad de las cuencas hidrológicas en el estado de Tlaxcala impartido en la Universidad de Tlaxcala
- Palomo R., M y U. Figueroa V. 2006. Variaciones estacionales de contaminantes fisicoquímicos en el agua residual para el Valle de Juárez Chihuahua. Memorias de la XVIII Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED. pp. 499-504

- Palomo R., M., U. Figueroa V., J. G. Martínez R., M. A. Flores. O y R. Faz C. 2007. Contenido nutrimental del agua residual en el Valle de Juárez Chihuahua. Folleto Científico N° 3. Centro de Investigación Regional Norte Centro, campo Experimental Delicias. INIFAP. pp. 1-31
- Plummer, L. N., D. L. Parkhurst, and D. C., Thirstiness. 1983, Development of reaction models for ground-water systems: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 47, pp. 665-686.
- Plummer, L. N., E. C., Prestemon and D. L., Parkhurst. 1991, An interactive code (NETPATH) for modeling net geochemical reactions along a flow path: 91-4078, 227 p.
- Plummer, L. N., E. C., Prestemon and D. L., Parkhurst. 1994, An interactive code (NETPATH) for modeling net geochemical reactions along a flow path, version 2.0: 94-4169, 130 p.
- Schlosser, P. 1992. Tritium/<sup>3</sup>He dating of waters in natural systems, *in* Isotopes of noble gases as tracers in environmental studies: Vienna, IAEA, pp. 123-145.
- Vera V., P., E. Martínez R de C., J. D. López M., R. Aldaco N. y J. Frías R. 2005. Ph, conductividad eléctrica, de un suelo regado con diferentes aguas tratadas. 2005. Memorias de la XVII Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED. pp. 538-543.
- Volk, C. M., J. W. Elkins, D. W. Fahey, J. M. Gilligan, M. Lowenstein, J. R. Podolske, K. R. Chan and M. R. Gunson. 1997. Evaluation of source gas lifetimes from stratospheric observations: *Journal of Geophysical Research - Atmosphere* 102 (D21), 25543-25564
- Zavaleta R., C. 1987. Irrigación Agrícola con aguas residuales en el Valle del mezquite. Resúmenes del XX Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Zacatecas, México. 64 p.

Vidal Guerra de la Cruz  
Enrique Buendía Rodríguez  
Eulogio Flores Ayala



## **CAPÍTULO V**

**EROSIÓN DEL SUELO EN LA CUENCA  
DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCALA**



## ANTECEDENTES

Los suelos del estado de Tlaxcala han sido objeto de varios estudios cartográficos, que van desde los muy detallados (escalas del orden de 1:250,000) en términos de clasificación de unidades de suelos (Cruz, 1949; INEGI, 1981; Werner, 1986), hasta los muy generalizados por ser de carácter regional y utilizar escalas muy pequeñas del orden de 1:1'000,000 o menores (Aeppli y Schoenhals, 1973; Estrada y Ortiz, 1982; Werner, 1986; véase también INEGI, 2000 para algunos ejemplos). Al margen de la utilidad general de estos mapas, poca información detallada se puede obtener de ellos para objetivos específicos como la identificación, cuantificación y priorización de áreas con fines de restauración de superficies críticas, como las severamente erosionadas. Adicionalmente, los resultados en cuanto a superficie estatal erosionada han sido variables, por ejemplo, Cruz (1949), reportó que casi el 67% presentaba algún grado de erosión, mientras que Estrada y Ortiz (1982) indicaron que la erosión fuerte abarcaba casi 57% de la superficie estatal, la moderada 10.7% y la ligera 32.3%. Por otro lado, los mapas de INEGI (1981) y Werner (1986) proporcionan información sobre suelos muy erosionados (tepetates) ubicándolos en unidades de suelos específicas (Cambisoles con duripanes); sin embargo, la escala utilizada y los criterios de clasificación utilizados no proporcionan suficientes detalles para propósitos prácticos.

También, se han realizado estudios que consideran los procesos que intervienen en la formación de los suelos, aspectos geológicos (Hilger, 1973), factores de riesgo de erosión en el Estado (Zarate *et al.*, 1991) y más específicamente, algunos referidos a propiedades físicas y químicas de los tepetates (Werner, 1992; Etchevers *et al.*, 1998). La utilidad de este tipo de estudios es evidente con relación a acciones concretas de manejo agronómico, sin embargo, la mayoría de estos estudios se han realizado en la porción poniente de la entidad, mientras que los municipios del norte-centro del estado no han sido abordados con suficiente detalle en los aspectos mencionados a pesar de su gran importancia hidrológico-forestal regional, particularmente porque quedan comprendidos en el área de la cuenca del río Zahuapan, la más importante del estado de Tlaxcala, cuya área de drenaje tiene una superficie de 1493.9 km<sup>2</sup> (CNA, 2002), en donde se requieren acciones de restauración (Alvarado *et al.*, 2008).

No obstante que se cuenta con información general sobre los suelos, los programas oficiales de manejo y restauración de áreas erosionadas en el estado requieren información más detallada que permita, en forma práctica y con un alto grado de precisión, definir y orientar acciones, así como priorizar la asignación de recursos para el control de la erosión y en ciertos casos tratar de revertir las tendencias negativas en la pérdida de suelos a niveles locales en el estado.

Actualmente, los datos obtenidos mediante percepción remota, es una alternativa que provee de información confiable a bajo costo. Esta es una herramienta fundamental en los procesos de actualización de cartografías temáticas como la ubicación, evaluación y monitoreo de los recursos naturales a distintos niveles casi en tiempo real, básicamente por la perspectiva general que aporta, su resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal, así como por la versatilidad de uso que presentan a través de la edición, manejo, análisis e impresión de la información digital.

Debido al riesgo permanente de erosión en distintas áreas del estado de Tlaxcala (Werner, 1986; Zarate *et al.*, 1991; Zebrowsky, 1992), se necesita ubicar y cuantificar adecuadamente las superficies y grados de erosión en el estado, como el estudio realizado por Buendía *et al.* (2008) en la parte norte del estado, específicamente en los municipios de Tlaxco y Terrenate, utilizando imágenes del sensor LANDSAT ETM+.

El objetivo de este estudio fue caracterizar el grado de deterioro y distribución de los suelos erosionados en la cuenca del río Zahuapan, Tlaxcala, para fundamentar las propuestas de manejo sustentable de los recursos naturales. Esta información es de gran utilidad por que facilita en el corto plazo, la priorización de acciones de diferente índole (restauración-reforestación, protección-conservación, investigación y fomento) no solo en áreas severamente erosionadas, sino también en áreas que se encuentren en proceso de erosión. En este sentido es importante resaltar lo expuesto por Werner (1986) en relación a que la falta de un inventario de la distribución de los duripanes (tepetates) trae como consecuencia problemas y errores importantes en las prácticas de restauración en los programas de recuperación de estos suelos (capa compactada y cementada con sílice y completamente impermeable al paso de agua y raíces) en el estado de Tlaxcala.

## MARCO DE REFERENCIA

Debido a la orografía accidentada de México, gran parte del territorio está expuesto a la erosión, particularmente a la hídrica, de uno de los recursos naturales fundamentales, que es el suelo (CENAPRED, 1994). El suelo es una estructura dinámica formada por materiales orgánicos y minerales, siendo un componente esencial del medio ambiente, ya que en él se desarrolla la vida, es frágil, de difícil y larga recuperación. El suelo está considerado como un recurso natural renovable, sin embargo, el deterioro que actualmente presenta lo hace ver como un recurso no renovable (García y Dorronsoro, 2005).

La degradación del suelo es consecuencia directa del cambio de uso de suelo que el hombre propicia buscando satisfacer sus necesidades sociales y económicas, proceso que es agravado por la falta de conocimientos sobre la dinámica y el manejo del recurso.

La erosión del suelo es un proceso con dos fases consistentes en el desprendimiento de partículas individuales de la masa del suelo y su transporte por agentes erosivos como las corrientes de agua y el viento (Morgan, 1997). La erosión se diferencia de acuerdo al agente erosivo agua o viento y al tipo de fuente de las partículas laminar, cárcavas y canalillos (Figuroa *et al.*, 1991).

La erosión hídrica es la primera causa de degradación del suelo en México (SEMARNAT, 2000). Este tipo de erosión acelerada es considerada como la pérdida del suelo a tasas que exceden a su formación natural y es atribuida a las actividades del hombre. Este fenómeno incluye el desprendimiento, transporte y depósito de las partículas del suelo, a causa de las gotas de lluvia y el escurrimiento superficial. Este tipo de erosión puede darse en un corto tiempo, por lo que es necesario generar una cartografía actualizada para evaluar la magnitud y severidad real o potencial de este problema y que constituya un punto de partida fundamental para desarrollar estrategias que controlen y prevengan la degradación de los recursos naturales.

Actualmente, se ha desarrollado tecnología que permite la ubicación y cuantificación de las zonas erosionadas casi en tiempo real, con un alto grado de precisión, sin perder calidad en la información. El manejo de imágenes de satélite (Percepción remota) y el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas complementarias con mayor auge en la actualidad, debido principalmente a la recopilación, edición, manejo, análisis y facilidad de reportar los resultados obtenidos. En el caso específico de los estudios de erosión del suelo, la percepción remota contribuye a la solución de este fenómeno que afecta en diferentes grados, la mayor parte de los suelos del país (Soria *et al.*, 1998).

La percepción remota es toda aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, asumiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de energía solar o de un haz energético artificial, por emisión propia. A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor sea almacenado convenientemente, ya sea a bordo del satélite; o bien en las estaciones receptoras, dando por entendido que pueda interpretarse para una aplicación determinada (Chuvieco, 1996). Lillesand y Kiefer (1994) definen a la percepción remota o teledetección, como la ciencia, arte, técnica o metodología para obtener información de un objeto, área o fenómeno a través del análisis adquirido por una fuente que no esté en contacto físico directo.

El reconocimiento de la capacidad de los SIG como herramienta de análisis, adquiere cada vez mayor importancia en el ámbito mundial. En México aunque un tanto retrasado con respecto a la situación mundial, la aplicación de los SIG va en aumento (Soria *et al.*, 1998).

## METODOLOGÍA

Este trabajo de investigación consistió en la definición y ubicación de grados de erosión de suelos a partir del procesamiento de cartografía digital, modelo de elevación digital y de imágenes del satélite SPOT, y estuvo integrado en las siguientes etapas:

### Procesamiento de Imágenes de satélite

Como fuente de información, se utilizaron tres imágenes (*path,row*; 590,311; 590,310 y 591,311) el sensor HRG del satélite SPOT 5 (Satélite Para la Observación de la Tierra), tomadas en julio del 2007 con una resolución espacial en el modo multiespectral de 10 x 10 m y una resolución espectral de cuatro bandas (B1: Verde:0.50 - 0.59  $\mu\text{m}$ , B2: Rojo :0.61 - 0.68  $\mu\text{m}$ , B3: Infrarrojo cercano: 0.78 - 0.89  $\mu\text{m}$  y B4: Infrarrojo medio (MIR): 1.58 - 1.75  $\mu\text{m}$ ).

Para la delimitación de la zona, se utilizó información de las cartas topográficas E14A18, E14A19, E14A28 y E14A29 de INEGI (1987) escala 1:50,000. Para delimitar la cuenca de río Zahuapan, se utilizó la información de las cuencas hidrológicas de Comisión Nacional del Agua (CNA, 1998) escala 1:1'000,000. En ambos casos, se apoyó con información digital del programa de ordenamiento ecológico general del estado de Tlaxcala (OET-CGE, 2002).

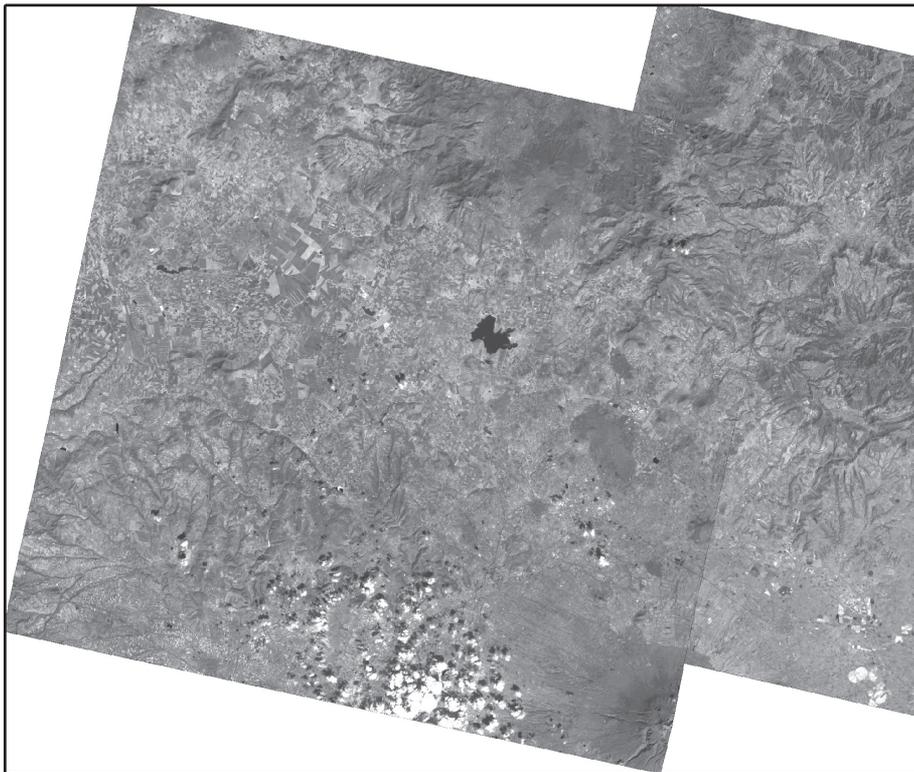
Una vez delimitada el área de estudio se importaron las imágenes a formato \*.img, que es el nativo de ERDAS® IMAGINE®, para su procesamiento (Figura 5.1).

### Georreferencia y recorte de la imagen de satélite

El procesamiento consiste en una transformación de la ubicación de los píxeles, con el fin de dar validez cartográfica a los valores digitales de la imagen y así poder realizar estudios de distancias, volúmenes y/o superficie (ERDAS, 1999).

Una imagen de satélite, al igual que las fotografías aéreas, no proporciona información georreferenciada y cada *píxel* se ubica en un sistema de coordenadas arbitrario de tipo fila-columna. El proceso de georreferencia consiste en dar a cada *píxel* su localización en un sistema de coordenadas estándar (UTM, Latitud/Longitud) para poder utilizar la imagen de satélite con otro tipo de capas en un entorno de los SIG (Johnston, 1998).

El uso de ecuaciones polinómicas nos permite modificar de forma flexible las coordenadas de la imagen a georreferenciar y el orden del polinomio determina la flexibilidad del ajuste y de la transformación. Normalmente se emplean transformaciones de tipo lineal (polinomio de grado 1), cuadrático (polinomio de grado 2) o cúbico (polinomio de grado 3).



**Figura 5.1. Imagen SPOT sin tratamiento.**

Para el caso de este estudio, se realizó la corrección geométrica de la imagen utilizando 20 puntos de control terrestre (PCT) distribuidos homogéneamente en el estado. Los PCT se obtuvieron de las cartas topográficas E14A18, E14A19, E14A28 y E14A29 de INEGI (1987) escala 1:50,000. Se utilizó un polinomio de 1er. grado, obteniéndose un error medio cuadrático de 13.42 m (Figura 5.2).

Después de realizada la corrección geométrica de cada una de las imágenes se integró un mosaico. Antes de realizar el pegado de las imágenes se evitó que las imágenes mostraran tonos diferentes, para lo cual, se separaron por bandas cada una de las imágenes y se les aplicó el procedimiento de *Histogram Match* que se refiere a mejorar la imagen transformando el histograma de una de ellas a su correspondiente de la otra imagen (ERDAS, 1999), esto con el

propósito de generar una imagen uniforme en cuanto a color. Una vez terminado el proceso, se generó el mosaico general de las cuatro bandas (Figura 5.3).

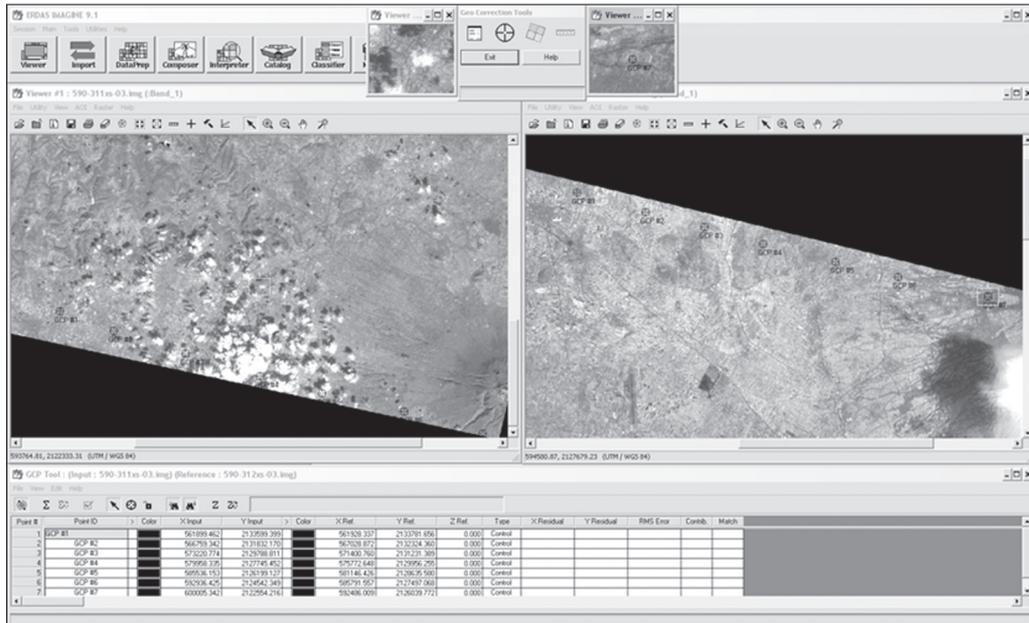


Figura 5.2. Corrección geométrica.

Una vez unificadas las cuatro bandas en las tres imágenes del satélite SPOT, se recortó la imagen que abarcara solo la cuenca del río Zahuapan (Figura 5.4).

## Realces, Índices y Filtros

Con el objetivo de mejorar la nitidez y la claridad de la imagen para la extracción de información, se realizó un realce espacial. El realce espacial de imágenes es el proceso de hacer una imagen más fina para una aplicación particular. El realce hace que características importantes de los datos crudos sean más interpretables al ojo humano. Las técnicas de realce son utilizadas a menudo, en lugar de las técnicas de clasificación para extracción de elementos.

Dentro de los métodos de realce espacial existen dos técnicas:

El realce radiométrico donde las operaciones son efectuadas directamente sobre un *píxel* sin importar o tomar en cuenta a los píxeles vecinos. Sirve para mejorar condiciones de bajo contraste, baja luminosidad o demasiada oscuridad. La otra técnica es el realce con operaciones entre vecinos que, a diferencia del realce radiométrico, las operaciones son efectuadas sobre un *píxel* pero tomando en cuenta a los píxeles que lo rodean. Sirve para eliminar ruido o para el mejoramiento de la nitidez.

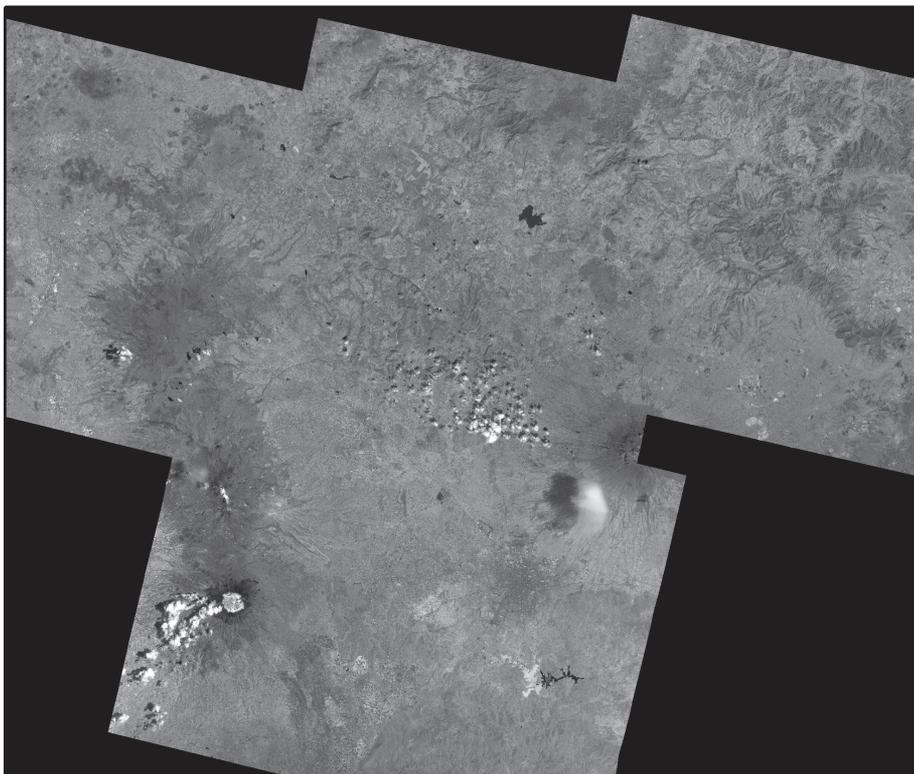


Figura 5.3. Mosaico de las imágenes SPOT.

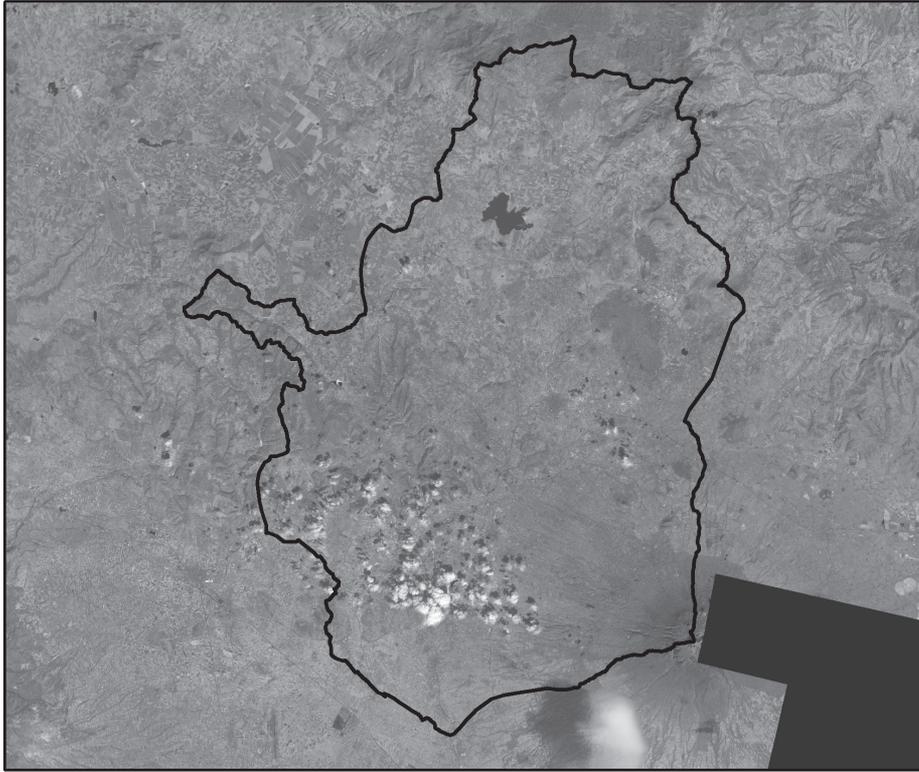


Figura 5.4. Recorte de la zona de estudio.

Para este estudio se aplicó el tratamiento digital de *Haze Reduction* a la imagen. La niebla del vapor de agua y las partículas del aerosol influyen la señal registrada, además, en terreno rugoso, las condiciones de iluminación varían (cuestas asoleadas y sombrías) modificando el comportamiento espectral “verdadero” de superficies. La corrección atmosférica con *Haze Reduction* elimina estos efectos atmosféricos y de la iluminación de la imagen utilizando un filtro adaptativo (GEOSYSTEMS, 2007).

Se emplearon los procedimientos de *crisp* y *edge enhance* como tratamientos de filtrado a la imagen de satélite a las bandas 2 y 4, respectivamente (ERDAS, 1999). Al aplicarlos se observó una disminución en las estadísticas de los niveles digitales, siendo esto producto del efecto del filtrado que logra asemejar el nivel digital (ND) de cada *píxel* al de los píxeles vecinos, reduciendo así la variabilidad espacial y resaltando los límites entre los diferentes tipos de coberturas del terreno en la escena.

También existen los realces espectrales en los que destaca los índices, que se usan para crear nuevas imágenes a partir de operaciones matemáticas entre los niveles digitales de diferentes bandas. Soria *et al.* (1998) mencionan que los cocientes e índices de vegetación son una de las transformaciones que cuenta con mayor interés en aplicaciones del medio ambiente. Un cociente implica efectuar una división, *píxel a píxel* entre los niveles digitales (ND) almacenados en dos o más bandas de la misma imagen, su empleo se justifica en dos situaciones: para mejorar la discriminación entre suelo y vegetación, y para disminuir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas.

Uno de los índices más utilizados es el *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada* (NDVI por sus siglas en inglés), que ha funcionado por muchos años para medir y supervisar el crecimiento vegetal (vigor), la discriminación entre cubierta vegetal y el suelo desnudo; y la producción de biomasa de datos basados en los satélites multispectrales (USGS, 2006).

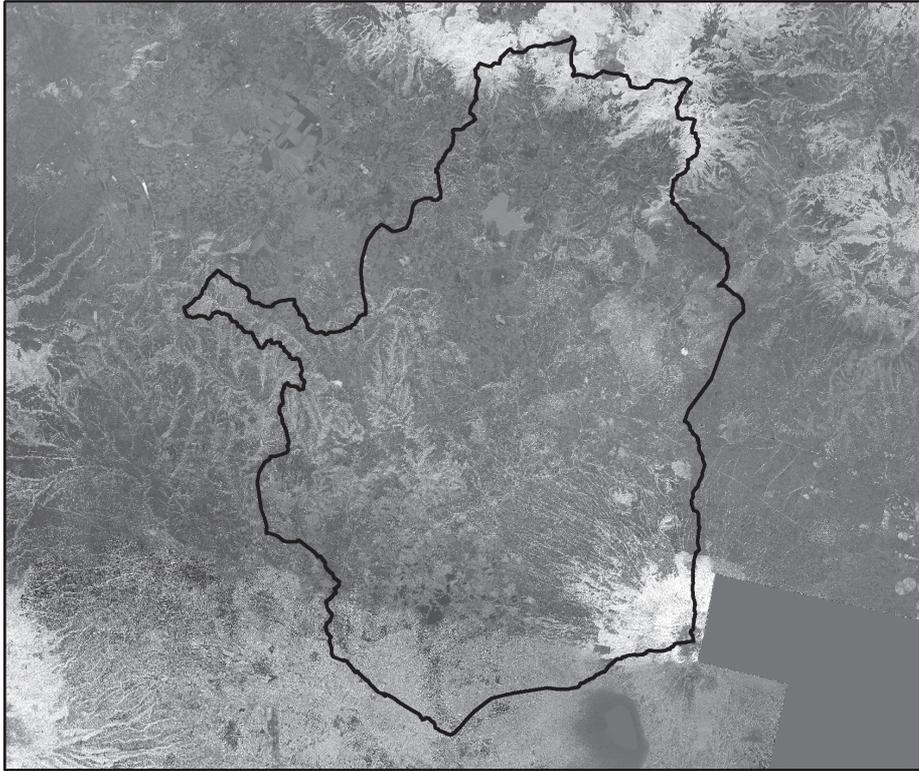
El NDVI se basa en una división *píxel a píxel*, entre los niveles digitales (ND) almacenados en dos o más bandas de la misma imagen, principalmente las bandas roja (R) e infrarrojo cercano (IR) del espectro electromagnético. Este índice se utiliza para mejorar la discriminación entre dos cubiertas con comportamiento reflectivo muy distinto. Este algoritmo produce valores de salida en la gama de -1.0 a 1.0. Los valores positivos de aumento indican vegetación verde y los valores cerca de cero y los valores negativos que disminuyen indican ausencia de vegetación como roca, suelo, agua, nieve, hielo, y las nubes (Chuvieco, 1996).

En las imágenes del sensor SPOT 5, dos de las bandas obtenidas son precisamente la roja y la infrarroja cercana por lo que el NDVI se calcula por el promedio de la intensidad medida en las bandas espectrales en el rojo: R (Banda 2) (610 – 680  $\mu\text{m}$ ) e infrarrojo cercano NIR (Banda 3) (780 – 890  $\mu\text{m}$ ) usando la expresión:

$$\text{NDVI} = [(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})] \quad (5.1)$$

El resultado es un valor normalizado que está en el rango entre -1 y 1 (Paz *et al.*, 2007), (Figura 5.5). Una vez que se generó el NDVI se agruparon los valores en rango, en donde los valores bajos de NDVI (0.1 y menores) corresponden a áreas rocosas, suelo desnudo, agua o nieve. Los valores intermedios (0.2 a 0.3) representan arbustos y pastizales, mientras que los valores altos (0.6 a 0.8) indican comunidades arbóreas (Figura 5.6).

Aunque en la imagen de satélite y la del NDVI se observa una división en la parte inferior, causada por la diferencia de fecha de las tomas, no repercute en los resultados ya que al utilizar el NDVI se discriminaron los suelos desnudos de las demás coberturas, y con el MED las zonas con pendiente menor a 6%, que corresponde a áreas agrícolas, que es la actividad predominante en esa región de la cuenca.



**Figura 5.5. Índice diferencial de vegetación normalizado.**

### **Procesamiento del MED**

El Modelo de Elevación Digital (MED) se formó a partir de curvas de nivel generadas por INEGI a escala 1:50,000, con una resolución espacial de 30 m, georeferenciados en el sistema coordenado UTM (Universal Transversal de Mercator), zona 14 y elipsoide NAD27 (*North American Datum* de 1927) (Figura 5.7). Para facilidad de proceso, el MED se recortó con las mismas coordenadas con que se recortaron las imágenes SPOT.

Con base en el MED se definieron los rangos de pendiente (Figura 5.8) y se discriminaron las áreas con menos de 6% de pendiente, ya que comúnmente éstas se usan en la agricultura.



Figura 5.6. Rangos del NDVI.

### Clasificación supervisada

Con la clasificación se busca definir un conjunto de clases, en donde los miembros de un mismo grupo deben ser tan parecidos como sea posible y ser diferentes a los miembros de otras clases. En los estudios de los recursos naturales la similitud es cuestión de grado, no interesa tanto que las clases sean homogéneas, como el que sean menos heterogéneas que el conjunto de objetos como un todo (Whittaker, 1970).

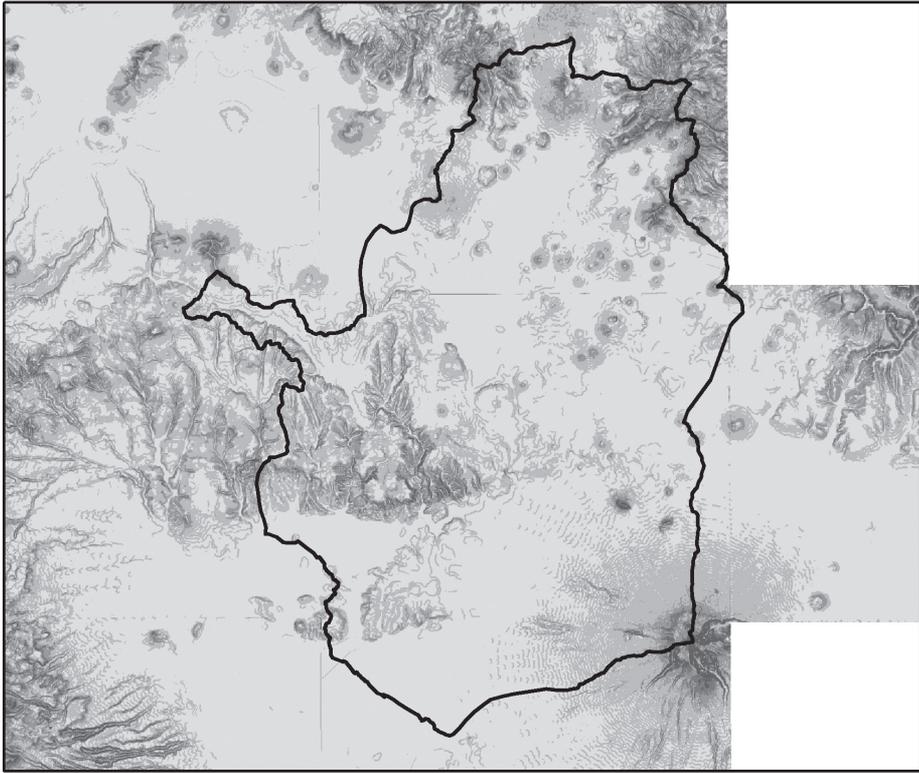
Para realizar la clasificación de grados de erosión se utilizó la combinación del NDVI, el MED y la clasificación supervisada. Del NDVI se utilizaron los valores digitales de 0 a 0.25 donde representa las zonas desprovistas de vegetación y sobreponiendo las zonas con pendientes mayores a 6%, información que fue extraída del MED (Figura 5.8). Con este procedimiento, se identificaron las zonas con erosión, no importando el grado que presentan. Posteriormente se realizaron recorridos de verificación en campo para identificar los diferentes grados de erosión

y así poder asignar campos de entrenamiento para poder discriminar los diferentes grados de erosión por medio de una clasificación supervisada de imágenes de satélite.



**Figura 5.7. Modelo de elevación digital (MED).**

Después de los recorridos de campo y con base en la literatura, se formaron cuatro grados de erosión basados en la clasificación de la FAO (1954), estas categorías se modificaron para obtener los niveles erosión: Área sin erosión, Erosión leve, Erosión media y Erosión severa. La modificación más notable en este caso es que las clases de erosión Severa y Muy severa de la FAO, se integraron para este estudio en erosión Severa (Cuadro 5.1).



**Figura 5.8. Rangos de pendientes.**

Con base en las definiciones de las clases que se muestran en el Cuadro 5.1, se definieron los siguientes criterios para la caracterización de los diferentes grados de erosión partiendo de la información de las características observadas en campo.

**Áreas sin erosión:** en esta categoría se incluyeron áreas agrícolas o con vegetación forestal suficientemente densa, para indicar que no se presenta algún grado de erosión significativa (Figura 5.9).

**Erosión Leve:** Son áreas con cobertura vegetal arbustiva, herbácea y ocasionalmente arbórea en donde se aprecia muy poca pérdida de suelo por el efecto del agua y el aire, en consecuencia el suelo mineral no está expuesto (Figura 5.10).

**Cuadro 5.1. Modificación de la Clasificación FAO de áreas erosionadas para la cuenca del Río Zahuapan, Tlax.**

Clase	Nombre de la clase (FAO)	Definición de la clase	Clase modificada
A	Erosión no manifiesta	<25% de la capa superficial, admitiendo un 10% de su superficie total con un grado de erosión B o C.	Área sin erosión
A/B	Erosión leve	>15% de la capa del suelo superficial, admitiendo de 10-25% de su superficie total con un grado de erosión B o C.	Erosión leve
B	Erosión moderada	25-75% de la capa del suelo superficial, admitiendo un 10% de su superficie total con un grado de erosión A o C.	Erosión media
B/C	Erosión severa	25-75% de la capa del suelo superficial, admitiendo de 10-25% de su superficie total con grado de erosión A o C.	Erosión severa
C	Erosión muy severa	>75% de la capa del suelo superficial, admitiendo 25% de su superficie total con grado de erosión A o B.	Erosión severa

Fuente: FAO (1954), modificado por los autores.

**Erosión Media:** Áreas con escasa cobertura vegetal, pastizales, matorrales o bosque muy abierto. El suelo mineral es somero y está expuesto, en partes el material parental (rocas y/o tepetate) está parcialmente expuesto. No se observan cárcavas aunque sí erosión en canalillos (Figura 5.11).

**Erosión Severa:** Áreas donde el material parental está totalmente expuesto y es evidente la presencia de erosión en cárcavas de un metro o mas de ancho. Estas áreas están totalmente desprovistas de vegetación, excepto en áreas (islas) remanentes, que son las únicas partes donde se observa el suelo original (Figura 5.12).



**Figura 5.9. Área sin erosión.**



**Figura 5.10. Área con erosión leve.**



**Figura 5.11. Área con erosión media.**



**Figura 5.12. Área con erosión severa.**

Una vez definidos los parámetros para la determinación de grados de erosión, se realizó la clasificación digital de las imágenes de satélite con ayuda del software ERDAS® IMAGINE® 8.7. La clasificación digital de una imagen está dirigida a obtener una nueva imagen en la que cada *pixel* esté definido dentro de la clase en que se haya incluido (grado de erosión) por el nivel digital (ND) que lo caracteriza. Para ello, se definen tres fases principales:

- Asignación de campos de entrenamiento, en la que se realiza la distribución de los píxeles de la imagen en una de las categorías definidas en la fase anterior.
- Clasificación Supervisada
- Evaluación de la clasificación.

### **Asignación de campos de entrenamiento**

Los campos de entrenamiento deben ser homogéneos y suficientemente representativos de la clase que definan. Con los ND de los píxeles elegidos, como representativos de cada clase, el programa de cómputo calcula las estadísticas elementales de cada categoría: media, rango, desviación típica, matriz de varianza-covarianza, entre otros. Dichos campos de entrenamiento se definieron en los recorridos de campo y su correspondiente zona en la imagen de satélite.

Los criterios para la selección de campos de entrenamiento fueron el número de píxeles seleccionado por categoría que varían entre  $10*m$  y  $100*m$ , siendo  $m$  el número de bandas empleadas. Se recomienda definir varios campos de entrenamiento (aunque más reducidos en número de píxeles) de una misma clase, que un solo campo de entrenamiento más grande por clase. En cuanto a la distribución de los campos de entrenamiento de una clase por la imagen, debe de abarcar todas las variaciones espaciales de dicha clase. La precisión que se obtendrá de esas áreas representativas será la primera aproximación de la clasificación de toda la zona de estudio (Lillesand y Kiefer, 1994).

Para este caso, se utilizaron un total de 83 campos de entrenamiento de las cuales 22 fueron para detectar los diferentes grados de erosión antes mencionados. Aunque el criterio de cubierta vegetal fue importante no es determinante al clasificar los tipos de erosión en el estudio, ya que existen áreas con vegetación pero que presentan diferentes grados de erosión.

Una vez asignados los campos de entrenamiento, se hizo una clasificación supervisada de la imagen en el sentido de caracterización particular de una serie características del terreno, es decir, estableciendo un modelo entre medidas digitales (imagen) y tipos de cubierta en un momento dado (características del terreno).

## Clasificación Supervisada

La clasificación supervisada está muy controlada por el analista y depende de la disponibilidad de campos de entrenamiento identificados en campo u otro tipo de información como son las fotografías aéreas, mapas o datos verdaderos de la situación del terreno, entre otras, y una asignación de píxeles a las clases previamente identificadas. Una vez ingresados los campos de entrenamiento y ser ordenados, se debe definir el método de asignación, que es un algoritmo matemático que asigna los valores de la imagen a una clase según sus estadísticas.

Uno de los métodos más utilizados es el de máxima verosimilitud, que para los objetivos de este trabajo, se considera la mejor opción para identificar las áreas erosionadas. Puesto que se tiene la media y la desviación típica de cada una de las clases, se puede utilizar algún modelo de distribución de probabilidad. El clasificador de máxima probabilidad asume que los datos siguen una función de distribución normal para asignar la probabilidad de que un *pixel* cualquiera pertenezca a cada una de las clases. El *pixel* se asigna de este modo a la clase a la que es más probable que pertenezca (ERDAS, 1999).

Este método se puede usar de forma automática, o puede establecerse algún criterio que permita asignar píxeles a una clase sólo si la probabilidad correspondiente es superior a determinado umbral. Permite por otro lado, definir algún tipo de criterio para medir la calidad de la asignación, por ejemplo la diferencia entre la máxima probabilidad y la siguiente.

## Evaluación de la clasificación

Hay que tener en cuenta que el resultado de la clasificación lleva aparejado un cierto margen de error, por lo que habrá que hacer una verificación de su fiabilidad, y cuantificarla. A esta etapa se le conoce como verdad-terreno. Para evaluar la clasificación, se levantaron 75 sitios de verificación en el área de estudio. Para ello, se utilizó un muestreo aleatorio estratificado, que se emplea en zonas extensas heterogéneas, que consiste en subdividir la zona de trabajo en compartimentos homogéneos conforme a los criterios de grados de erosión detectados (se utilizaron las unidades que resultaron de la clasificación de la imagen) y una categoría adicional que fueron zonas no erosionadas. Dentro de estas unidades homogéneas se ubican los sitios de verificación en forma aleatoria, cubriendo una superficie aproximada del 1% con respecto al total de zonas erosionadas (Chuvieco, 1996).

En cada sitio se tomaron los siguientes datos: ubicación geográfica (Latitud y Longitud), condiciones del terreno (grado de erosión sobre la base de los criterios definidos) y descripción del entorno del sitio de verificación, adicionalmente, se tomaron al menos cuatro fotografías de la zona. Con la información de los puntos verificados en campo y la proporcionada por la imagen se realizó una matriz de confusión que tiene el objetivo de evaluar la concordancia de la

clasificación realizada, con la realidad determinada en campo. A partir de ella se pueden obtener medidas de fiabilidad, tanto global como para cada categoría.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una de las medidas de precisión de la clasificación más común es la matriz de confusión (nombrada también matriz de error o tabla de contingencia). Una matriz de confusión compara categoría por categoría contra otra, la relación entre datos de referencias conocidas, y los resultados correspondientes a una clasificación automatizada (Lillesand y Kiefer, 1994).

Puesto que se trata de una matriz bidimensional, donde las filas son las clases del terreno y las columnas las categorías deducidas de la clasificación, la diagonal expresa el número de puntos verificados, en donde se produce la relación entre las dos fuentes: imagen clasificada y realidad (datos del terreno); y las marginales que suponen errores de asignación. La relación entre los puntos correctamente asignados y el total, expresa la fiabilidad global de la imagen clasificada (Chuvieco, 1996).

Dicha fiabilidad global se calculó mediante un análisis estadístico de la matriz de confusión, el cual consistió en la relación de los elementos de la diagonal con el total de los puntos muestreados:

$$Fm = (\sum Xi / \sum \sum Xij) * 100 \quad (5.2)$$

Además, se calculó el umbral inferior y superior encontrándose la exactitud real alcanzada en la imagen clasificada. Este intervalo se calcula, para un determinado nivel de significancia ( $\alpha$ ), a partir del error del muestreo ( $ES$ ) y del nivel de probabilidad ( $1-\alpha$ ):

$$F = Fm \pm z ES \quad (5.3)$$

donde  $z$  indica la abscisa del área bajo la curva normal para ese nivel de probabilidad ( $1-\alpha$ );  $ES$  el error estándar del muestreo, en función del porcentaje de aciertos ( $p$ ), de error ( $q$ ) y del tamaño de la muestra ( $n$ ):

$$ES = \sqrt{qp/n} \quad (5.4)$$

Posteriormente, se calcularon los errores de omisión y de comisión, donde las filas marginales de la matriz indican el número de *pixel* que, perteneciendo a una determinada categoría, no fueron incluidos en ella. Estos se denominan errores de omisión ( $Eo$ ). Para cada clase se calculan como:

$$Eoi = ((Xi+) - (Xii)) / (Xi+) \quad (5.5)$$

donde  $X_{i+}$  indica el marginal de la fila  $i$ , y  $X_{ij}$  la diagonal de dicha fila.

De igual forma, las celdillas no diagonales de las columnas expresan los errores de comisión; esto es, píxeles que se incluyeron en una determinada categoría perteneciendo a otra:

$$E_{ci} = ((X_{i+}) - (X_{ii})) / (X_{i+}) \quad (5.6)$$

donde  $X_{i+}$  indica el marginal de la columna  $i$ , y  $X_{ij}$  la diagonal de dicha columna.

Los errores de omisión se refieren a una definición imperfecta de la categoría. Los errores de comisión a una delimitación excesivamente amplia. También se calcularon la exactitud del usuario, definida como la relación inversa a los errores de omisión y la exactitud del productor que es la relación inversa a los errores de comisión:

$$F_{ui} = (X_{ii} / X_{i+}) * 100 \quad (5.7)$$

y

$$F_{pi} = (X_{ii} / X_{i+}) * 100 \quad (5.8)$$

para cada una de la  $i$  categorías.

Acorde a las fórmulas anteriores, la evaluación de la clasificación mostró 81.33% de concordancia como se observa en el Cuadro 5.2, indicando un alto grado de aproximación a la realidad, es decir, la clasificación supervisada de las imágenes es adecuada. Debe hacerse notar que en función a que el muestreo realizado fue aleatorio y estratificado, el número de puntos de verificación fue mayor en las clases de no erosión (NE) y erosión severa (ES), comparados con los verificados para erosión ligera (EL) y erosión media (EM) (Figura 5.13).

**Cuadro 5.2. Matriz de Confusión.**

		Clasificación de la Imagen				Puntos en la Imagen		%
		NE	EL	EM	ES			
Verificación de Campo	NE	12	0	2	7	21	57.14	
	EL	0	3	1	2	6	50.00	
	EM	0	0	5	2	7	71.42	
	ES	0	0	0	41	41	100.00	
		12	3	8	52	75	16.00	
Puntos Verificados	%	100.00	100.00	62.5	78.84			
					<b>Total</b>	<b>61</b>	<b>81.33</b>	

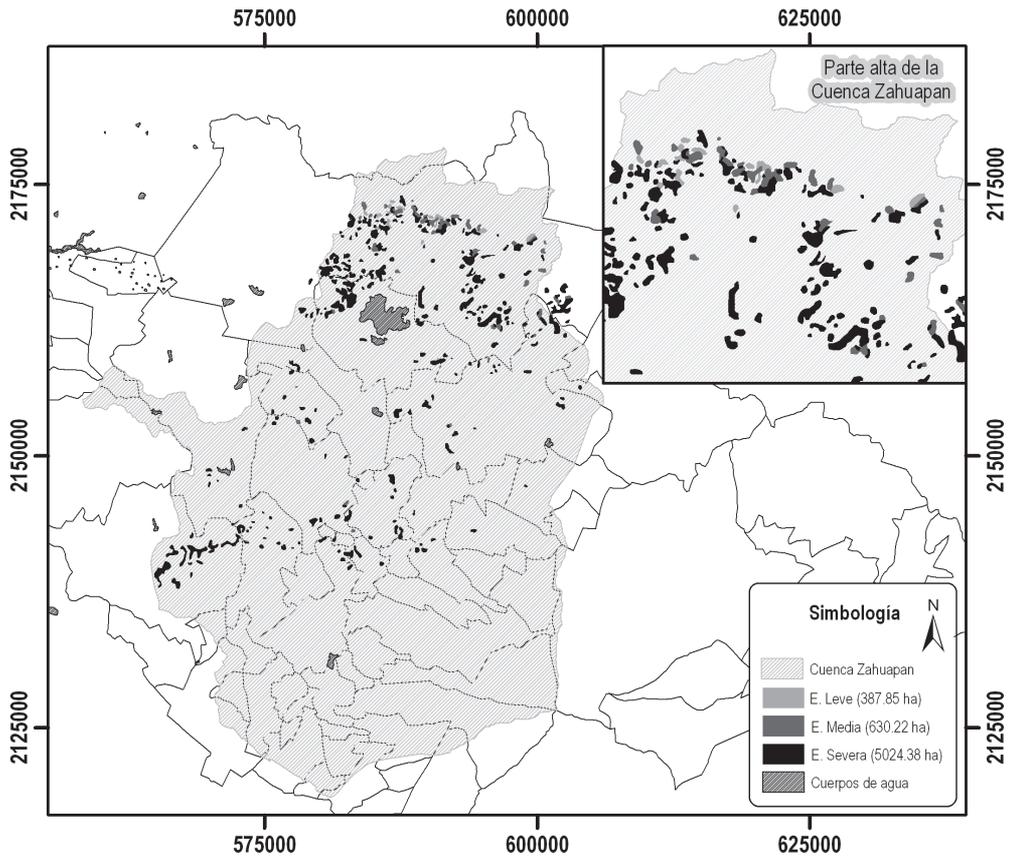


Figura 5.13. Mapa de grados de erosión de la cuenca del río Zahuapán, Tlaxcala.

Una vez validada la clasificación se procedió al cálculo de las superficies correspondientes a cada clase de erosión en la cuenca. Los resultados se presentan en la Cuadro 5.3.

Tomado en cuenta la topografía accidentada que predomina en la zona de estudio, especialmente en la parte norte, se debe poner especial atención a estas áreas, dado que generalmente se encuentran cerca de áreas forestales, la mayoría de las cuales están bajo aprovechamiento comercial.

Otro factor que debe tomarse en cuenta al analizar los resultados de la cuantificación es que las superficies agrícolas y pastizales se consideraron como áreas no erosionadas; sin embargo, esto no significa que estas áreas realmente no estén sujetas a procesos erosivos. Varios estudios indican valores altos de pérdida de suelos en áreas agrícolas incluyendo tepetates roturados incorporados a la producción agrícola (Navarro, 1998). Por lo tanto, es posible que en este

estudio algunas áreas con erosión se hayan clasificados como áreas sin erosión en las imágenes por el hecho de estar incorporados a la producción agrícola, a pesar de ubicarse en laderas.

**Cuadro 5.3. Superficies por tipo de erosión.**

	Área erosionada		% con respecto a la superficie de la cuenca
	(ha)	(%)	
Erosión Severa	4195.66	82.21	2.62
Erosión Media	589.58	11.55	0.37
Erosión Leve	318.24	6.24	0.20
<b>Total</b>	<b>5103.48</b>	<b>100.00</b>	
Superficie de la cuenca (ha)			159,752.00

No obstante, lo anterior es congruente con el objetivo de la clasificación que fue identificar áreas dentro de la cuenca con distintos grados de erosión, que puedan ser consideradas como prioritarias y susceptibles para la restauración, aunque no necesariamente para la producción agrícola. En este sentido, puede decirse que si bien la clasificación resultante puede ser conservadora en términos de superficie, las áreas identificadas corresponden a las que realmente presentan problemas de erosión y no están sujetas a otros usos, por lo que son susceptibles de ser incorporadas a procesos de recuperación o restauración.

## CONCLUSIONES

De acuerdo al resultado de la matriz de confusión, la clasificación y ubicación de las áreas erosionadas de la cuenca del río Zahuapan es adecuada para el propósito que se establece, dada la confiabilidad expresada en el análisis.

En general, el 82.21% de la superficie erosionada de la cuenca corresponde a áreas con erosión severa, es decir a áreas con afloramientos de tepetates, mientras que las áreas con erosión media y leve constituyen alrededor de 17.79% entre las dos categorías.

El hecho de que la mayor superficie de áreas erosionadas corresponda a erosión severa, indica que los procesos de deterioro de los suelos de la cuenca han ocurrido durante décadas, es decir, no son procesos nuevos, sin embargo, siguen ocurriendo en diferentes puntos aunque en superficies relativamente pequeñas.

Los resultados sugieren la urgencia de desarrollar un programa integral de prevención de la erosión de suelos en la cuenca, pero con un componente estratégico de recuperación y restauración de los suelos severamente erosionados. No obstante, estos últimos, por su naturaleza y grado extremo de degradación, requieren de mayor esfuerzo, tiempo e inversión para mostrar algunos signos de recuperación, un reto que habrá de enfrentarse cuanto antes para el beneficio de los recursos de la cuenca y sus habitantes.

## LITERATURA CONSULTADA

- Aeppli, H. y E. Schoenhals. 1973. Los suelos de la cuenca Puebla-Tlaxcala. Fundación Alemana para la Investigación Científica. Puebla, Pue., México Comunicaciones 7:15-20.
- Alvarado C., M., J. A. Colmenero R. y M. L. Valderrábano A. 2008. La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el estado de Tlaxcala, México. Ciencia ergo sum. Vol. 14-3. Universidad Autónoma del Estado de México. pp. 317-326.
- Buendía R. E., F. Islas G. y V. Guerra de la C. 2008. Identificación de áreas erosionadas por medio de imágenes LANDSAT ETM+, en Tlaxco y Terrenate, Tlaxcala, México. Terra Latinoamericana. 26(1):1-9.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 1994. Secretaría de Gobernación. Erosión. Consultado en: <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Noviembre2005/pdf/spa/doc5928/doc5928.htm> (Octubre de 2010).
- Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones Rialp. Madrid, España. 565 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Alto Atoyac, Estado de Tlaxcala. Comisión Nacional del Agua Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. México. 19 p.
- Cruz, L.C. 1949. Estudio agrológico regional del estado de Tlaxcala. Ingeniería Hidráulica en México. SRH México.

- ERDAS. 1999. ERDAS Image field guide. 5th ed. ERDAS. Atlanta, GA, USA. 627 p.
- Estrada, B. W. y C. A. Ortiz S. 1982. Plano de erosión hídrica del suelo en México, su presentación, escala 1:8'000,000 obtenido de la metodología FAO. *Geo. Agr.* 3:23-27.
- Etchevers B., J. E., M. A. Pérez O., H. Brito V., M. Vargas I. y U. López N. 1998. La fertilidad de los tepetates del eje neovolcánico en los estados de México y Tlaxcala. In: H. Navarro G., H. Poupon y M. A. Pérez, O. (Eds.) 1998. Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates). ORSTOM-CP. Montecillo, Mex. pp 17-36.
- Organización de las naciones unidas para Agricultura y la Alimentación (FAO). 1954. Estudio de la Erosión del Suelo en América Latina. Conservation Foundation y la FAO. *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Figuerola S., B., A. Amante O., G. Cortes T., J. Pimentel L., E.S. Osuna C, M. Rodriguez O., y F.J. Morales F. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Colegio de Posgraduados Centro Regional para Estudios de Zonas Áridas y Semiáridas. SAHR. 150 p.
- Hilger, W. 1973. Observaciones respecto a la geología de la región de Puebla-Tlaxcala. Fundación Alemana para la Investigación Científica. *Comunicaciones* 7:3-6.
- García I. y Dorronsoro C. Degradación del suelo. Importancia de la degradación del suelo y estado actual. 2005. Consultado en: <http://edafologia.ugr.es/conta/tema10/import.htm> (6 de septiembre de 2005).
- GEOSYSTEMS. 2007. ATCOR De-Hazing Algorithm. Consultado en: <http://www.geosystems.de/atcor/examples/index.html> (20 de febrero de 2007).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1981. Síntesis geográfica del estado de Tlaxcala, con anexo cartográfico. SPP, México. 312 p.
- Johnston C. A. 1998. *Geographic Information Systems in Ecology*. Lawton J. H. (Editors). Imperial Collage at Silwood Park Ascot, U.K. and G.E. Likens, Institute of Ecosystem Studies, Milbrook, USA. Back well Science. 239 p.
- Morgan R., P. C. 1997. *Erosión y Conservación del Suelo*. Ediciones Mundi-Prensa Madrid-Barcelona-México. 334 p.
- Navarro, G.H. 1998. Potencialidades agronómicas y sistemas rotacionales para la recuperación de suelos volcánicos endurecidos. En: Navarro, G. H., Poupon, H., Pérez, O. M. A. (Eds.) 1998. Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (tepetates). ORSTOM-CP. Montecillo, Mex. pp. 37-59.

- Paz P., F., E. Palacios V., M. Bolaños G.; L. A. Palacios S.; M. Martínez M., E. Mejía S. y A. Huete. 2007. Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVI<sub>cp</sub>. *Agrociencia* 41: 539-554.
- Programa de Ordenamiento Ecológico General del Estado de Tlaxcala (OET-CGE). 2002. Coordinación General de Ecología, Gobierno del estado de Tlaxcala. Tlaxcala, Tlax. 340 p.
- Lillesand, T. M., y R. W. Kiefer 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley and Sons Inc., 3d ed., New York, U. S. A., 750 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2000. Dirección General de Estadística e Información Ambiental. Factores asociados a la degradación. 2000. URL: [http://www.semarnat.gob.mx/estadisticas\\_2000/informe\\_2000/03\\_Suelos/3.4\\_Factores/index.shtml](http://www.semarnat.gob.mx/estadisticas_2000/informe_2000/03_Suelos/3.4_Factores/index.shtml) (22 de noviembre 2008).
- Soria, R. J., C. A. Ortiz S., F. Islas G. y V. Volke H. 1998. *Sensores remotos: Principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales. Experiencias en México*. Primera edición. Publicación Especial 7. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- United States Geological Survey. 2006. Which is NDVI? <http://edc.usgs.gov/greenness/whatndvi.html&sa=X&oi=translate&resnum=10&ct=result&prev=/search%3Fq%3Dndvi%26star%3D20%26hl%3Des%26sa%3DN> (17 de febrero de 2007).
- Werner, G. 1986. *Los suelos en el estado de Tlaxcala, altiplano central mexicano*. Universidad Autónoma de Tlaxcala-Centro de Estudios Municipales. Tlaxcala. 132 p.
- Werner, G. 1992. Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el estado de Tlaxcala: Distribución, rehabilitación, manejo y conservación. *Terra num. Esp.* 10:318-331.
- Whittaker, R. H. 1970. *Communities and ecosystems*. Editorial Macmillan, New York. 160 p.
- Zarate, Z. R., M. Anaya G., C. A. Ortiz, S. y M. E. Ramírez G. 1991. Diagnóstico y control de la degradación de la tierra en el estado de Tlaxcala. *Agrociencia* 2(3):59-81.
- Zebrowsky, C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina. *Terra num. esp.* 10:15-23.

## **Cartografía consultada**

Comisión Nacional del Agua (CNA). 1998. Mapa de Cuencas Hidrológicas. Escala 1:250,000. México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1987. Cartas topográficas: E14A18, E14A19, E14A28 y E14A29, escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Secretaría del Estado de México. México DF.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. Municipios. Escala 1:1,000,000. <http://www.inegi.gob.mx>. (08 de marzo de 2007).



Vidal Guerra de la Cruz  
Juan Estrada Ávalos  
Ramón Trucíos Caciono

## **CAPÍTULO VI**

**ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DE LA  
VEGETACIÓN EN LA CUENCA ALTA DEL  
RÍO ZAHUAPAN, TLAXCALA**



## INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de crecimiento económico continuo y dinámico del estado de Tlaxcala, los recursos forestales tienen un valor relevante como fuente de bienes y servicios que la sociedad demanda en forma creciente. Por lo anterior, todas las acciones actuales y futuras que contribuyan a su adecuado manejo y aprovechamiento deben ser prioritarias en la política ambiental del estado.

En la actualidad, aproximadamente 20% de la superficie del estado de Tlaxcala se encuentra cubierta por bosques, principalmente de clima templado, en los que predominan coníferas como el pino, oyamel y sabino, así como latifoliadas que incluyen encinos, ailes y otras especies (Acosta, 1991; Gobierno del Estado de Tlaxcala, 2002; SEMARNAT, 2009). La superficie forestal del estado es de 85,376 ha distribuidas geográficamente en las regiones forestales de Tlaxco-Terrenate, Calpulalpan-Nanacamilpa y el Parque Nacional Malinche.

De la superficie forestal arbolada de la entidad, estimada en 51,709 ha, poco más de 11 mil ha se encuentran sujetas a manejo forestal regulado en las regiones de Tlaxco-Terrenate y Calpulalpan-Nanacamilpa (SAG, 1975; Guerra *et al.*, 2007). La importancia ecológica de estos bosques para el estado es muy obvia, adicionalmente los productos que generan representaron en el año 2000, un aporte a la economía estatal de 26.9 millones de pesos (SEMARNAT, 2000).

A pesar de los esfuerzos considerables por conservar, proteger y fomentar los recursos forestales del estado, diversos factores han contribuido a su continuo deterioro, pérdida de la diversidad biológica y en consecuencia de su capacidad productiva, con implicaciones negativas importantes para su manejo y aprovechamiento sustentable. Adicionalmente, la tendencia actual de aumentar la producción y diversificar objetivos de manejo (CONAFOR, 2004), se requiere, no solo la incorporación de más áreas forestales al manejo regulado, sino también la intensificación de los métodos actuales de aprovechamiento, lo cual implicaría una mayor presión sobre los recursos forestales del estado (Guerra *et al.*, 2008).

El estado de Tlaxcala destaca por ser una de las entidades de la república con mayor pérdida y deterioro de los suelos (SEMARNAT-COLPOS, 2003), derivado principalmente del cambio de uso, que trae como consecuencia la erosión hídrica y eólica (Alvarado *et al.*, 2007). En la mayoría de los casos, el cambio de uso ocurre en áreas con aptitud forestal, por lo cual, se han alterado de forma irreversible extensas superficies. Actualmente, se considera que más del 90% de los suelos presentan algún grado de erosión; es decir, desde ligera hasta muy severa.

Únicamente en los municipios de Tlaxco y Terrenate, ubicados en la parte alta de la cuenca del río Zahuapan, la erosión severa (afloramiento de tepetates) afecta a poco más de 3 mil ha (Buendía *et al.*, 2008). No obstante, cabe anotar que se han realizado en el pasado, y aun actualmente, esfuerzos considerables por parte de los gobiernos estatal y federal, para revertir esta problemática en la entidad (Werner, 1986; Magaña *et al.*, 2008).

En este contexto, el conocimiento detallado de las características de la vegetación en la cuenca del río Zahuapan adquiere gran relevancia por ser la base técnica de todas las acciones que se instrumenten para el manejo sustentable de los bosques de la cuenca y sus recursos asociados como el suelo y el agua.

El objetivo de este capítulo es caracterizar los atributos estructurales y de composición de los bosques, así como la regeneración natural de especies arbóreas en las áreas forestales en la cuenca alta del río Zahuapan.

## ANTECEDENTES

El estado de Tlaxcala se ubica dentro del Reino Neotropical, en la región xerófila mexicana y en la provincia de la Altiplanicie, la cual se extiende desde Chihuahua y Coahuila hasta Jalisco, Michoacán, Estado de México, Tlaxcala y Puebla (Rzedowski, 1978). Esta situación geográfica junto con el relieve accidentado, la variedad climática, y en menor medida edáfica, producen una gran diversidad de asociaciones vegetales en la región (Lauer, 1973).

De acuerdo con el estudio realizado por CONAFOR (2003) desde el punto de vista forestal, Tlaxcala tiene cuatro grandes regiones, dos de ellas conforman las zonas forestales que están sujetas a aprovechamientos comerciales: la región Tlaxco-Terrenate y la región de Calpulalpan-Mariano Arista; otra se encuentra enmarcada dentro del área natural protegida *Parque Nacional la Malinche* y la cuarta comprende la región forestal con bosques fragmentados de *Juniperus spp.*, *Quercus spp.* y *Alnus spp.* principalmente, que dominan la región centro poniente de la entidad (Figura 6.1).

La vegetación del estado de Tlaxcala ha sido objeto de varios estudios que van desde muy descriptivos en términos ecológicos, hasta los de carácter cuantitativo. Entre los primeros destacan los de Ern (1973), que describe los rasgos más relevantes de composición, repartición e importancia ecológica de la vegetación en la región Puebla-Tlaxcala, en tanto que Klink (1973) analiza la distribución y composición de la vegetación en función de las características climáticas de la región.

Por otro lado, se han realizado diversos estudios cuantitativos cuyos resultados varían en términos de la clasificación y cuantificación de la superficie forestal del estado (Cuadro 6.1). Por ejemplo, de acuerdo al Estudio Básico de Vegetación y Uso del Suelo (CONAFOR, 2003) la superficie forestal del estado es de 94,240 ha; de las cuales 80,146 ha son arboladas, siendo 60,563 ha de coníferas únicamente; 12,321 ha están cubiertas por una mezcla de coníferas y latifoliadas, y 7,262 ha son bosques de latifoliadas. Adicionalmente, se encuentran 3,289 ha de matorrales, 298 ha de otros tipos de vegetación y 10,507 ha de áreas perturbadas.

La información anterior difiere mucho con la reportada por el Inventario Forestal de Tlaxcala de 1975 (SAG, 1975) elaborado treinta años antes, que clasificó 172,375 ha, como superficie forestal, de las cuales 59,000 ha estaban arboladas y 113,375 ha como áreas perturbadas. De la superficie arbolada reportada por el inventario, 33,075 ha correspondieron a bosques de coníferas, 19,725 ha estaban cubiertas por una mezcla de coníferas y latifoliadas y 6,200 ha se consideraron como extensiones compuestas por latifoliadas (SAG, 1975).

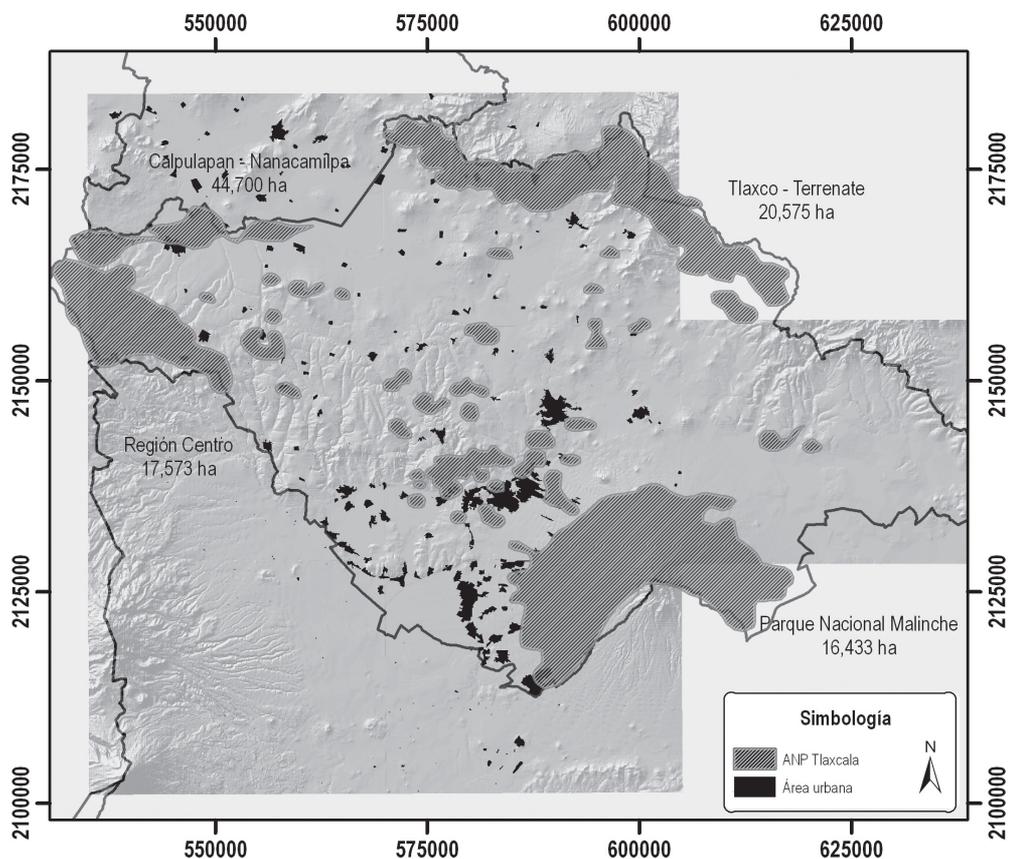


Figura 6.1. Regiones forestales en el estado de Tlaxcala (tomado de CONAFOR, 2003).

Si bien estas diferencias pueden deberse a los métodos, tipo y calidad de información básica y cartográfica empleados en cada estudio, así como al hecho de que no todos incluyeron información de campo, es claro que ante la magnitud de las diferencias, solo pueden extraerse conclusiones muy generales sobre la vegetación, y para efectos de definición de programas y estrategias de manejo forestal son muy limitados. Esta situación es particularmente relevante para las áreas forestales con aprovechamientos comerciales, como la región de Tlaxco, que incluye la cuenca alta del río Zahuapan, y es la más importante desde el punto de vista comercial, por comprender la mayor superficie arbolada y concentrar la mayor producción maderable de la entidad (Guerra *et al.*, 2008).

Sin embargo, estudios detallados sobre la estructura y composición específica de la vegetación forestal del estado de Tlaxcala, particularmente de la cuenca del Zahuapan, son prácticamente inexistentes, a pesar de que este tipo de información es fundamental, especialmente en áreas sujetas a aprovechamientos forestales persistentes.

**Cuadro 6.1. Tipos de vegetación y superficies forestales en el estado de Tlaxcala de acuerdo con diferentes estudios.**

Tipo de Vegetación	Inventario Forestal (SAG, 1975)	Inventario Forestal (SARH, 1994)	Estudio Básico de Vegetación (CONAFOR, 2003)	Programa de Ordenamiento Ecológico (CGE, 2002)	Estudio de superficies boscosas (CGE, 2004)
	Superficie (ha)				
Bosques de coníferas	33,075	33,051	60,563	34,580	0
Bosque de coníferas y latifoliadas	19,725	10,718	12,321	10,876	0
Bosques de latifoliadas	6,200	7,940	7,262	4,719	0
Sup. total arbolada	59,000	51,709	80,146	50,175	83,874
Áreas perturbadas	113,375	28,578	10,507	27,550	0
Sup. total forestal	172,375	80,287	90,653	77,725	101,611

Fuente: Elaboración propia con datos de los estudios referidos. Ver bibliografía.

La caracterización de la estructura de los ecosistemas forestales es una condición importante para tomar decisiones sobre su manejo. En este sentido, interesan particularmente la diversidad de especies y la estructura espacial y dimensional de los ecosistemas, que se refiere a la

distribución de las principales características arbóreas en el espacio, con especial atención en la distribución de las diferentes especies y la distribución de las mismas por clases de tamaño. Estos estudios se realizan mediante procedimientos cuantitativos que permiten su evaluación y monitoreo en diferentes etapas de desarrollo a nivel de rodal (Aguirre, 2002).

En este contexto y dada la importancia hidrológica de la cuenca alta del río Zahuapan en el estado y en la región Puebla-Tlaxcala, hacen evidente la necesidad de información actual y detallada sobre las características estructurales y dasométricas de la cubierta forestal en esta parte de la cuenca.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

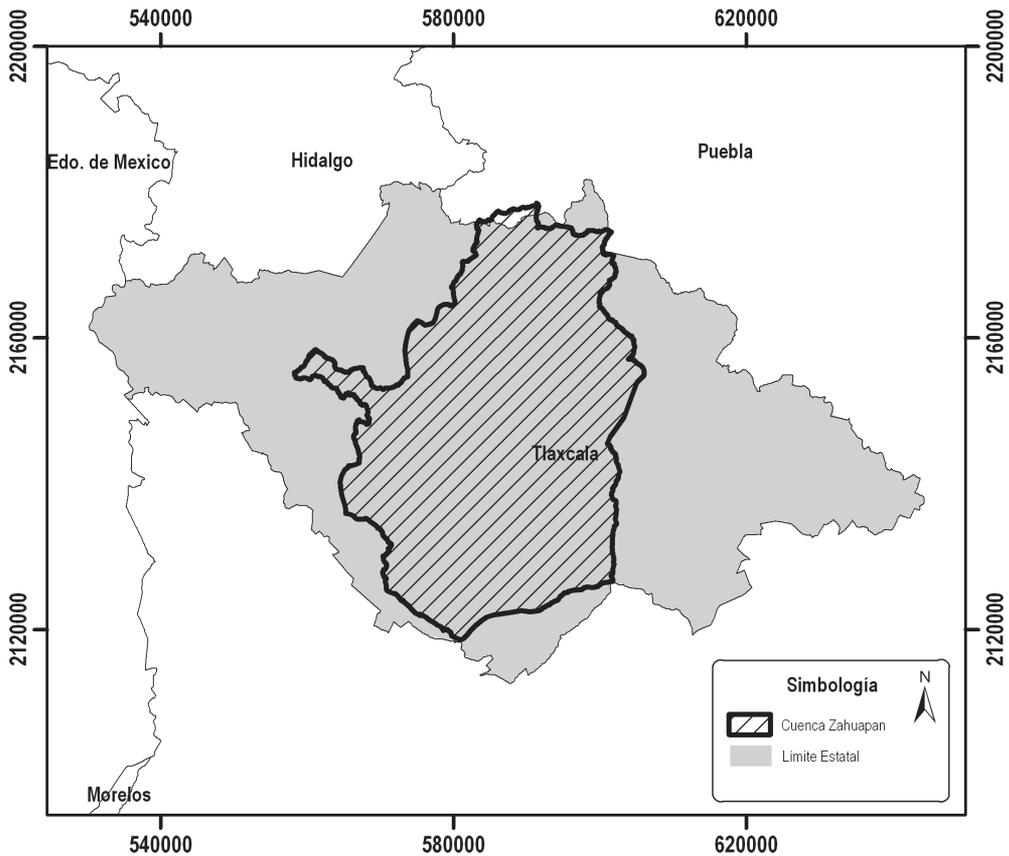
### **Área de estudio**

El área que comprende la cuenca del río Zahuapan se extiende desde la Sierra de Tlaxco al norte, hasta la confluencia con el río Atoyac en Nativitas al sur del estado. Incluidos los afluentes, valles y zonas con diversos usos del suelo, agua y vegetación, esta cuenca comprende poco más del 50% de la superficie estatal (Figura 6.2). En el caso particular de este estudio únicamente se incluyen las áreas con vegetación forestal en la región de Tlaxco, específicamente las comprendidas en las microcuencas Atotonilco, El Fondón, El Peñón y Tlaxco (Figura 6.3).

### **Inventario forestal**

El inventario forestal incluyó tres fases, planeación, levantamiento de información de campo y procesamiento de la información. En la primera se realizó la revisión, integración y procesamiento de la información cartográfica disponible que incluyó imágenes de satélite, cartografía de uso de suelo y vegetación.

La cartografía base es un elemento fundamental para efectuar la caracterización de la vegetación, ya que permite ubicar objetivamente los puntos de muestreo para cubrir en forma adecuada todos los tipos de vegetación representados en el área de estudio. Para la elaboración de la cartografía base digital se utilizó la siguiente información.



Fuente: CNA 2005.

**Figura 6.2. Ubicación de la cuenca del río Zahuapan, estado de Tlaxcala.**

Vectoriales del INEGI (1990 y 2005): Capas de vías de comunicación terrestre (carreteras), localidades, límite estatal de Tlaxcala, límite municipal, curvas de nivel, ciudades principales, hidrología lineal y uso actual del suelo. Datos *raster*: Ortofotos digitales de la carta topográfica 1:50,000 E14B23 (UTM m, Clarke 1866, zona Q-14, *pixel* 2m escala 1:20,000) compuesta por E14b23\_a, E14b23\_b, E14b23\_c, E14b23\_d, E14b23\_e y E14b23\_f (INEGI, 1995; 2000).

Para determinar la cobertura de copa se tomó la capa "foretlax.shp" del "Estudio básico de vegetación y uso del suelo" elaborado por CONAFOR (2003), en la cual se establecen tres categorías basadas en la cobertura de copa que son: menor a 10%, entre 10 y 30% y mayor a 30%.

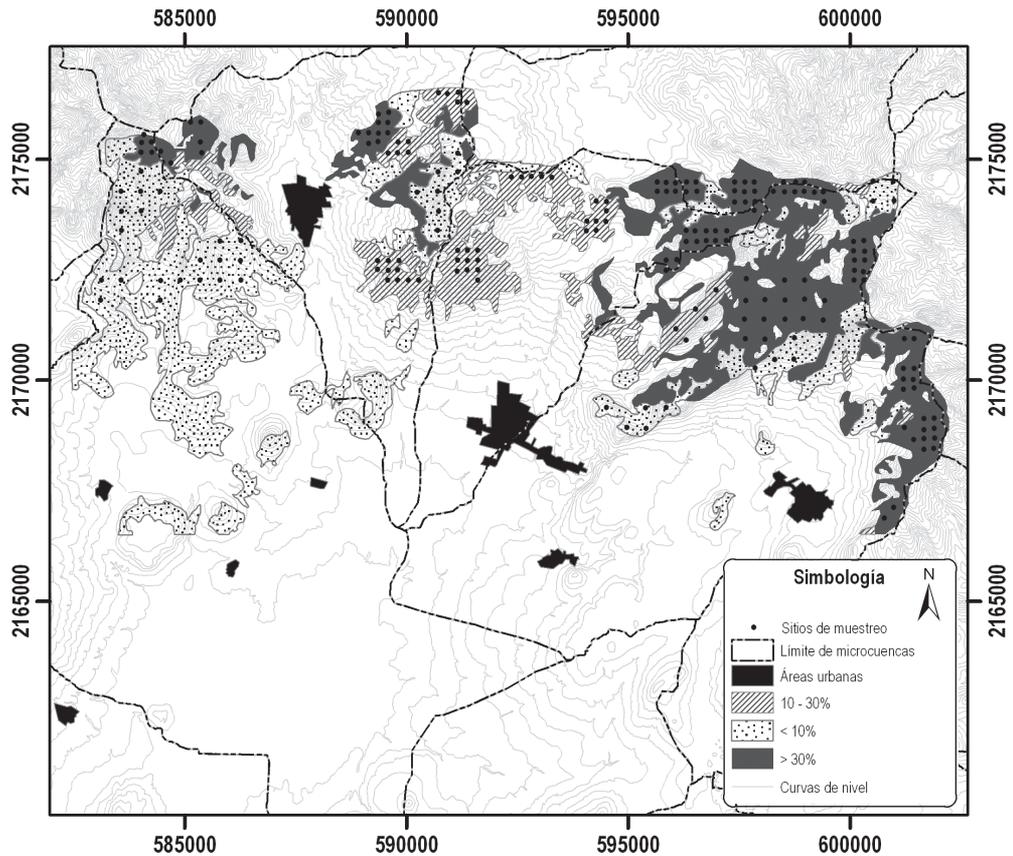


Figura 6.3. Área específica de estudio que incluye las microcuencas Atotonilco, El Fondón, El Peñón y Tlaxco, estado de Tlaxcala.

Como criterio adicional se consideró la distribución de los tipos de comunidad arbórea presentes en las microcuencas del área de estudio, con el propósito de incluir a los más representativos en cada una.

### Procesamiento de la información cartográfica

A partir de las curvas de nivel se elaboró un Modelo Digital de Elevación (MDE) para determinar las diferentes alturas del terreno, se delimitaron las microcuencas que conforman la parte alta de la cuenca del río Zahuapan hasta confluir con la laguna de Atlangatepec.

Con base en la estratificación por coberturas de copa (CONAFOR, 2003), se consideró una intensidad de muestreo de 1% para el estrato de menos de 10% de cobertura y 2% para los

otros dos estratos. Con esta base se determinó la distancia promedio entre sitios de muestreo de la vegetación, el cual varió desde 223 hasta 520 m. Posteriormente se elaboró una capa *GRID* con la asignación de los puntos de muestreo en la capa de las microcuencas que confluyen al río Zahuapan. De esta distribución resultaron un total de 197 sitios de muestreo: 73 sitios en Atotonilco, 26 en El Fondón, 41 en El Peñón y 57 en Tlaxco.

### **Levantamiento de información dasométrica**

Con la información generada en la fase anterior se procedió a planear y ejecutar el trabajo de campo, que consistió en la ubicación y medición de los sitios de muestreo de la vegetación. En esta etapa se concertó con los propietarios y técnicos responsables de cada uno de los predios incluidos en la muestra, las fechas y rutas de accesos a cada uno de los sitios.

La toma de datos dasométricos consistió en la ubicación geográfica con un equipo GPS y delimitación de parcelas circulares de 1000 m<sup>2</sup> en los que se midieron los siguientes atributos: diámetro normal, altura total, edad en coníferas y cobertura de copa de todas las especies arbóreas presentes. En una subparcela de 12.5 m<sup>2</sup> ubicada sistemáticamente dentro de la parcela grande se contabilizó la regeneración de especies arbóreas, midiendo la altura total de plántulas y brinzales de cada especie. Asimismo, en cada sitio se determinaron las características del medio físico que incluyó básicamente la pendiente, elevación y exposición.

La información obtenida se capturó en Excel<sup>®</sup>, para facilitar la ordenación y revisión minuciosa de la misma antes de proceder al análisis estadístico, que fue realizado en el programa SPSS<sup>®</sup> (1999) para obtener los atributos estructurales de la vegetación.

## **RESULTADOS**

### **Aspectos fisiográficos**

La distribución de la vegetación en la cuenca es reflejo de las condiciones climáticas y fisiográficas predominantes. En este sentido, es importante notar que todas las microcuencas presentan exposiciones S o SO, que normalmente son más secas y cálidas, por tanto, favorecen la presencia de especies de pino, encino y sabino y en general son limitantes para las especies que demandan más humedad y sombra como el oyamel.

La elevación promedio de las microcuencas varió de 2800 a 3100 msnm, aunque la elevación mínima registrada fue de 2580 msnm (El Fondón), y la máxima de 3280 msnm (Atotonilco). Las pendientes promedio estuvieron entre 23 y 77%, siendo la mínima de 1% (El Peñón) y la máxima de 90% (El Fondón, El Peñón y Tlaxco). Es importante destacar que la variabilidad fisiográfica en

la cuenca no siempre determina los parámetros observados en la estructura de la vegetación, ya que una porción importante de estos bosques ha estado sujetos a programas de manejo desde hace más de 20 años (Cuadro 6.2).

**Cuadro 6.2. Aspectos fisiográficos de las microcuencas que integran la cuenca alta del río Zahuapan, Tlaxcala (valores promedio).**

Microcuenca	Cobertura (%)	Pendiente (%)			Exposición	Altitud (msnm)		
		Mínima	Media	Máxima		Mínima	Media	Máxima
	<10	20	57	80	S	2745	2955	3280
Atotonilco	10-30	25	49	80	S	2865	2927	3050
	>30	10	51	80	SO	2880	3130	3425
El Fondón	<10	5	59	90	S	2580	2828	3082
	>30	30	77	90	SO	2875	3043	3120
El Peñón	<10	25	61	90	O	3015	3086	3180
	10-30	1	24	70	SO	2770	2884	3040
	>30	5	37	85	SO	2800	2905	3075
Tlaxco	10-30	3	23	75	S	2800	2933	3055
	>30	10	48	90	S	2295	3041	3176

### Superficie forestal

Con base en el estudio básico de la vegetación del estado de Tlaxcala (CONAFOR, 2003) en el área específica de estudio, la superficie total arbolada es de 7,400 ha, que incluye diferentes grados de cobertura de copa. Destaca el hecho que la cobertura menor a 10% es la que mas superficie ocupa, principalmente en la microcuenca El Fondón, que es la más cercana a la laguna de Atlangatepec; asimismo esta microcuenca presentó la menor superficie con cobertura mayor a 30%. El caso contrario se observó en la microcuenca Atotonilco, que presentó la mayor superficie con cobertura mayor a 30% y una superficie de 698.36 ha en la cobertura menor a 10% (Cuadro 6.3).

Las microcuencas El Peñón y Tlaxco mostraron tendencias similares en cobertura de vegetación, lo cual sugiere que tienen condiciones ecológicas similares debido a su cercanía geográfica.

**Cuadro 6.3. Superficie forestal arbolada (ha) por cobertura de copa y microcuenca en la cuenca alta del río Zahuapan, Tlaxcala.**

Microcuenca	Cobertura de copa (%)			Superficie total (ha)
	<10	10-30	>30	
Atotonilco	698.36	730.14	1556.06	2984.56
El Fondón	1729.05	111.55	57.21	1897.80
El Peñón	564.94	399.15	370.07	1334.15
Tlaxco	137.83	548.15	497.71	1183.69
Total	3130.18	1788.98	2481.05	7400.20

Fuente: CONAFOR, 2003.

Destaca el hecho de que casi el 50% de la superficie forestal arbolada de la cuenca corresponda a vegetación con cobertura menor a 10%, lo cual tiene implicaciones importantes en términos de captación de agua. La baja cobertura de vegetación evidentemente también deriva del hecho de que las exposiciones sur, que predominan en la cuenca, por ser más secas y cálidas soportan bosques menos densos.

### Composición y densidad del estrato arbóreo

Las comunidades vegetales predominantes en el área de estudio son bosques de pino (*Pinus spp*) y de sabino (*Juniperus spp*), aunque este último está más representado en las áreas con coberturas menores a 10%, a diferencia de los bosques de pino que tienden a formar coberturas más densas (mayores a 10%), lo cual refleja claramente las diferentes condiciones prevalecientes en la cuenca (Cuadro 6.4). Esta tendencia también se observa con los bosques de oyamel (*Abies spp*), que únicamente se encuentran en coberturas mayores a 30%, debido a que estas especies solo pueden formar comunidades más densas en lugares con abundante humedad (Fernández, 1987).

**Cuadro 6.4. Superficie (ha) de comunidades vegetales por cobertura de copa en la cuenca alta del río Zahuapan, Tlaxcala.**

Comunidad	Cobertura de copa (%)			Superficie total (ha)
	< 10	10 – 30	> 30	
Oyamel	0.00	0	92.32	92.33
Pino	954.05	980.12	2366.14	4300.32
Pino – Encino	75.07	304.47	22.57	402.12
Pino – Sabino	3.03	58.89	0.00	61.92
Encino	383.21	12.19	0.00	395.41
Sabino	1714.79	433.29	0.00	2148.08
Total	3130.18	1788.98	2481.04	7400.21

En cuanto a la diversidad de especies arbóreas de los bosques, la mayor se observó en la microcuenca Atotonilco, que presentó en total 14 especies arbóreas, con predominancia de coníferas en los tres niveles de cobertura. La menor diversidad se observó en la microcuenca El Fondón con solo cinco especies arbóreas, predominantemente de encinos, en tanto que las microcuencas El Peñón y Tlaxco mostraron valores de diversidad relativamente altos con dominancia de coníferas (Cuadro 6.5).

La abundancia de coníferas observada en la cuenca (nueve especies) refleja la importancia biológica y productiva de la misma, ya que casi el 90% de la producción maderable estatal proviene de las especies de pino y oyamel. En este sentido no resulta factible limitar los aprovechamientos forestales en el área, ya que se afectarían las actividades productivas de las que dependen ejidos y pequeñas propiedades de la región. Una mejor alternativa es promover la diversificación de los objetivos de manejo forestal en los predios con aprovechamientos en la región.

Los valores más altos de densidad (número de Individuos por ha), se registraron en la microcuenca Atotonilco particularmente en el rango de cobertura de 10 a 30%; no obstante, en términos de área basal, que es una medida más ilustrativa de la ocupación del arbolado, los valores más altos se observaron en la microcuenca Tlaxco, particularmente, en la cobertura mayor a 30%, que también presentó valores altos en número de Individuos por hectárea. En consecuencia, es factible afirmar que en estas dos microcuencas existen mayores posibilidades de diversificación del manejo forestal para la cuenca alta del río Zahuapan.

**Cuadro 6.5. Composición de especies por cobertura de copa en cuatro microcuencas de la cuenca alta del río Zahuapan, Tlaxcala.**

Microcuenca	Cobertura (%)	Nº de especies	Coníferas	Encinos	Otras especies
<b>Atotonilco</b>	< 10	11	6	3	2
	10-30	8	4	3	1
	> 30	14	9	3	2
<b>El Fondón</b>	< 10	4	1	2	1
	10-30	0	0	0	0
	> 30	5	1	3	1
<b>El Peñón</b>	< 10	7	4	1	2
	10-30	11	7	2	2
	> 30	13	7	3	3
<b>Tlaxco</b>	<10	0	0	0	0
	10-30	12	9	1	2
	>30	10	5	3	2

Los valores más bajos de densidad, tanto en área basal como en número de individuos por hectárea se registraron en la microcuenca El Fondón, independientemente de los niveles de cobertura muestreados. Lo anterior, aunado a la baja diversidad de especies en esta microcuenca, sugieren condiciones más limitantes para el desarrollo del arbolado y por tanto, la necesidad de una mayor atención con acciones de restauración y conservación para diversos fines en El Fondón, especialmente por ser la microcuenca más aledaña a la laguna de Atlangatepec (Cuadros 6.6-6.9).

Es importante notar que en la microcuenca Atotonilco los valores de densidad y área basal son congruentes con los niveles de cobertura, ya que en la cobertura menor de 10% los valores totales de estas variables son bajos, 286 ind/ha y 12.07 m<sup>2</sup>/ha respectivamente. Sin embargo, las coberturas de copa mayores de 10% presentan áreas basales similares, aunque con menor densidad en la cobertura mayor de 30%, lo cual sugiere que la mayor cobertura está dada por la presencia de arbolado de mayores dimensiones, especialmente de oyamel (Cuadro 6.6).

Cuadro 6.6. Valores de densidad y área basal por especie y cobertura de copa en la microcuenca Atotonilco, municipio Tlaxco, Tlaxcala.

Cobertura (%)	Especie	Densidad (individuos / ha)	Área basal (m <sup>2</sup> /ha)
< 10	<i>A. religiosa</i>	14.667	1.167
	<i>J. deppeana</i>	64.667	2.208
	<i>Q. rugosa</i>	74.000	2.433
	<i>Q. laurina</i>	2.000	0.084
	<i>Quercus sp.</i>	21.333	0.845
	<i>A. xalapensis</i>	24.000	0.480
	<i>P. teocote</i>	4.667	0.177
	<i>P. patula</i>	0.667	0.047
	<i>P. rudis</i>	74.667	4.314
	<i>P. montezumae</i>	0.667	0.084
	<i>N. parviflora</i>	4.667	0.231
Subtotal		286.000	12.070
10 a 30	<i>J. deppeana</i>	65.000	1.339
	<i>Q. rugosa</i>	198.333	6.564
	<i>Q. laurina</i>	38.333	0.547
	<i>Quercus sp.</i>	43.333	1.497
	<i>A. xalapensis</i>	63.333	1.854
	<i>P. teocote</i>	70.000	4.756
	<i>P. rudis</i>	133.333	9.254
Subtotal		613.333	25.893
> 30	<i>P. ayacahuite</i>	6.731	0.565
	<i>A. religiosa</i>	193.462	12.790
	<i>J. deppeana</i>	10.000	0.304
	<i>Q. rugosa</i>	60.385	2.734
	<i>Q. laurina</i>	45.385	1.964
	<i>Quercus sp.</i>	39.615	3.172
	<i>Buddleia sp</i>	0.385	0.065
	<i>A. xalapensis</i>	8.269	0.235
	<i>P. teocote</i>	9.038	0.743
	<i>P. pseudostrobus</i>	12.308	0.564
	<i>P. patula</i>	3.654	0.426
	<i>P. rudis</i>	20.385	1.338
	<i>P. montezumae</i>	7.885	0.587
<i>P. oaxacana</i>	1.154	0.015	
Subtotal		418.654	25.503

Como ya se indicó, la microcuenca El Fondón presenta los valores más bajos de densidad de arbolado, incluso para la cobertura de copa mayor a 30%. Los valores de densidad y área basal observados en esta microcuenca indican que son bosques abiertos de sabinos y en las áreas más densas dominan los oyameles aunque en muy bajas densidades (Cuadro 6.7).

**Cuadro 6.7. Valores de densidad y área basal por especie y cobertura de copa en la microcuenca El Fondón, municipio Tlaxco, Tlaxcala.**

Cobertura (%)	Especie	Densidad (individuos / ha)	Área basal (m <sup>2</sup> /ha)
< 10	<i>J. deppeana</i>	123.684	5.305
	<i>Q. rugosa</i>	8.947	0.247
	<i>Quercus sp.</i>	11.053	1.263
	<i>A. xalapensis</i>	3.684	0.157
Subtotal		147.368	6.972
> 30	<i>A. religiosa</i>	112.000	8.101
	<i>Q. rugosa</i>	48.000	2.642
	<i>Q. laurina</i>	32.000	1.319
	<i>Quercus sp.</i>	12.000	0.590
	<i>A. xalapensis</i>	14.000	0.415
Subtotal		218.000	13.066

La presencia de oyametales en esta microcuenca, sugiere la presencia de microclimas favorables que deben ser atendidas especialmente para recuperar la función de captación de agua en esta microcuenca, lo cual es favorecido por los bosques de oyamel.

El caso de la microcuenca El Peñón es menos claro en términos de los valores observados de densidad y área basal ya que en la cobertura menor de 10% es donde presenta mayores valores de las dos variables analizadas, superando por casi el doble el valor observado en la cobertura de 10-30%, y en menor medida a los valores observados en la cobertura mayor de 30% (Cuadro 6.8). Esta información sugiere que el arbolado en la cobertura menor a 10% es en general de pequeñas dimensiones y más bien abundante, a diferencia de lo observado en la cobertura mayor a 30%.

Cuadro 6.8. Valores de densidad y área basal por especie y cobertura de copa en la microcuenca El Peñón, municipio Tlaxco, Tlaxcala.

Cobertura (%)	Especie	Densidad (individuos / ha)	Área basal (m <sup>2</sup> /ha)
< 10	<i>P. ayacahuite</i>	1.429	0.101
	<i>A. religiosa</i>	211.429	18.947
	<i>Quercus sp.</i>	117.143	3.503
	<i>A. xalapensis</i>	64.286	0.832
	<i>P. pseudostrobus</i>	31.429	2.318
	<i>Aile sp</i>	65.714	1.055
	<i>P. patula</i>	7.143	0.379
Subtotal		498.571	27.135
10 a 30%	<i>A. religiosa</i>	2.500	0.454
	<i>J. deppeana</i>	66.500	1.181
	<i>Q. laurina</i>	1.500	0.206
	<i>Quercus sp.</i>	30.500	2.033
	<i>A. xalapensis</i>	8.000	0.185
	<i>P. teocote</i>	2.500	0.104
	<i>P. pseudostrobus</i>	26.000	1.575
	<i>Aile sp</i>	43.000	1.090
	<i>P. patula</i>	1.000	0.098
	<i>P. rudis</i>	64.500	4.064
<i>P. montezumae</i>	104.500	4.009	
Subtotal		350.500	14.998
> 30%	<i>A. religiosa</i>	20.667	1.559
	<i>J. deppeana</i>	2.000	0.069
	<i>Q. rugosa</i>	56.000	2.492
	<i>Q. laurina</i>	28.667	1.076
	<i>Quercus sp.</i>	53.333	4.216
	<i>Buddleia</i>	2.000	0.044
	<i>A. xalapensis</i>	8.667	0.189
	<i>P. teocote</i>	13.333	1.566
	<i>P. pseudostrobus</i>	3.333	0.213
	<i>Aile</i>	32.000	1.507
	<i>P. patula</i>	35.333	3.726
<i>P. montezumae</i>	36.667	7.565	
<i>P. serótina</i>	0.667	0.009	
Subtotal		292.667	24.232

Es relevante el hecho que en esta microcuenca, aun en la cobertura menor de 10% predomina el oyamel, que es una especie con requerimientos altos de humedad y sombra (Fernández, 1987), lo cual sugiere que aun con baja cobertura de copa las condiciones de la microcuenca son muy favorables para el desarrollo de bosques más densos y productivos. Esta afirmación se refuerza claramente en la cobertura mayor de 30%, donde con un bajo número de individuos/ha se tiene un área basal relativamente alto.

La microcuenca Tlaxco no presenta áreas con baja cobertura y los valores observados de densidad y área basal son relativamente altos. También es destacar que en esta microcuenca, en las dos clases de cobertura, predominan especies como *Pinus montezumae*, *P. teocote*, *Abies religiosa* y *P. patula*, que son las especies más aprovechadas comercialmente en el estado (Cuadro 6.9).

La gran productividad forestal de esta microcuenca es claramente notable en la cobertura mayor de 30% ya que aun con una alta densidad de arbolado se tiene un área basal total muy alta, la mayor observada en toda la cuenca, es decir cuenta con arbolado abundante y de dimensiones considerables. Adicionalmente, esta productividad se concentra en dos especies de gran valor comercial: *A. religiosa* y *P. patula*. Ern (1973) destaca la gran importancia ambiental y socioeconómica de los bosques constituidos por estas especies, en particular por el papel que desempeñan en el balance hídrico y por la posibilidad que tienen de generar otros servicios ambientales.

### **Estructura diamétrica**

Las estructuras diamétricas en todas las microcuencas mostraron en general una adecuada relación entre la densidad del arbolado adulto y la densidad del repoblado, dado que en la mayoría de los casos se observó mayor abundancia de diámetros pequeños de las especies arbóreas registradas. Cabe mencionar que en las coberturas mayores a 30% se observó más predominancia de diámetros intermedios, lo cual sugiere que en estas áreas puede haber limitaciones para la regeneración natural especialmente para las coníferas, debido a la ocupación de los estratos medios y superior del bosque. Lo anterior se observó en las microcuencas de Atotonilco, El Fondón y El Peñón.

La microcuenca Tlaxco mostró una mejor tendencia de repoblamiento dado que la estructura diamétrica es más cercana a incoetánea, es decir con mas abundancia de diámetros pequeños de las mayoría de las especies, particularmente de coníferas como *Pinus montezumae* y *Abies religiosa*.

Las estructuras diamétricas con tendencia incoetánea como las observadas en este estudio permite inferir que, en general, los bosque presentes en la cuenca están en estados de desarrollo intermedio, es decir en plena etapa de crecimiento. Lo anterior es consistente con la escasez de

arbolado de grandes dimensiones en la cuenca, ya que solo las microcuencas El Peñón y Tlaxco registraron arboles de clase diamétrica de 90 cm, aunque en densidades muy bajas. Este tipo de estructuras son congruentes con bosques que han estado sujetos a manejo regular por un largo periodo. No obstante, es importante monitorear el desarrollo de los mismos en función del tipo de tratamiento silvícola aplicado a fin de determinar con certeza si las respuestas de los mismos son adecuadas (Anexo I).

**Cuadro 6.9. Valores de densidad y área basal por especie y cobertura de copa en la microcuenca Tlaxco, municipio Tlaxco, Tlaxcala.**

Cobertura (%)	Especie	Densidad (individuos / ha)	Área basal (m <sup>2</sup> /ha)
10 a 30	<i>A. religiosa</i>	0.455	0.082
	<i>J. deppeana</i>	5.000	0.279
	<i>Quercus sp.</i>	2.273	0.159
	<i>A. xalapensis</i>	6.364	0.132
	<i>P. teocote</i>	51.818	3.970
	<i>P. pseudostrobus</i>	30.455	0.584
	<i>Aile sp</i>	10.909	0.651
	<i>P. patula</i>	1.364	0.253
	<i>P. rudis</i>	41.818	1.933
	<i>P. montezumae</i>	276.364	10.881
	<i>Cupressus sp.</i>	4.545	0.045
	<i>P. oaxacana</i>	10.000	0.145
	Subtotal		441.364
> 30	<i>P. ayacahuite</i>	46.471	2.783
	<i>A. religiosa</i>	251.471	17.527
	<i>Q. rugosa</i>	1.471	0.058
	<i>Q. laurina</i>	53.235	1.837
	<i>Quercus sp.</i>	83.529	3.489
	<i>A. xalapensis</i>	16.471	0.311
	<i>P. teocote</i>	1.471	0.097
	<i>P. pseudostrobus</i>	10.294	0.724
	<i>Aile sp</i>	10.000	0.610
	<i>P. patula</i>	64.118	8.576
Subtotal		538.529	36.013

## Estructura de alturas

En relación a la distribución de altura se observó mayor variabilidad, aunque con una tendencia en la predominancia del arbolado de alturas intermedias (10-15 m), lo cual es acorde a la estructura observada en los diámetros en el sentido de que la mayoría del arbolado es joven y en desarrollo. Cabe hacer notar que, en general, solo en las coberturas mayores a 30%, independientemente de la microcuenca, se observaron alturas predominantes mayores a 25 m, lo cual también es congruente con los niveles de cobertura y densidad observados en estas áreas (Anexo II).

Otro aspecto a destacar en relación a la altura, es que solo en las microcuencas El Peñón (cobertura mayor a 30%) y la microcuenca de Tlaxco, se registraron alturas mayores a 30 m del arbolado, en el caso de esta última se registraron árboles en la clase de 40 m, indicando la prevalencia de condiciones adecuadas de crecimiento en términos de humedad y muy probablemente del suelo que permite el desarrollo de arbolado de mayores dimensiones.

Como se indicó anteriormente, en la microcuenca Tlaxco se registraron también las mayores densidades, lo cual aunado a estas distribuciones de altura confirman la alta productividad maderable a esta parte de la cuenca, especialmente en los bosques de *Pinus patula* y *A. religiosa*.

## Regeneración Natural

En la microcuenca Atotonilco, independientemente de los niveles de cobertura, los valores de regeneración más altos son para las especies de *Quercus* seguidos por algunas coníferas como *Juniperus* y *Pinus*. En esta microcuenca junto con la de Tlaxco y El Peñón, se observó la mayor diversidad de especies en la regeneración, en contraste con la microcuenca El Fondón donde se observó la menor cantidad de especies regeneradas (Anexo III). Lo anterior sugiere que en Atotonilco las condiciones prevalecientes favorecen el establecimiento de especies pioneras que soportan ambientes más limitados.

En contraste, la regeneración de *Abies religiosa* en Atotonilco es muy baja, al contrario de lo observado en El Fondón, en donde muestra valores de densidad de renuevos altos, particularmente en la cobertura mayor de 30%, situación que se repite en la microcuenca de Tlaxco. Esta tendencia del oyamel es congruente con su naturaleza tolerante, que le permite regenerarse en condiciones de alta humedad y sombra, que muy probablemente ocurre en las áreas de mayor cobertura de la cuenca.

Finalmente, en términos de densidad de renuevos (individuos por hectárea) de todas las especies observadas, se puede afirmar que las cuatro microcuencas muestran valores aceptables y totalmente concordantes con las estructuras diamétricas y de alturas observadas. La regeneración adecuada de coníferas en las microcuencas Tlaxco y El Peñón refuerza la idea del alto potencial de producción madera y de otros servicios ambientales de este parte de la cuenca.

Los resultados anteriores, permiten afirmar que en general los bosques de la cuenca actualmente no presentan problemas de regeneración, con excepción de la microcuenca Atotonilco donde se observan valores relativamente bajos de regeneración para todas las especies, particularmente en la cobertura menor a 10%.

No obstante, es conveniente determinar si las especies que se regeneran son las adecuadas para cada condición ecológica, de acuerdo con los objetivos planteados en los programas de manejo aplicados en la cuenca. En este sentido existen evidencias de que los programas de manejo no siempre logran los objetivos de regeneración, en términos de densidades y especies esperadas, situación que obedece a diversos factores ecológicos a escala local en los predios bajo manejo de la región (Carrillo y Acosta, 2008).

## **CONCLUSIONES**

La diversidad y densidad de especies arbóreas registradas en la cuenca alta del río Zahuapan son considerablemente altas, tanto en el estrato arbóreo como en el de renuevos. Considerando que estos bosques han sido intervenidos por periodos largos de tiempo (más de dos décadas), su composición, estructura y existencias reales reflejan parámetros adecuados de desarrollo.

De las cuatro microcuencas analizadas, El Fondón mostró consistentemente, los valores más bajos de diversidad y densidad en los estratos arbóreos y de regeneración natural, reflejando condiciones no muy favorables para el desarrollo del arbolado. En contraste, los valores observados en la microcuenca de Tlaxco sugieren mejores condiciones para los bosques, cuyas especies además tienen un papel relevante en el balance hídrico de la cuenca.

La tendencia incoetánea observada en las distribuciones diamétricas indica que los bosques de la cuenca alta del río Zahuapan están en una fase de desarrollo intermedio, es decir, en pleno crecimiento, con suficiencia de individuos en categorías pequeñas, lo cual también es concordante con la estructura de alturas observadas.

Dado que en la cuenca predominan los bosques de pinos y pino-encino, es factible esperar que los programas de manejo de estos bosques continúen con las inercias actuales. Sin embargo, con base en los parámetros estructurales observados, se pueden adicionar objetivos al manejo para hacerlos compatibles con programas de conservación, restauración, de servicios ambientales, entre otros, con el objeto de potenciar su función en el balance hidrológico de la cuenca.

## LITERATURA CITADA

- Acosta P., R. 1991. La vegetación del estado de Tlaxcala. Folleto Divulgativo No. 6. Jardín Botánico de Tizatlán-Gobierno del Estado de Tlaxcala. Tlaxcala, Tlax. 54 p.
- Aguirre C., O. A. 2002. Índices para la Caracterización de la Estructura del Estrato Arbóreo de Ecosistemas Forestales. *Rev. Ciencia Forestal en México*. 27(92): 5-28.
- Alvarado C., M., J. A. Colmenares R. y M. de la L. Valderrábano A. 2007. La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo Sum*. 14(003):317-326. Versión electrónica en: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/IndArtRev.jsp?iCveNumRev=7185&iCveEntRev=104&institucion=> > (18 de julio de 2010).
- Buendía R., E., F. Islas G. y V. Guerra de la C. 2008. Identificación de áreas erosionadas por medio de imágenes LANDSAT ETM+, en Tlaxco y Terrenate, Tlaxcala. *Terra Latinoamericana* 26: 1-9.
- Carrillo A., F. y M. Acosta M. 2008. Regeneración natural en bosques bajo manejo forestal. *In: V. Guerra de la C., y C. Mallen R. (Comp.). Tlaxcala sus recursos forestales: conservación, aprovechamiento y bases para su manejo sustentable. Libro Técnico núm. 4. INIFAP-CENID COMEF, México, D.F. pp. 46-63.*
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2003. Estudio básico de vegetación y uso de suelo del estado de Tlaxcala. Gerencia Regional XIII-CONAFOR-Gobierno del Estado de Tlaxcala. Tlaxcala, Tlax. Versión electrónica.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2004. Programa Estratégico Forestal del Estado de Tlaxcala 2025. Tlaxcala, Tlax. 76 p.
- Coordinación General de Ecología (CGE). 2002. Programa de Ordenamiento Ecológico General del Estado de Tlaxcala. Gobierno del Estado de Tlaxcala. Tlaxcala, Tlax. 28 p.
- Coordinación General de Ecología (CGE). 2004. Determinación de superficie boscosa del estado de Tlaxcala. Gobierno del Estado de Tlaxcala-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Tlaxcala, Tlax. 31 p.
- Ern, H. 1973. Repartición, ecología e importancia económica de los bosques de coníferas en los estados mexicanos de Puebla y Tlaxcala. *Comunicaciones*. 1er. Simposio Proyecto Puebla-Tlaxcala. Fundación Alemana para la Investigación Científica. Puebla. pp. 21-23.

- Fernández P., E. 1987. Estudio ecológico del bosque de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham., en el parque nacional La Malintzin en el estado de Tlaxcala. Tesis Profesional. UNAM. México, D.F.
- Gobierno de Tlaxcala. 2002. Ordenamiento Ecológico del Estado de Tlaxcala. 2002. Estudio realizado en coordinación con La coordinación general de ecología de Tlaxcala y el Instituto Nacional de Ecología. 340 p.
- Guerra de la C., V., F. Carrillo A., M. Acosta M., F. Islas G., E. Flores A., C. Mallen R. y E. Buendía, R. 2007. El manejo forestal en el estado de Tlaxcala: Una revisión del desarrollo de la silvicultura. Folleto Técnico No. 25. INIFAP-CIRCE. México 67 p.
- Guerra de la C., V., F. Carrillo A. y M. Acosta M. 2008. El aprovechamiento de los recursos forestales maderables. En: Guerra de la C., V. y C. Mallen R., (Comp.). Tlaxcala sus recursos forestales: conservación, aprovechamiento y bases para su manejo sustentable. Libro Técnico núm. 4. INIFAP-CENID COMEF, México, D.F. pp. 30-43.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. Sistema nacional de fotografía aérea (SINFA). Aguascalientes, México. 23 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005. Guías para la interpretación de cartografía. Topografía. Aguascalientes, México. 21 p.
- Klink, H. 1973. La división de la vegetación natural en la región Puebla-Tlaxcala. Mapa preliminar a escala 1:500,000. Comunicaciones. 1er. Simposio Proyecto Puebla-Tlaxcala. Fundación Alemana para la Investigación Científica. Puebla. pp. 25-31.
- Lauer, W. 1973. Problemas climato-ecológicos de la vegetación en la región montañosa oriental mexicana. Comunicaciones. 1er. Simposio Proyecto Puebla-Tlaxcala. Fundación Alemana para la Investigación Científica. Puebla. pp. 37-46.
- Magaña T., O.S., F. Carrillo A. y J. C López D. 2008. Protección, conservación y restauración de las áreas forestales en Tlaxcala. En: Guerra de la C., V. y C. Mallen R. (Comp.). Tlaxcala sus recursos forestales: conservación, aprovechamiento y bases para su manejo sustentable. Libro Técnico núm. 4. INIFAP-CENID COMEF, México, D.F. pp. 182-202.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Editorial Limusa. México. 432 p.
- Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). 1975. Inventario forestal del Estado de Tlaxcala. Subsecretaría Forestal y de la Fauna. México, D.F. México. 62 p.

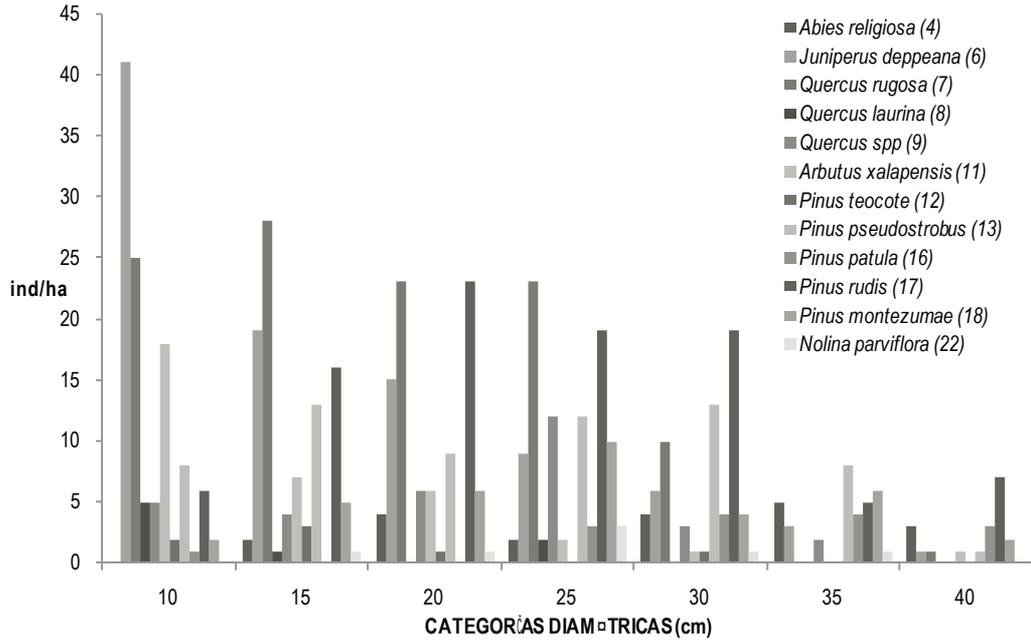
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1994. Inventario Forestal Periódico del Estado de Tlaxcala. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. México, D.F. México. 81 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2000. Anuario estadístico de la producción forestal 2000. Dirección General Forestal-Dirección de Desarrollo Forestal. México. 154 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2009. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. México Edición 2008. 358 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Colegio de Postgraduados (SEMARNAT-COLPOS). 2003. Evaluación de la Degradación de los Suelos Causada por el Hombre en la República Mexicana, a escala 1:250 000. Memoria Nacional 2001-2002. México. D.F. México.
- SPPS. 1999. SPPS Base 10.0 Applications Guide. USA. 426 p.
- Werner, G. 1986. Los suelos en el Estado de Tlaxcala. Altiplano Central de Mexicano. Universidad Autónoma de Tlaxcala-Centro de Estudios Municipales del Estado de Tlaxcala. Tlaxcala, Tlax. 132 p.

## **CARTOGRAFÍA CONSULTADA**

- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2005. Cuencas Hidrológicas. Mapa Escala 1: 250,000. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1990. Información vectorial del estado de Tlaxcala: vías de comunicación terrestre, localidades, límite estatal de Tlaxcala, límite municipal, curvas de nivel, principales ciudades, hidrología lineal y uso actual del suelo. Mapas escala 1:250 000. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1995. Ortofotos digitales de la carta topográfica 1:50,000, E14B23 (compuesta por E14b23\_a, E14b23\_b, E14b23\_c, E14b23\_d, E14b23\_e y E14b23\_f). Versión digital. México.

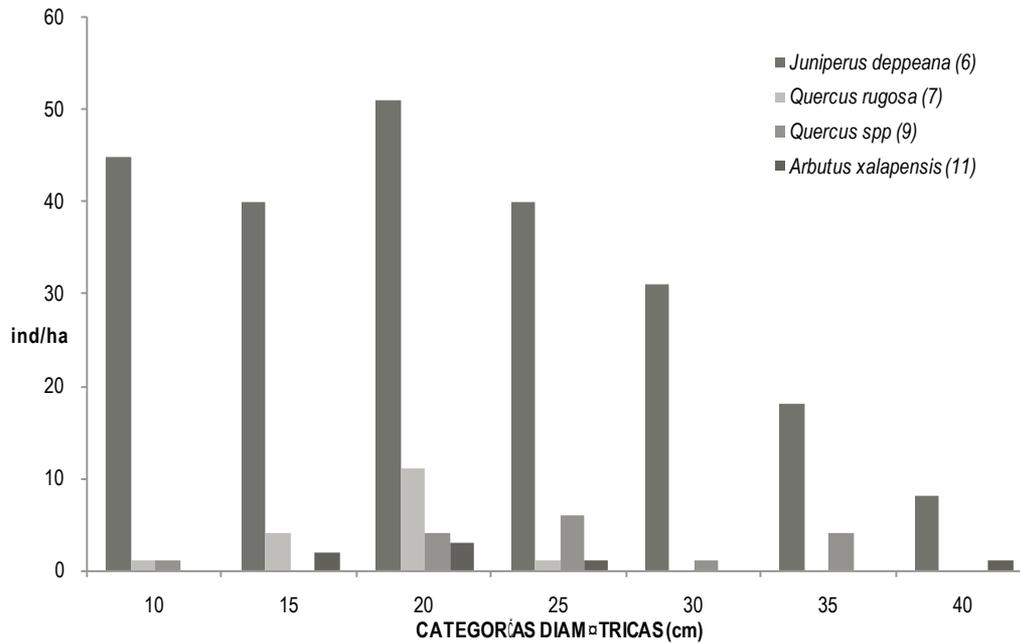
## ANEXO I

### Distribución diamétrica



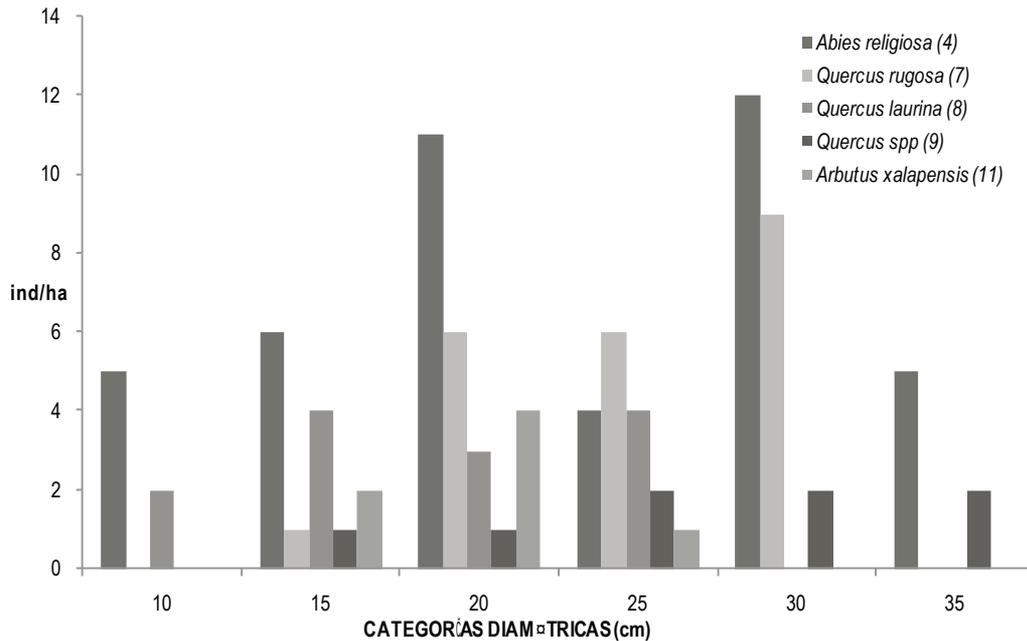
Categorías diamétricas de 45 a 70 cm comprenden sólo las especies de Abies, Juniperus, Quercus y Pinus spp.

**Distribución diamétrica por especies arbóreas en la microcuenca Atotonilco, cobertura menor a 10%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**



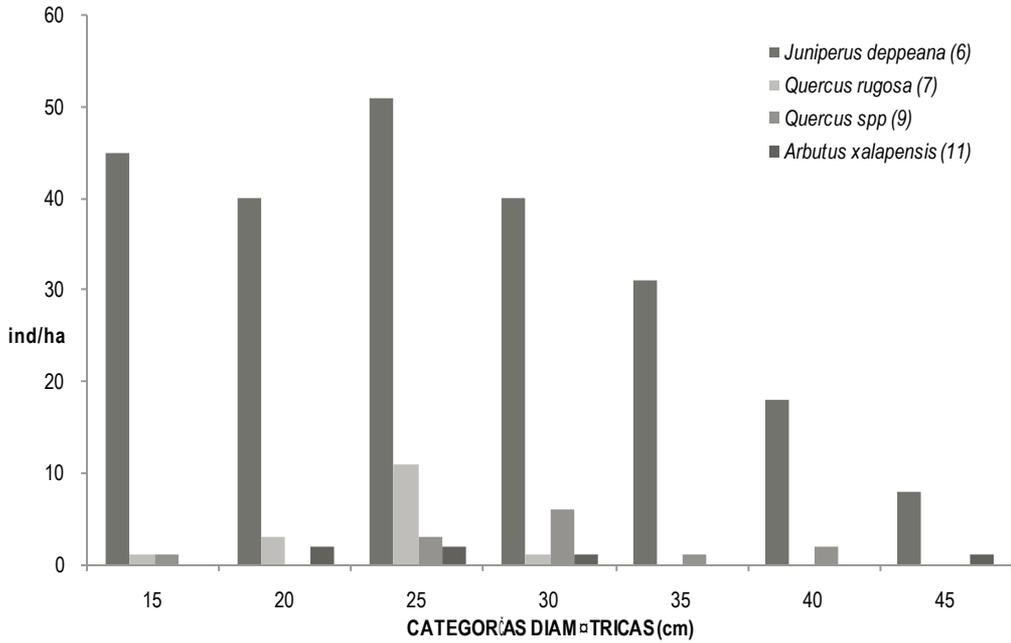
Categorías diamétricas de 45 a 70 cm de diámetro sólo se encontraron especies de *Juniperus* y *Quercus* spp.

**Distribución diamétrica por especies arbóreas en la microcuenca Atotonilco, cobertura de 10 a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**



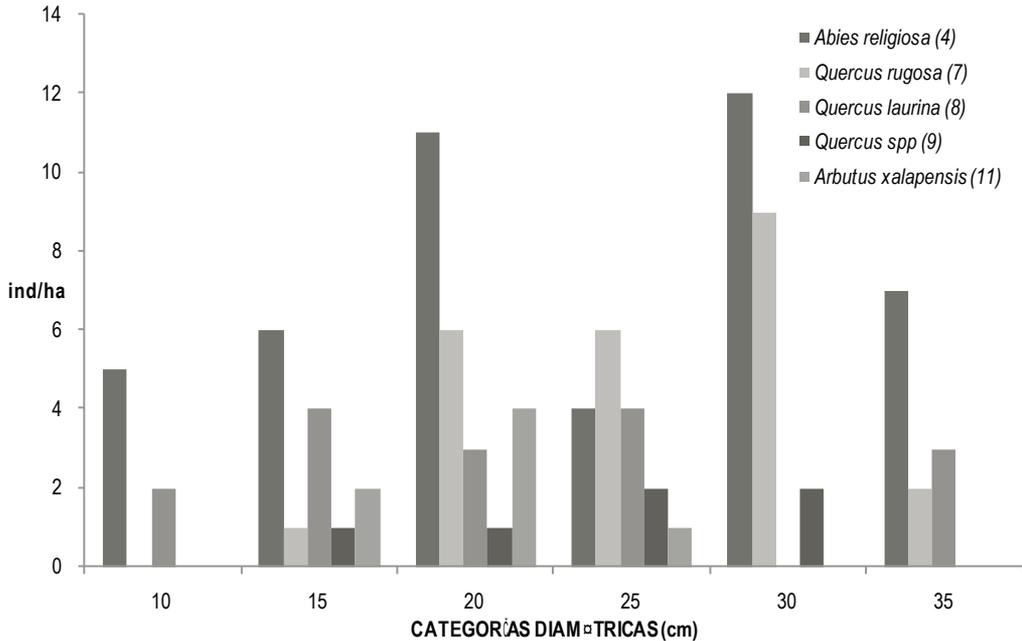
Categorías diamétricas de 40 a 55 cm de diámetro sólo se encontraron especies de *Abies* spp.

**Distribución diamétrica por especies arbóreas en la microcuenca Atotonilco, cobertura mayor a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**

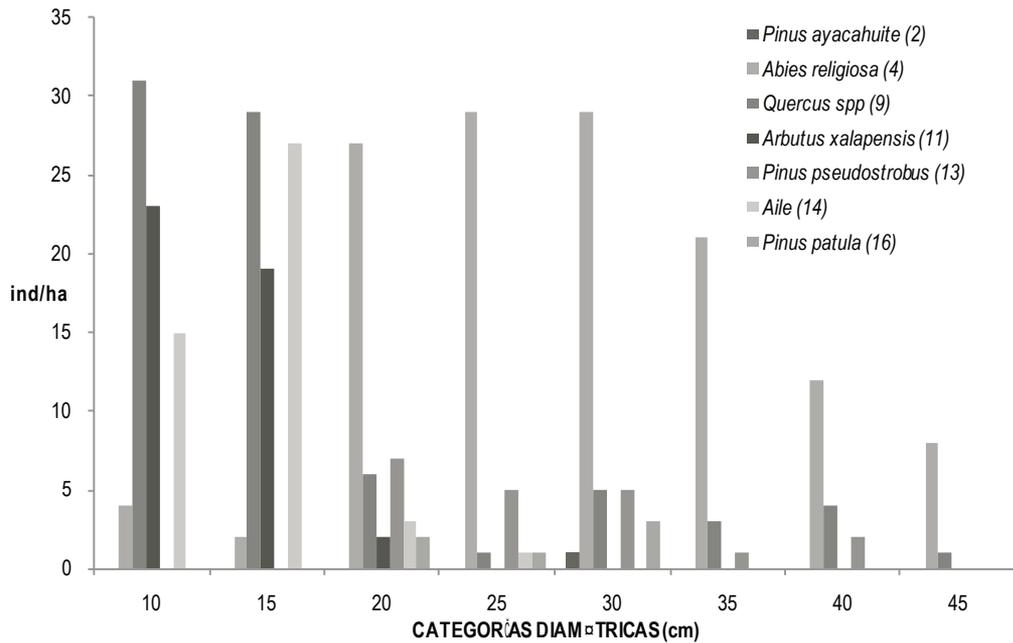


Categorías diamétricas de 50 a 85 cm de diámetro sólo se encontraron especies de *Juniperus* y *Quercus spp*.

**Distribución diamétrica por especies arbóreas en la microcuenca El Fondón, cobertura mayor a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**

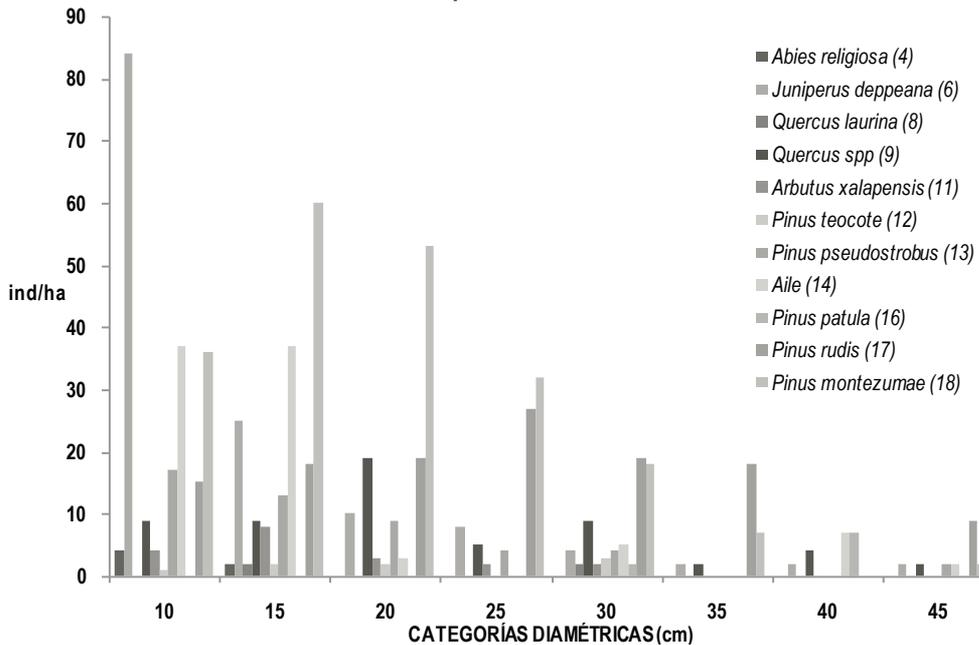


Categorías diamétricas de 40 a 55 cm de diámetro sólo se encontraron especies de *Abies spp*.



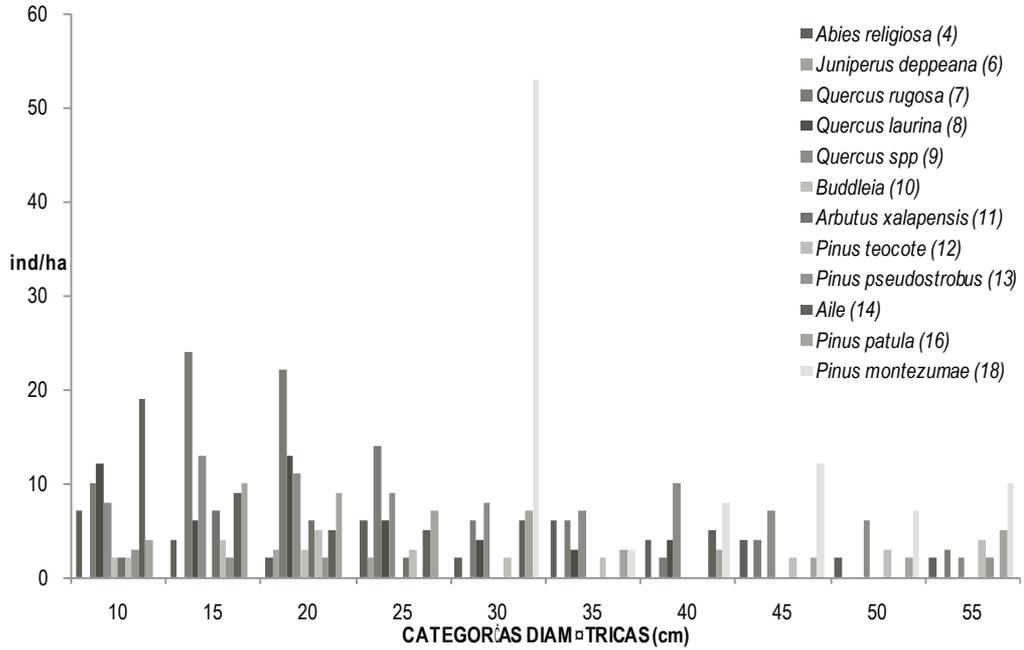
Categorías diamétricas de 50 a 85 cm de diámetro sólo se encontraron especies de *Abies* y *Pinus spp.*

**Distribución diamétrica por especies arbóreas en la microcuenca El Peñón, cobertura menor a 10%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**



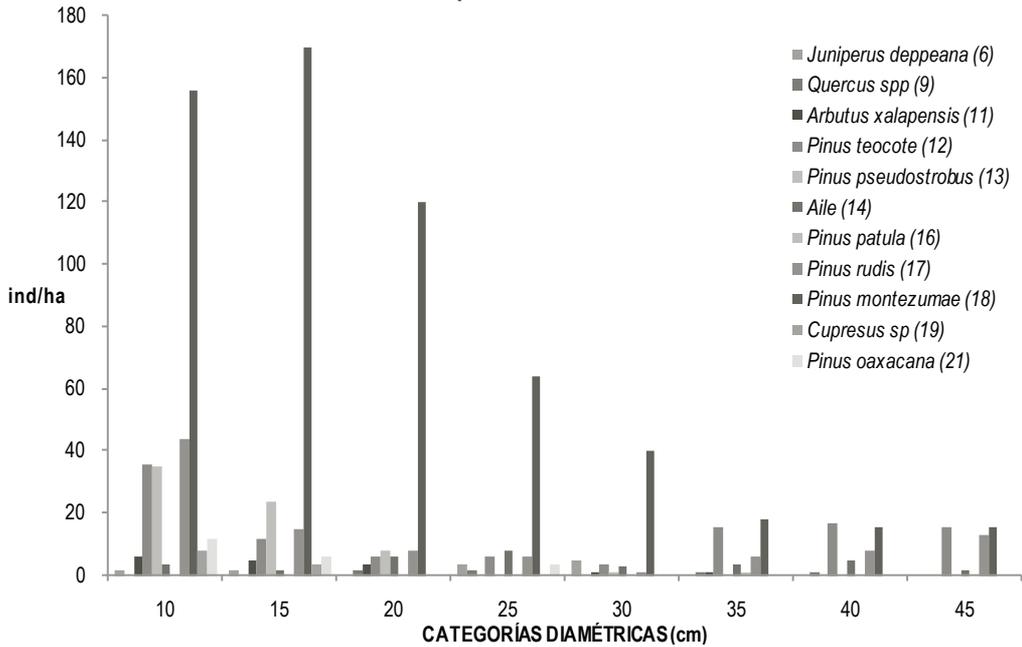
Categorías diamétricas de 50 a 90 cm de diámetro sólo se encontraron especies de *Pinus* y *Quercus spp.*

**Distribución diamétrica por especies arbóreas en la microcuenca El Peñón, cobertura de 10 a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**



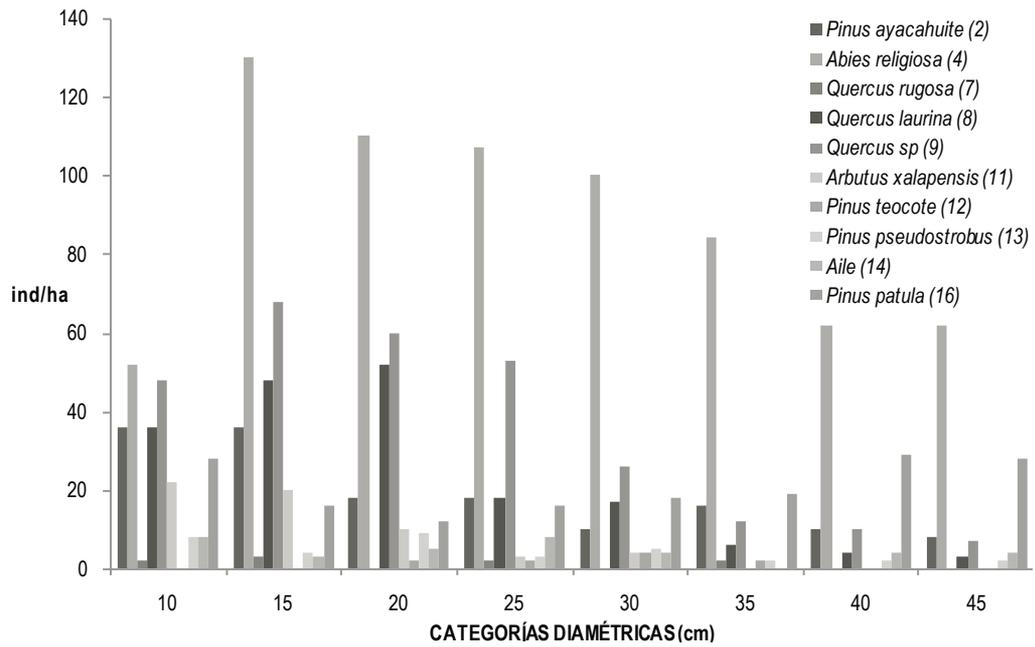
Categorías diamétricas de 60 a 95 cm de diámetro sólo se encontraron especies de *Pinus* y *Quercus spp*.

**Distribución diamétrica por especies arbóreas en la microcuenca El Peñón, cobertura mayor a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**



Categorías diamétricas de 45 a 95 cm de diámetro sólo se encontraron especies de *Aile*, *Pinus spp* y *Abies religiosa*.

**Distribución diamétrica por especies arbóreas en la microcuenca Tlaxco, cobertura de 10 a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**

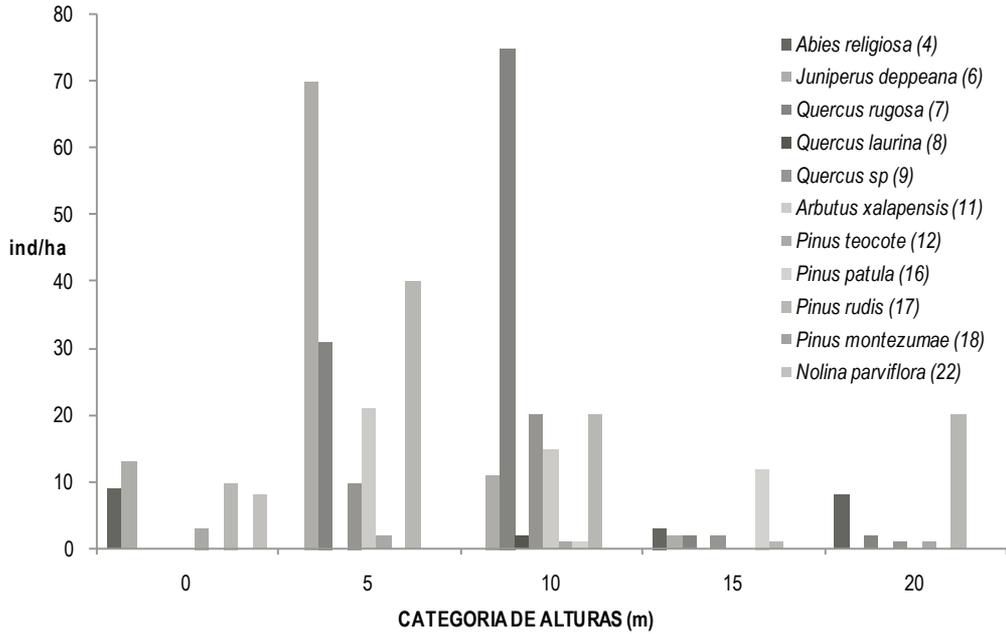


Categorías diamétricas de 50 a 80 cm de diámetro sólo se encontraron especies de Abies, Pinus y Quercus spp.

**Distribución diamétrica por especies arbóreas en la microcuena Tlaxco, cobertura mayor a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**

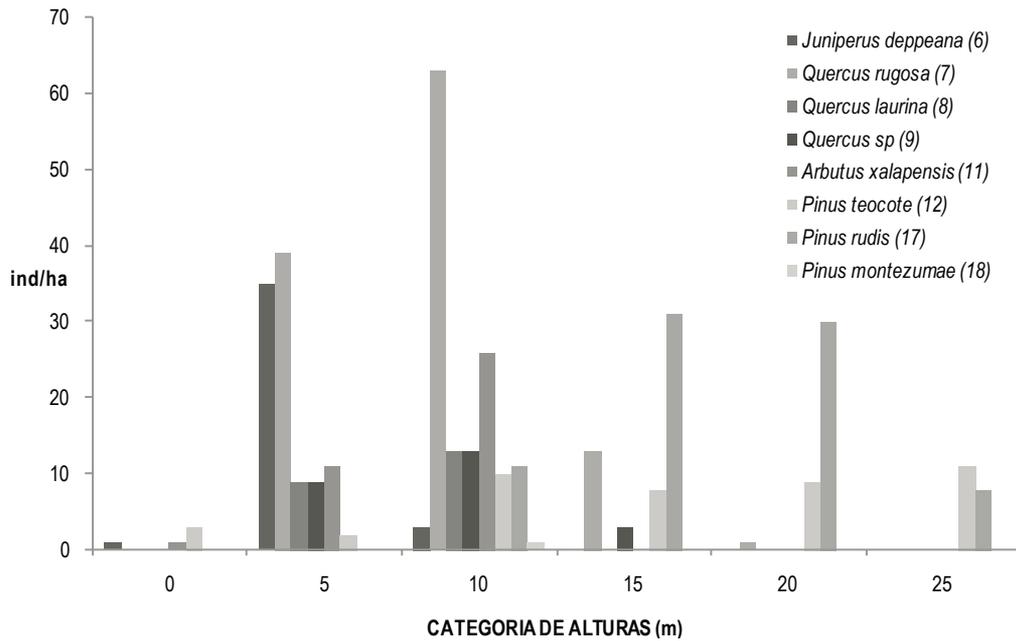
## ANEXO II

### Distribución de alturas

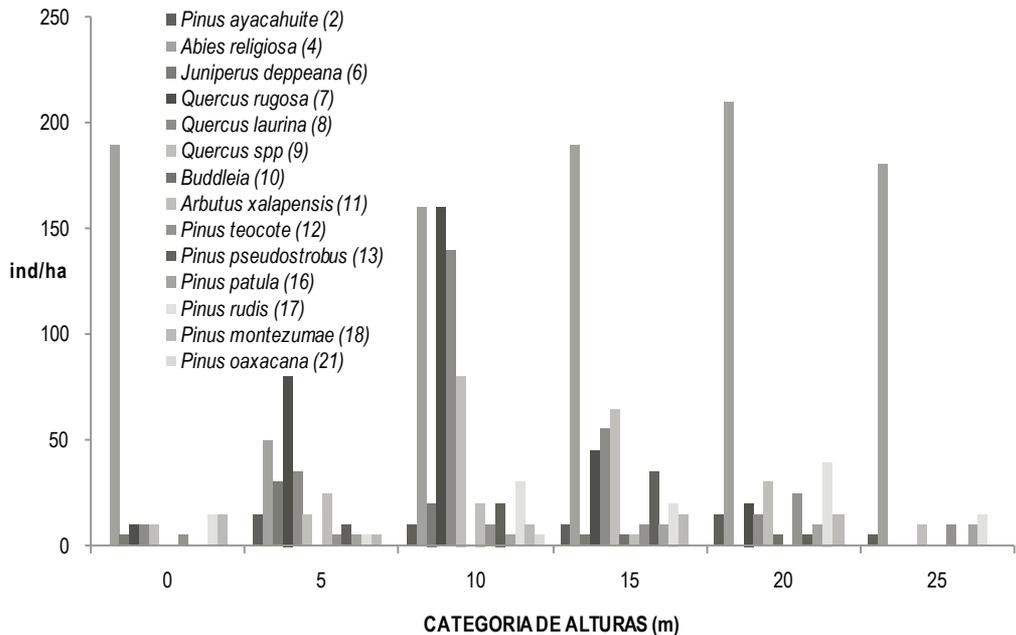


Categorías con alturas de 25 a 35 m sólo se encontraron especies de *Pinus* y *Abies* spp.

**Distribución de alturas por especies arbóreas en la microcuenca Atotonilco, cobertura menor a 10%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**

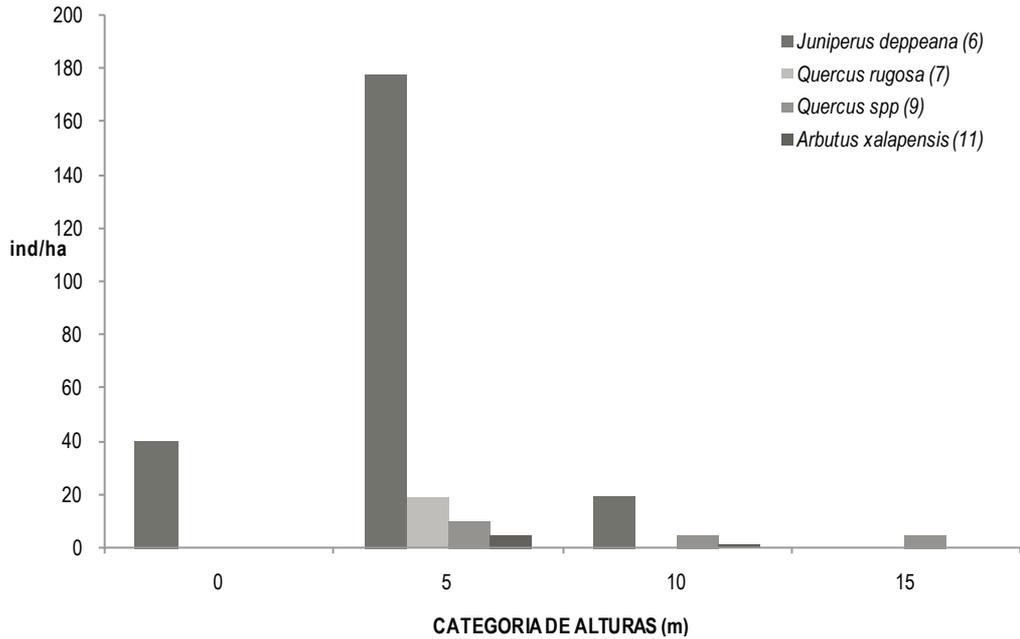


**Distribución de alturas por especies arbóreas en la microcuenca Atotonilco, cobertura de 10 a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**

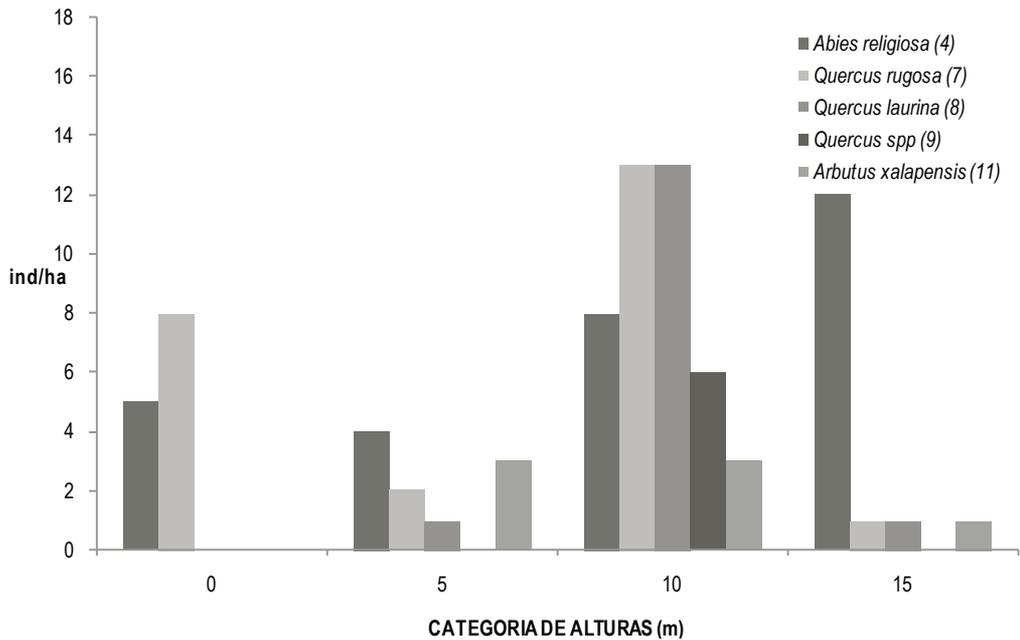


Categorías con alturas de 30 m sólo se encontraron especies de Pinus y Abies spp.

**Distribución de alturas por especies arbóreas en la microcuenca Atotonilco, cobertura mayor a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**

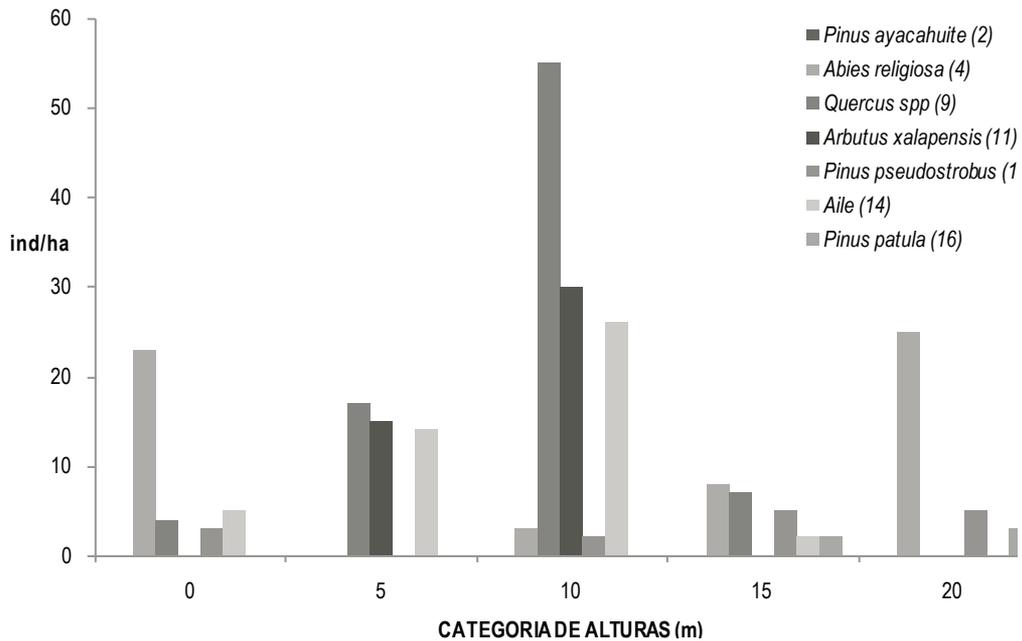


Distribución de alturas por especies arbóreas en la microcuenca El Fondón, cobertura menor a 10%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.



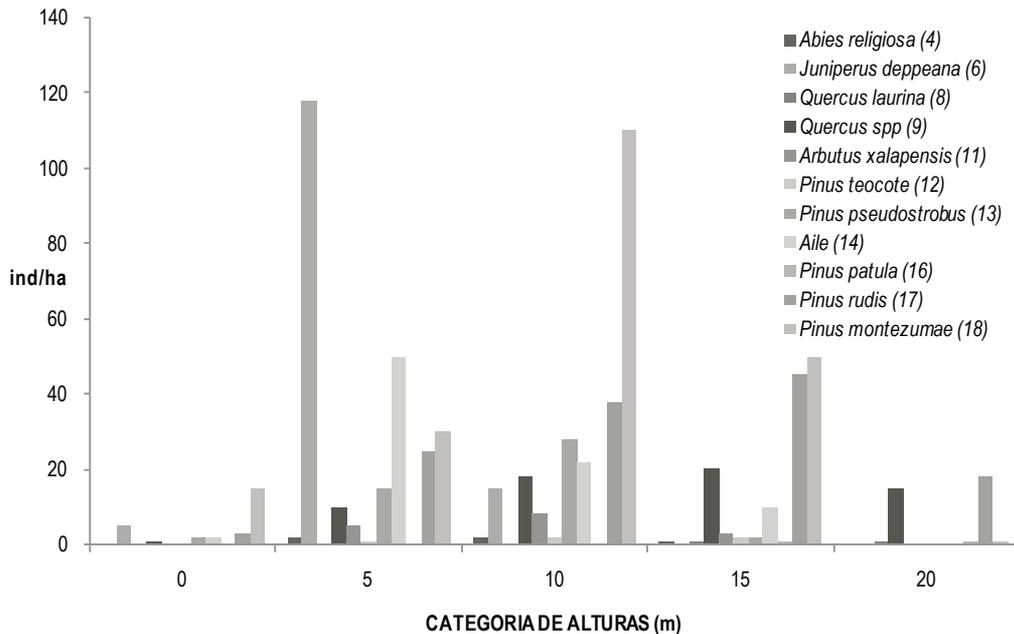
Categorías con alturas de 20 a 30 m sólo se encontraron especies de *Quercus* y *Abies* spp.

Distribución de alturas por especies arbóreas en la microcuenca El Fondón, cobertura mayor a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.



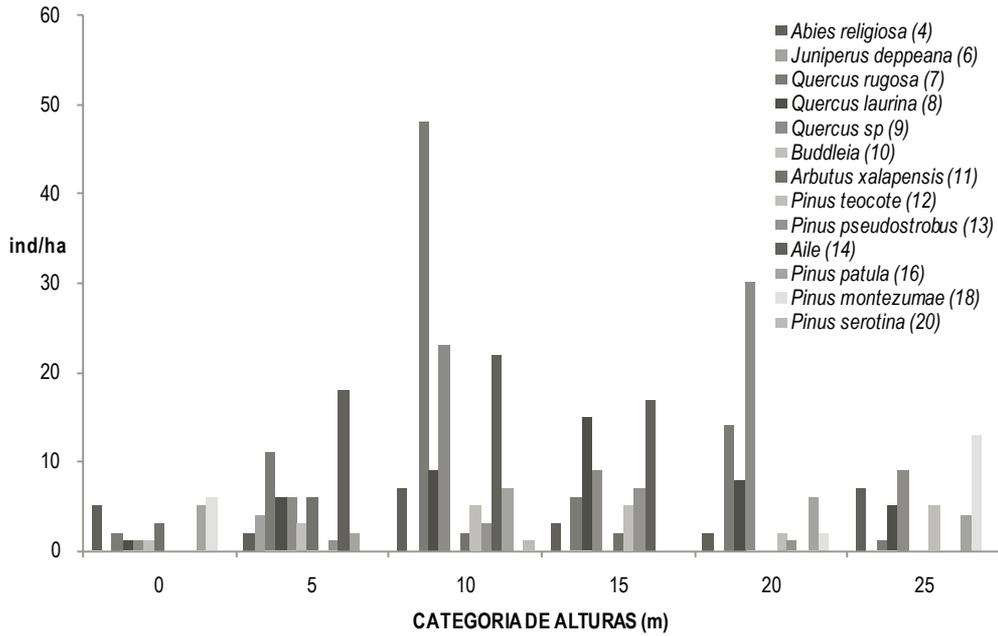
Categorías con alturas de 25 a 30 m sólo se encontraron especies de *Pinus* y *Abies spp.*

**Distribución de alturas por especies arbóreas en la microcuenca El Peñón, cobertura de 10 a 30 %, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**



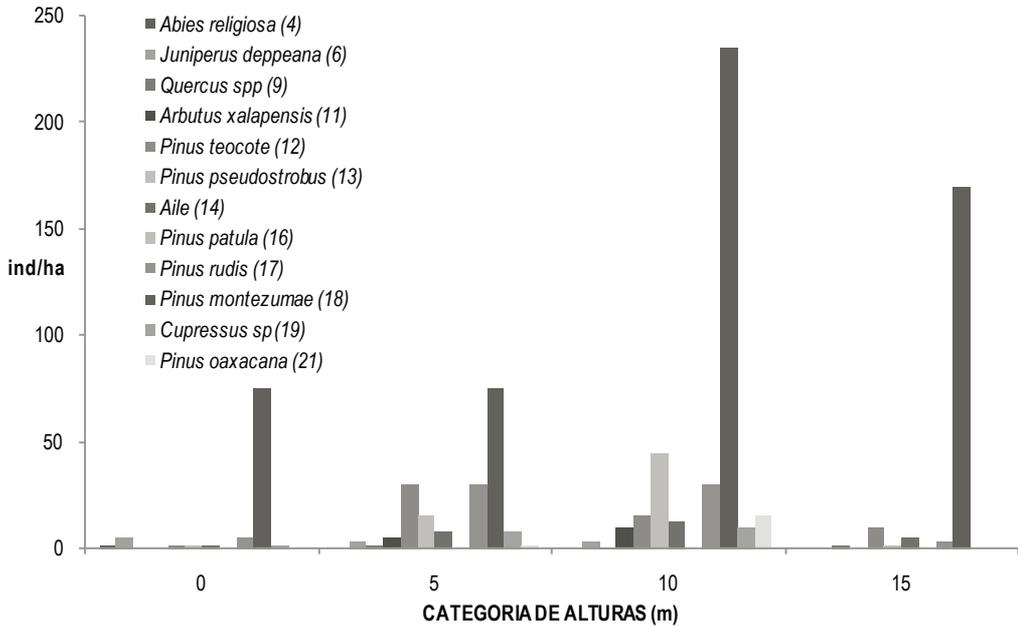
Categorías con alturas de 25 a 30 m sólo se encontraron especies de *Pinus*, *Juniperus* y *Quercus spp.*

**Distribución de alturas por especies arbóreas en la microcuenca El Peñón, cobertura de 10 a 30 %, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**



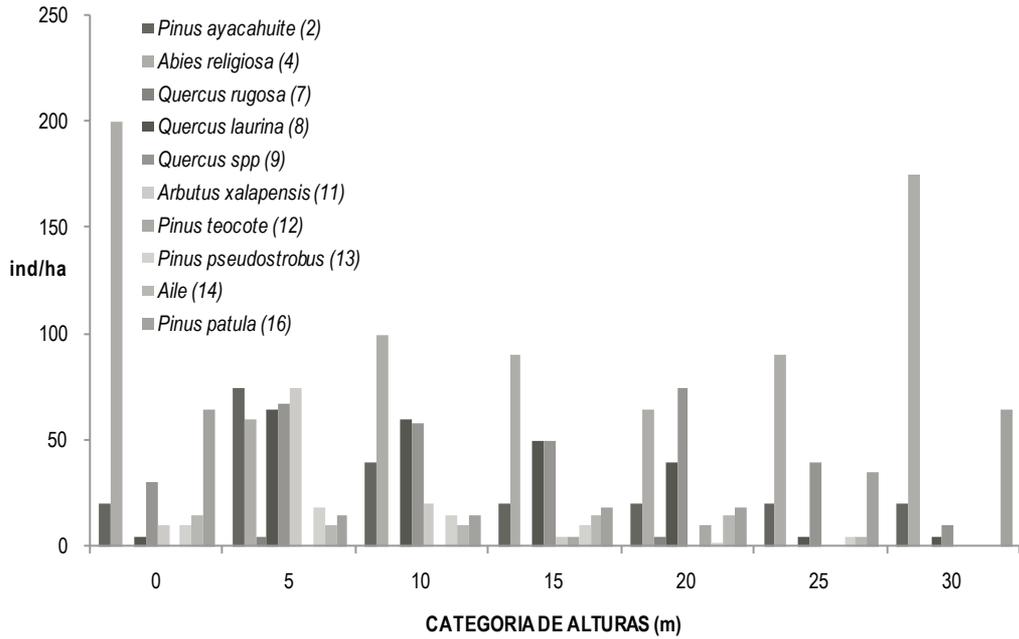
Categorías con alturas de 30 a 35 m sólo se encontraron especies de Abies y Pinus spp.

**Distribución de alturas por especies arbóreas en la microcuenca El Peñon, cobertura mayor a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**



Categorías con alturas de 20 a 35 m sólo se encontraron especies de Pinus spp.

**Distribución de alturas por especies arbóreas en la microcuenca Tlaxco, cobertura de 10 a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**

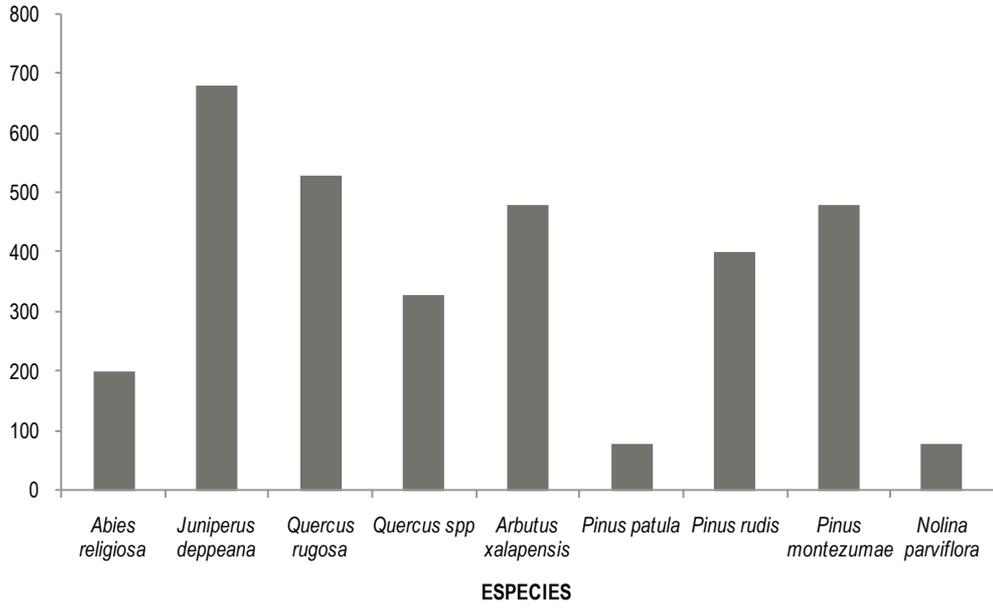


Categorías con alturas de 35 a 40 m sólo se encontraron especies de Pinus y Abies spp.

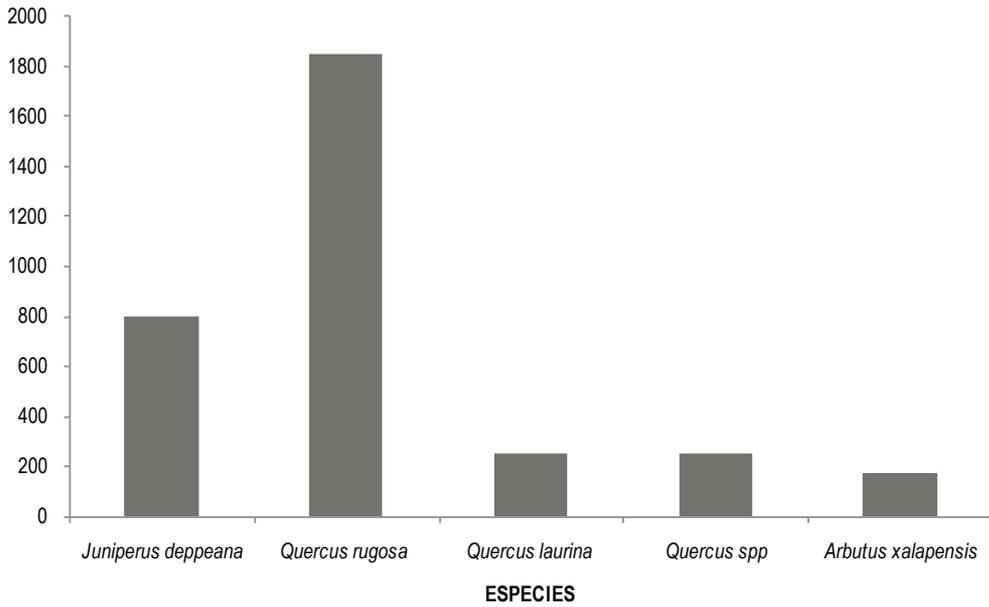
**Distribución de alturas por especies arbóreas en la microcuenca Tlaxco, cobertura mayor a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**

### ANEXO III

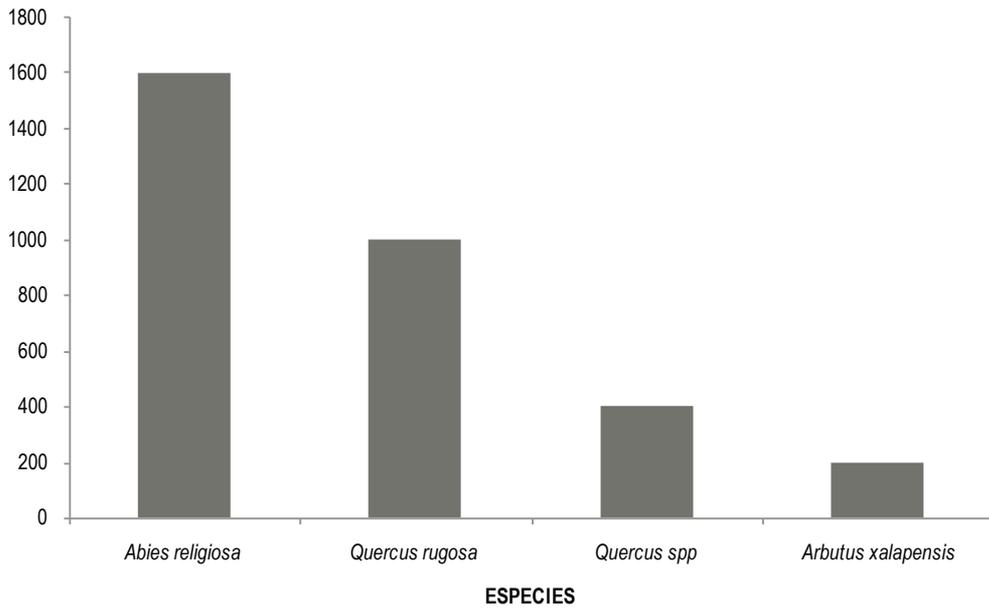
#### Regeneración natural



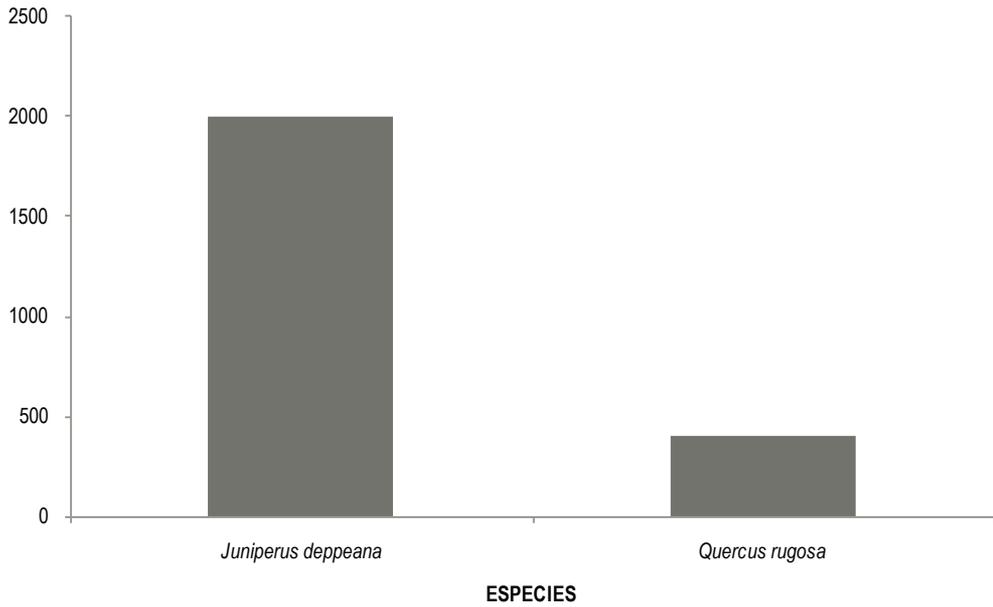
Densidad de regeneración por hectárea de especies arbóreas en la microcuenca Atotonilco, cobertura menor a 10%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.



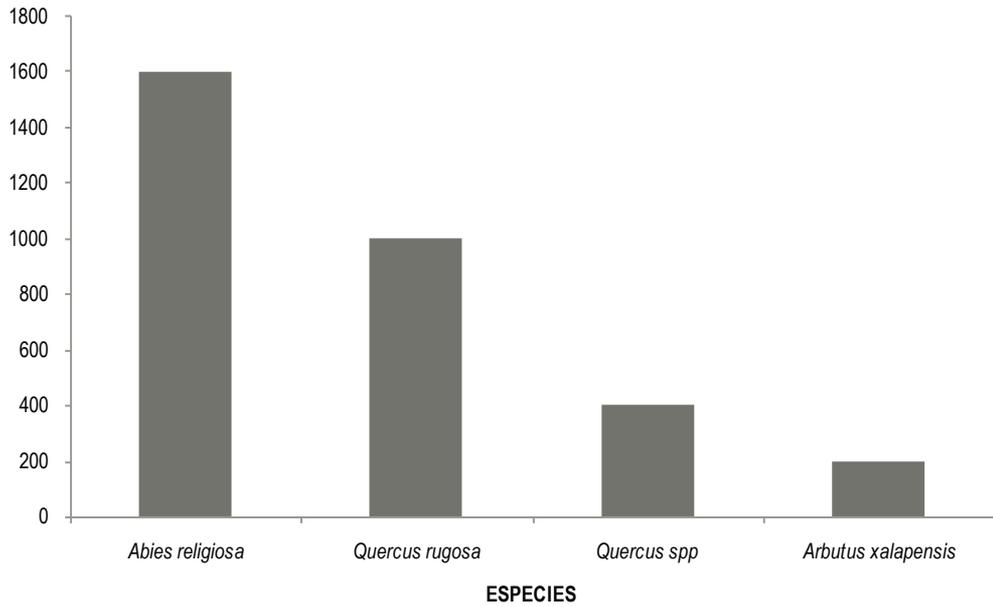
Densidad de regeneración por hectárea de especies arbóreas en la microcuenca Atotonilco, cobertura de 10 a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.



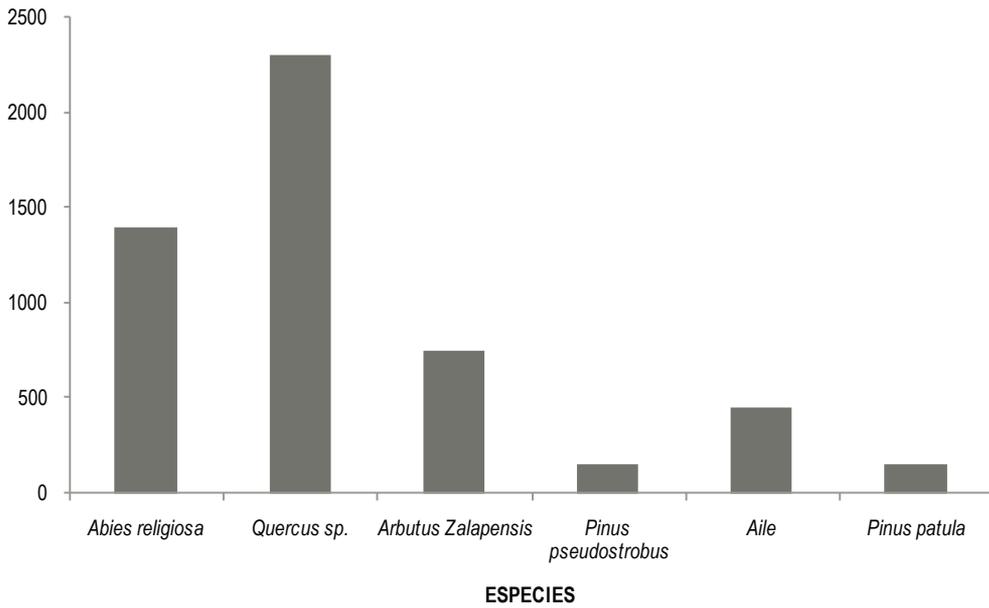
Densidad de regeneración por hectárea de especies arbóreas en la microcuenca Atotonilco, cobertura mayor a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.



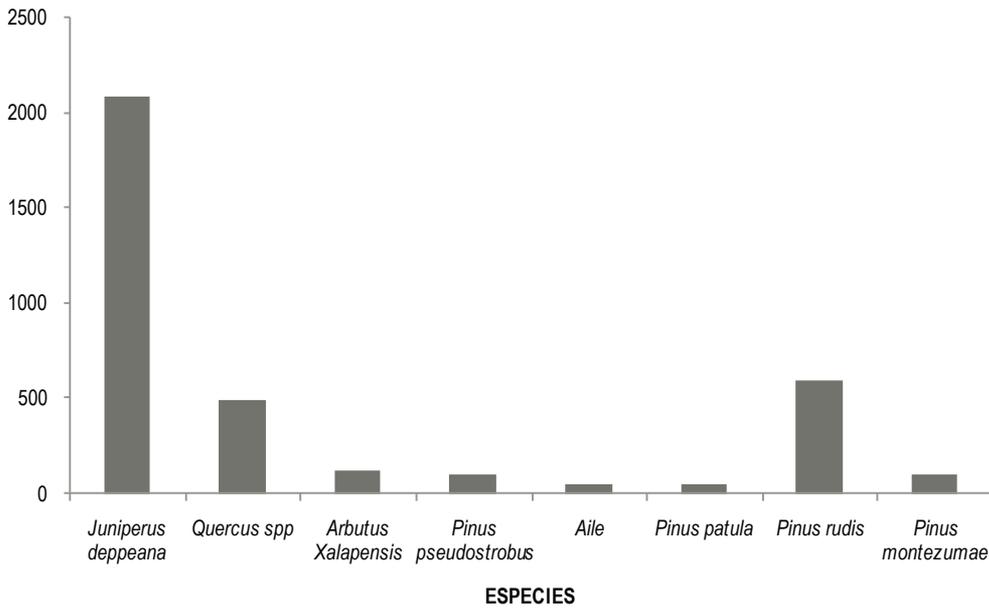
**Densidad de regeneración por hectárea de especies arbóreas en la microcuenca El Fondón, cobertura menor a 10%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**



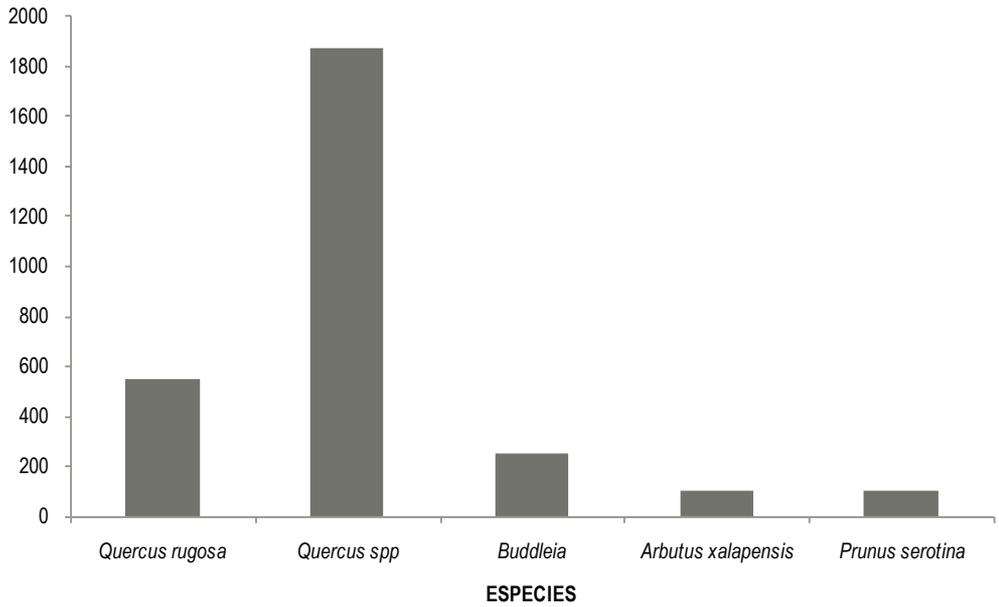
**Densidad de regeneración por hectárea de especies arbóreas en la microcuenca El Fondón, cobertura mayor a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**



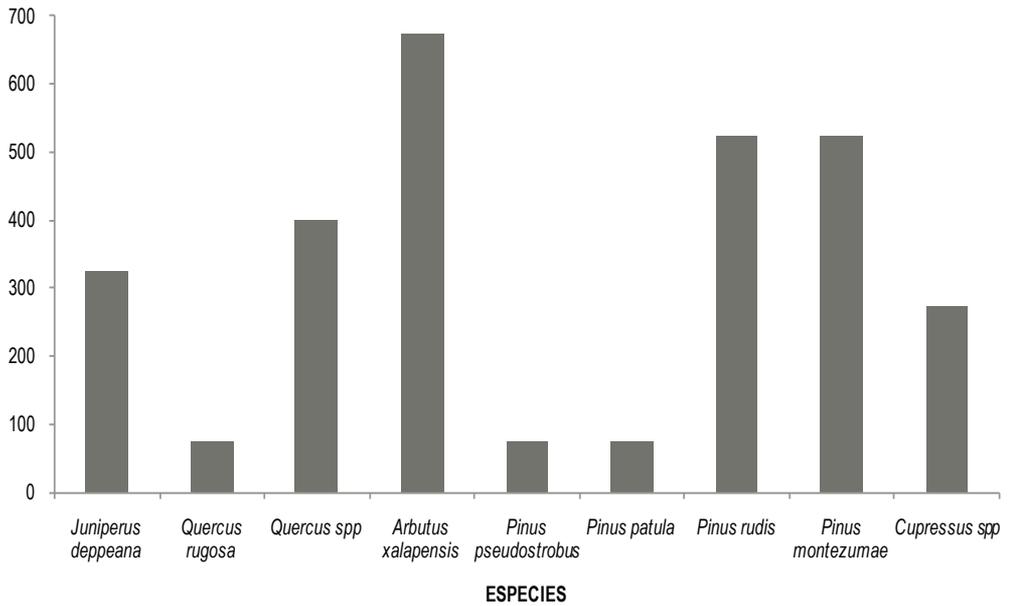
Densidad de regeneración por hectárea de especies arbóreas en la microcuenca El Peñón, cobertura menor a 10%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.



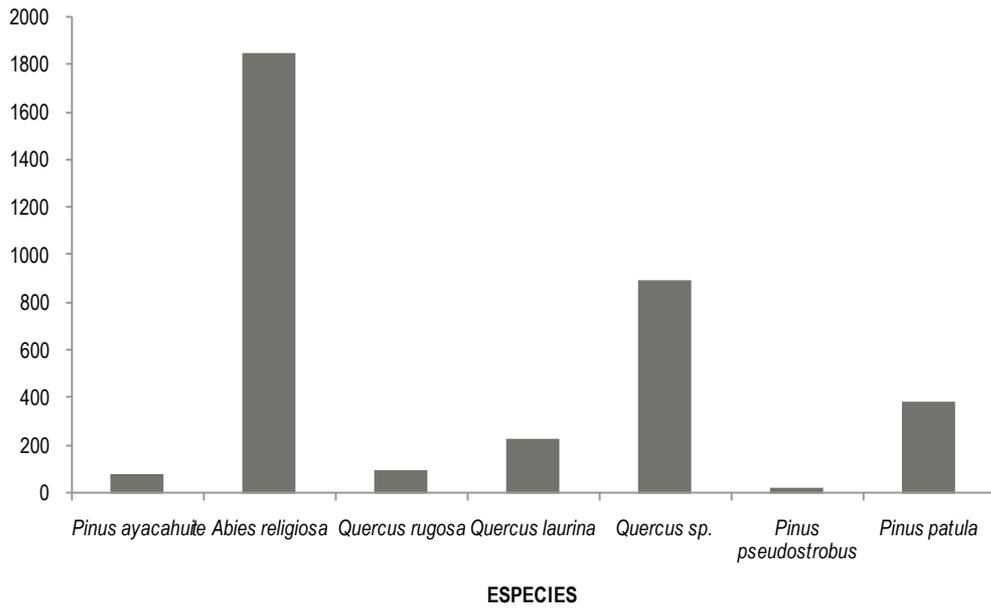
Densidad de regeneración por hectárea de especies arbóreas en la microcuenca El Peñón, cobertura de 10 a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.



**Densidad de regeneración por hectárea de especies arbóreas en la microcuenca El Peñón, cobertura mayor a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**



**Densidad de regeneración por hectárea de especies arbóreas en la microcuenca Tlaxco, cobertura de 10 a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**



**Densidad de regeneración por hectárea de especies arbóreas en la microcuenca Tlaxco, cobertura mayor a 30%, municipio de Tlaxco, Tlaxcala.**



## SÍNTESIS



Dentro del estudio del ciclo del agua y en los flujos implicados en sus procesos como energía, solutos, sedimentos, biomasa, entre otros. La cuenca vertiente o cuenca hidrográfica es considerada por los especialistas como la unidad funcional fundamental y, por tanto, base de la gestión, el manejo y la protección de los recursos naturales renovables. Interesante por las posibilidades de balance que ofrece, el concepto de cuenca vertiente la cual es una superficie drenada aguas arriba de un punto definido en un cauce considerado como la salida, es igualmente integrador en la medida que se puede aplicar a una gran gama de escalas espaciales; desde pequeñas cuencas hasta grandes ríos, así como de una gran variedad de ambientes y condiciones como cuencas urbanas o rurales, agrícolas o forestales, lagos, medios kársticos, etc.

De esta forma, un gran número de estudios se han realizando en los últimos 30 años donde se pueden distinguir tres enfoques principales:

El hidrológico que describe las condiciones de las cuencas y los mecanismos de transferencia hídrica al interior de la misma,

El físico que, al igual que los ecofisiólogos, bioquímicos y bioclimatólogos, analizan los mecanismos que rigen el flujo del agua, de la energía y de la materia en el sistema Suelo-Planta-Atmósfera, limitándose en unidades relativamente pequeñas y homogéneas dentro de la cuenca,

El enfoque de la geomorfología, pedología y ecología, interesados en el análisis morfogenético y a la distribución espacial de formaciones superficiales y vegetales a la escala del paisaje.

Si bien cada uno de los anteriores enfoques resulta indispensable y complementario a los demás, también es cierto que en la práctica resulta difícil el desarrollo de cada uno de ellos por las implicaciones de tiempo y costo que tiene.

Para el caso específico de la cuenca del Río Zahuapan en el Estado de Tlaxcala, se analizaron los enfoques anteriores y se seleccionó una serie de áreas de estudio de tal forma que fuesen complementarias entre sí y, a la vez, aporten de manera individual nuevo conocimiento en sus respectivos campos. Así, se tiene un enfoque multidisciplinario que resulta enriquecedor para el estudio y complementario en la aportación de conocimientos sobre el uso y manejo del agua y el conocimiento regional del ciclo del agua. Estas áreas fueron:

- i) Sistema de Información Geográfica de la cuenca del Río Zahuapan
- ii) Situación socioeconómica y eficiencia económica del agua en la cuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala
- iii) Análisis de la variabilidad hidroclimática en el Estado de Tlaxcala, México

- iv) Fuentes y datación de agua subterránea del Estado de Tlaxcala
- v) Cuantificación de grado de erosión del suelo en la cuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala
- vi) Estructura y composición de la vegetación en la cuenca alta del Río Zahuapan, Tlaxcala

En estas áreas, se desarrolló una serie de objetivos de tal forma que la conformación de sus resultados permite un mejor entendimiento del manejo del agua dentro de la cuenca así como la identificación de acciones que coadyuven a la conservación de los recursos agua, suelo y vegetación dentro de la misma.

De manera general, el Estado de Tlaxcala se ubica en la confluencia de tres importantes unidades hidrológicas: la región del Río Balsas que ocupa la mayor parte de su territorio con el 78.8%; la del Río Pánuco el 18.2% y Tuxpan – Nautla el 3.0%. A pesar de esta condición geográfica en apariencia favorable, para el Gobierno del Estado es una prioridad la conservación y manejo sustentable de los recursos naturales dada su estrecha relación con el bienestar de la sociedad en su conjunto. En este sentido, y con la finalidad de coadyuvar con las acciones que realiza el Gobierno del Estado sobre conservación de recursos naturales, el presente trabajo se dirigió hacia el estudio de la prevención, conservación y/o restauración de aquellas áreas actualmente perturbadas a través del desarrollo y estructuración de una serie de estrategias y que incluyen las áreas arboladas, los suelos y los recursos hídricos con que cuenta el Estado.

Actualmente, los principales desafíos que enfrenta el Estado de Tlaxcala en materia de conservación de recursos naturales en la época actual, es el de prevenir y revertir el deterioro de aquellas áreas con suelos clasificados como de alta fragilidad y los cuales han venido disminuyendo con el paso del tiempo, su capacidad de aporte a los servicios ambientales hidrológicos. Respecto a esto, las acciones emprendidas por el Gobierno del Estado han permitido avances significativos en la conservación de los recursos naturales, por lo que la suma de los esfuerzos mediante la participación de la ciudadanía en conjunto contribuirá a que estos resultados se puedan ver incrementados en beneficio de la población en su conjunto.

Así, el presente estudio se suma a las acciones e iniciativas emprendidas por el Gobierno del Estado con la finalidad de contribuir a la conservación y manejo sustentable de los recursos naturales mediante la identificación y desarrollo de medidas específicas que permitan su conservación en el área de influencia de la cuenca del río Zahuapan, principal cuenca del estado de Tlaxcala tanto por sus recursos naturales como por las actividades económicas que ahí se realizan. Todo esto a través del conocimiento y caracterización de Balance hidrológico y calidad del agua; la dinámica y aprovechamiento de los recursos forestales; dinámica y aprovechamiento del recurso suelo; socioeconomía del agua y reconstrucción climática.

De igual forma, el presente proyecto se planteo los siguientes objetivos específicos:

- i. Actualizar a mayor detalle el inventario forestal y conocer la dinámica del aprovechamiento regulado, el deterioro natural e inducido en la estructura silvícola, así como la regeneración de las áreas forestales en el área de estudio.
- ii. Caracterizar con detalle el uso actual del suelo, su eficiencia productiva para cada sector y caracterizar su grado de deterioro o mejoramiento bajo los usos y manejos predominantes para generar propuestas de manejo sustentable.
- iii. Determinar la eficiencia de transformación del agua de los diferentes sectores productivos de la región, considerando el volumen de agua utilizado por unidad de producción a través de indicadores de rentabilidad social, económica y ecológica de este recurso.
- iv. Elaborar un sistema de información geográfica que contenga una propuesta de ordenamiento territorial que incluya mapas del estado actual de los recursos naturales vegetación, agua y suelo y su potencial de deterioro dentro el área de estudio.
- v. Establecer el funcionamiento y la dinámica hidrológica del área mediante la determinación del balance de agua, reconstrucción climática y relación con fenómenos de circulación global como ENSO.
- vi. Datar y analizar las aguas subterráneas dentro de la zona de estudio para determinar la dinámica de las recargas recientes o antiguas y la evolución de la calidad geoquímica del manto acuífero.

Así, el área del estudio se circunscribió a la cuenca del río Zahuapan (Figura 1), la cual ocupa el 40.6% de la superficie del Estado, sin embargo en ella se realizan más del 90% de las principales actividades económicas.

## **I.- SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE LA CUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN**

Toda la información espacial recabada, tanto los aspectos sociales, físicos y bióticos, se integraron en un Sistema de Información Geográfica para la cuenca del río Zahuapan. Este Sistema es considerado el de mayor robustez que se haya integrado para esta región del Estado y sirve como una importante herramienta en la implementación de planes y políticas de desarrollo y apoyo técnico en las actividades agropecuarias y forestales, así como del seguimiento que se hagan de ellas. En la información relevante, se encuentra la datación del agua subterránea, los cambios en

el uso del suelo, la agricultura en sus diferentes esquemas de producción, la ubicación de suelos erosionados así como el grado de erosión que presentan, entre otros aspectos físicos.

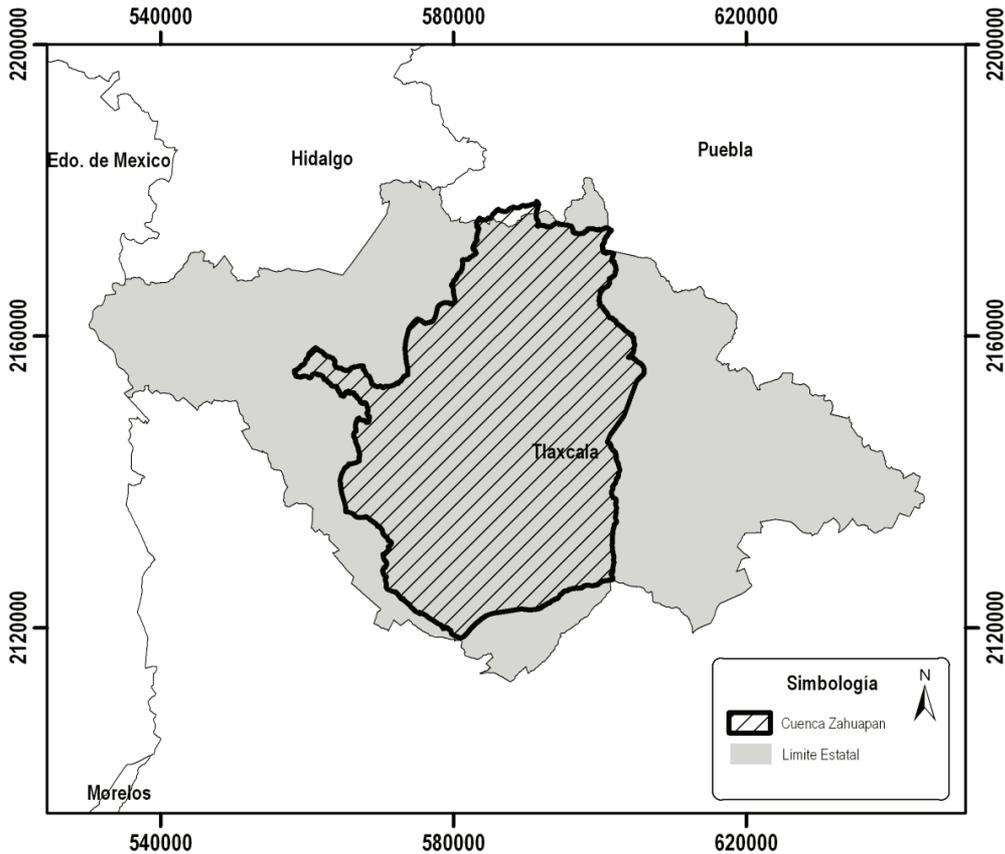


Figura 1. Ubicación Geográfica de la cuenca del río Zahuapan.

Las aplicaciones de esta información pueden dirigirse hacia el manejo de recursos naturales determinando:

Áreas potenciales para reforestación de especies nativas del eje neovolcánico ubicando aquellos sitios que cubran las características de suelo, pendiente, clima, etc. que permitan el desarrollo óptimo de la especie seleccionada.

Generación de unidades de manejo ambiental en función de tipos de suelos, geología, topografía y clima que permiten un manejo adecuado de recursos naturales ya que son áreas que comparten características fisiográficas.

Determinación de tendencias de crecimiento o disminución en áreas agrícolas y con vegetación natural y su aporte hacia las áreas a través de un análisis de cambio de uso de suelo, para proponer planes de desarrollo que cubran intereses comunes para los usuarios de recursos de la cuenca (sector agrícola, sector industrial, áreas urbanas).

La información cuenta con un visualizador de la información y de igual forma se puede dar capacitación al personal que lo solicite por parte del Gobierno Estatal para el manejo de la misma y, sobre todo, para la utilización de la misma con la finalidad que sirva de apoyo en las políticas de conservación de los recursos naturales dentro de la cuenca del río Zahuapan.

## **II.- SITUACIÓN SOCIOECONÓMICA Y EFICIENCIA ECONÓMICA DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCALA**

Otro aspecto importante en la cuenca lo representa la productividad del agua. Es decir la riqueza generada por metro cúbico de agua utilizada en las diferentes actividades productivas de la región. Para efectos del cálculo de la productividad del agua en este estudio, se utilizaron los valores de la producción total anual registrada para cada actividad económica y el gasto anual de agua reportado para dichas actividades por la CNA a través del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA).

Las actividades económicas consideradas se refieren a los sectores Agropecuario e Industrial. Lo anterior debido a que los reportes de gastos de agua generados por la CNA, están agregados según su uso en: sector Agropecuario, Abasto Público, Industrial y Termoeléctricas. Las actividades del sector Agropecuario agrupan aquellas relacionadas con la acuicultura, agricultura y actividades pecuarias; en tanto que el sector industrial agrupa la industria manufacturera y de construcción. En este caso, no se consideró la minería y la electricidad, así como el agua y suministro de gas. La primera, debido a que no se cuenta con información actualizada para el periodo 2005-2008 y su participación en el sector industrial es muy pequeña; y la segunda, debido a que para Tlaxcala no hay suministro de agua a termoeléctricas y tanto el rubro de agua como suministro de gas son principalmente servicios. La CNA denomina a la industria como industria autoabastecida, que toma su agua directamente de los ríos, arroyos, lagos o acuíferos del país.

De esta forma, y de acuerdo a los consumos y valores reportados para cada sector, se tiene que la productividad del agua en el sector agropecuario fluctuó entre 1.93 y 5.00 pesos para los

cultivos de maíz grano y alfalfa, respectivamente. Por otra parte, de acuerdo con los valores de producción y consumo, la productividad del agua ( $\$/m^3$ ) alcanzada por la industria en el Estado para el año 2008 fue de 1,179.50 pesos. Esta diferencia se debe esencialmente a los bajos volúmenes que requiere la industria en sus procesos de producción en comparación con las actividades agropecuarias. Asociada a esta productividad, la industria también se ubica muy por encima de la aportación del PIB estatal en comparación con el sector agropecuario, ya que este último participa con el 6.6% del PIB Estatal, en tanto que la industria aporta alrededor del 30% del PIB, siendo la actividad productiva que mayor participación tiene en este indicador.

En base a lo anterior, y dada la baja productividad del agua en el sector agropecuario, se realizó una caracterización de los sistemas productivos en este sector para las tres unidades hidrológicas de la cuenca: la parte alta, media y baja. Para ello, se realizaron encuestas a los productores ubicados en estas tres regiones cuyos resultados se detallan en el anexo técnico correspondiente. De los resultados encontrados se puede resaltar lo siguiente:

En la parte alta, el tamaño promedio de la familia es de seis miembros, con un promedio de dependientes familiares por productor de 3.5. De la superficie agrícola que trabajan los encuestados, el 87% se maneja como agricultura de temporal, y el resto (13%), se atiende con agua de riego. De este 3% de superficie bajo riego, el 24% se riega con agua proveniente de presas localizadas en la cuenca del río Zahuapan y el resto con agua extraída de pozos profundos. En este caso, la tecnología de riego prácticamente no se aplica dadas las limitaciones de asesoría e inversión que se tienen en este aspecto (nivelación, gastos unitarios, estado que guardan los canales de conducción, etc.). En relación a la ganadería, del total de productores encuestados en esta región el 60% se dedica a esta actividad. El promedio de ganado bovino por productor es de 31 animales con un tamaño máximo de hato de 463 y un mínimo de cinco. El 40% del ganado se maneja en forma estabulada y el resto de forma semiestabulada, pastoreándolo en los terrenos agrícolas y zonas ejidales comunes. Otras de las actividades en la región son la de la ganadería ovina, porcina y aviar, las cuales se complementan con las actividades agrícolas.

En la parte media, las familias de los productores varían de entre 2 y 13 miembros, registrándose un promedio de 7. El número de dependientes económicos fluctúa entre 1 y 11 con un promedio de 3.9 integrantes por familia. De la tierra trabajada por los encuestados, el 71% es sembrado por el propio dueño; el 17.5% como tierras rentadas y el 11.6% restante se siembran a medias y con tierras prestadas. Asimismo, en relación a la tenencia de las tierras de las cuales se levantó información, el 40% son tierras ejidales, el 11.8% son comunales, y el 48.1% son de propiedad privada. Al igual que en la parte baja, falta aplicar tecnología de riego en aquellas áreas donde se desarrolla este tipo de agricultura. En relación a las actividades ganaderas, la tercera parte de los productores encuestados tienen ganado bovino, con un promedio de 12.2 animales por productor, fluctuando en un máximo de 32 cabezas y un mínimo de una. El 93% del ganado se maneja en forma estabulada y el resto por pastoreo. La ganadería porcina y ovina también está presente en esta región media de la cuenca aunque en menor porcentaje que en la parte alta.

Otras actividades reportadas que contribuyen a su economía familiar se asocian a las artesanías y comercio con el 4.3%, mientras que el 13% señala que se dedica al área de la construcción; como albañiles, y otro porcentaje igual en actividades como empleados en organizaciones públicas y privadas.

En la parte baja, el tamaño promedio de familia asciende a siete miembros, con un promedio de dependientes familiares por productor de 3. De la superficie agrícola trabajada por los encuestados, el 39% se maneja como agricultura de temporal y el resto (61%), se atiende con agua de riego. De éste 61% de superficie bajo riego, el 79% se irriga con agua proveniente del río Zahuapan (que arrastra las aguas negras tratadas y no, provenientes de las ciudades de Tlaxcala, Apizaco y otras poblaciones) y el resto con agua extraída de pozos profundos localizados principalmente en las márgenes del citado río. Los cultivos más comunes en el ciclo primavera - verano y que son auxiliados con riego son: avena, maíz, canola, alfalfa, cebolla, cilantro, rábano y tomate. En relación a las actividades ganaderas, el 97% de los productores encuestados se dedica a la actividad ganadera. El promedio de ganado bovino por productor es de 14 animales con un valor máximo de 60 y un mínimo de cinco. La característica del manejo del ganado es que el total se encuentra bajo condiciones estabuladas; es decir, no se pastorea. Existe también ganado porcino, ovino y aviar aunque en menor proporción que el ganado bovino.

A manera de síntesis en este apartado, se puede establecer que dentro del PIB manufacturero, la división industrial alimentos y bebidas tiene la mayor participación; sin embargo, ésta disminuyó ligeramente. Los textiles y prendas de vestir, así como la industria del cuero, registraron un crecimiento neto. A pesar que las unidades económicas registradas como industrias manufactureras representan el 14.4% del total, éstas emplean al 39.5% del personal ocupado. El agua para uso agropecuario requiere un promedio del 85% de las aguas superficiales y arriba del 50% de aguas subterráneas; mientras que alrededor del 37% de las aguas subterráneas son requeridas en el abasto público. La industria autoabastecida se mantiene con un 7% del total del volumen del agua concesionada anualmente. De acuerdo con los valores de producción de la industria, la productividad del agua ( $\$/m^3$ ) alcanzada por la industria en Tlaxcala para el año 2008 fue de 1,179.50 pesos, mientras la estimada para uso agrícola fluctuó entre 1.93 y 5.00 pesos para los cultivos de maíz grano y alfalfa, respectivamente.

### **III.- ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA EN EL ESTADO DE TLAXCALA, MÉXICO**

Otros de los aspectos importantes abordados en este estudio, lo representó el análisis del clima, particularmente la lluvia, por ser la variable de mayor relevancia en la disponibilidad del

agua dentro de la cuenca y su relación con los procesos del ciclo del agua dentro de la misma. Para llevar este análisis, se utilizaron técnicas dendrocronológicas que permiten “extraer” la información registrada por los árboles de mayor longevidad de la región. Así, la información recabada permite identificar aquellos años húmedos y/o secos que se han presentado en la región y, los cuales, quedaron registrados en los anillos de crecimiento que año con año se pueden identificar en los árboles. Así, es posible extender el análisis de los patrones de lluvia por un periodo más prolongado que el registrado por las estaciones climatológicas convencionales.

De los resultados encontrados en este apartado se establece, a partir de la reconstrucción de precipitación anual, que la región oriental del Estado de Tlaxcala cubrió un período de 158 años (1850-2008) y mostró alta variabilidad anual y multianual. Se presentaron sequías intensas en esta región casi a nivel década, es decir, 1855-1860, 1864-1867, 1877-1904, 1929-1934, 1961-1978, 1983-1990 y 2001-2005, con repercusiones económicas y sociales de gran relevancia. Ocurrieron períodos húmedos en: 1859-1864, 1867-1876, 1905-1927, 1935-1960, 1979-1982 y 1991-2000.

La reconstrucción estacional invierno-primavera (enero-septiembre) para la región sur de Tlaxcala, se extendió por 119 años (1890-2008) y mostró sequías cada veinte y treinta años, es decir, 1890, 1920, 1940, 1970 y 1990. Ocurrieron períodos húmedos en 1895-1896, 1900-1911, 1923-1925, 1954-1959, 1966-1970, 1978-1983, 1985-1987, 1998-2001 y 2005-2006.

El impacto de patrones circulatorios como El Niño Oscilación del Sur y el Monzón mexicano en la precipitación de esta región, no evidenció una respuesta significativa, por lo que posiblemente otros fenómenos atmosféricos estén más relacionados en definir el clima de esta región. La falta de una red dendrocronológica más extensa, previene realizar una conclusión definitiva sobre el impacto de estos fenómenos; no obstante, los resultados de estas dos cronologías, indican que el fenómeno ENSO puede tener un impacto en esta región, pero sólo en eventos extremos, que se extienden a veces a gran parte del territorio nacional.

En términos de manejo de agua, las reconstrucciones de precipitación indican gran variabilidad interanual en términos de disponibilidad. Esta situación aunada a una deforestación intensiva, que ha eliminado casi el 90% de la vegetación original, ha provocado un fuerte impacto en el ciclo hidrológico, con alta repercusión en problemas de erosión, calidad de agua y recarga de mantos acuíferos, amén de la pérdida en biodiversidad.

Los eventos climáticos extremos recurrentes, que se indica, poseen una alta influencia antropogénica, tienen mayor repercusión en sitios con alto disturbio ecológico como lo son los ecosistemas de Tlaxcala. Las instituciones encargadas de la planeación y manejo de los recursos hídricos deben de considerar la variabilidad climática detectada en estos estudios y en conjunción con información climática actualizada desarrollar la disponibilidad de agua para diferentes escenarios climáticos venideros.

#### IV.- FUENTES Y DATACIÓN DE AGUA SUBTERRÂNEA DEL ESTADO DE TLAXCALA.

De acuerdo a la Subdirección de Administración del Agua en la Comisión Nacional del Agua cita en Tlaxcala, Tlaxcala, para el año 2008 existían alrededor de 1,211 pozos registrados en el estado, con un volumen de 217 millones de metros cúbicos concesionados. Haciendo una agregación aproximada de la información proporcionada por este organismo, el 97% del agua concesionada se clasifica como de uso agrícola, industrial y público urbano, el restante 3% se destina a fines diversos.

Del volumen total extraído de agua, se dedica el 54% para uso agrícola; el 36.6% para uso público-urbano, y el 8.8% para uso industrial.

Dentro de este apartado del estudio integral, como primer punto, se analizó lo relacionado con los recursos hídricos donde se han emprendido importantes acciones en materia de tratamiento de las aguas residuales. Anualmente se generan  $1,488 \text{ l s}^{-1}$  de aguas residuales, de los cuales un 68 % de éstas son tratados ( $1,011 \text{ l s}^{-1}$ ). Sin embrago, existen áreas que pueden ser mejoradas o aprovechadas en las actividades agrícolas con la finalidad de disminuir el riesgo de contaminación y salud a la población. De las plantas de tratamiento a cargo de los municipios, éstas operan a un 73.6% de su capacidad de diseño, por lo que se puede en conjunto tratar un gasto adicional de  $181.9 \text{ l s}^{-1}$  de agua residual.

Los efluentes de las aguas residuales con conductividad eléctrica mayor de  $1 \text{ dS m}^{-1}$  representan un riesgo potencial de la salinización de los suelos de uso agrícola, por lo cual requieren un manejo adecuado para el control de la salinidad. Se recomienda determinar la RAS de los efluentes como un parámetro para evaluar los posibles riesgos de sodización en aquellos casos donde el agua es destinada a la producción agrícola.

Asimismo, los efluentes de las plantas de tratamiento de agua residual son ricos en Nitrógeno y Fósforo, por lo cual estas concentraciones se deben incluir en los programas de fertilización, para hacer un uso más eficiente de los fertilizantes y disminuir los costos de producción de los cultivos. De acuerdo a los datos recabados la concentración de coliformes en los efluentes de las plantas tratadoras, éstos sobrepasan los límites permisibles para uso agrícola, por lo que es recomendable incrementar el control sobre la operación de estas plantas con la finalidad de disminuir los riesgos en la producción.

Otro de los aspectos a considerar lo representa las descargas de aguas residuales que se vierten a los cauces sin tratamiento previo, lo que puede representar un riesgo de posible contaminación al acuífero y por tanto de los pozos de extracción con diferentes fines (potable,

agrícola, otros). En el anexo técnico se detalla la ubicación de estas descargas así como algunas de las características relacionadas con la calidad del agua.

Otros de los aspectos importantes del estudio de la cuenca del río Zahuapan, es la datación del agua subterránea. Este tipo de estudios contribuye a entender el ciclo hidrológico de la cuenca del río Zahuapan y su relación con los procesos de recarga del agua del acuífero. Para ello, se utilizan técnicas isotópicas a partir de las cuales se realizan mediciones del radiocarbono <sup>14</sup>C. Los análisis se realizaron en la Universidad de Arizona en el laboratorio del *National Science Foundation* y el laboratorio de *Environmental Isotopy* de la misma Universidad. En este proceso, se analizó una serie de muestras de agua de pozos profundos representativos de la cuenca y del acuífero y las cuales se detallan en el anexo técnico correspondiente. Así, los resultados encontrados establecen que la mayoría de las muestras son aguas con edad igual o menor de 55 años. Lo que indica que existe una importante dinámica de recarga a partir de los escurrimientos superficiales y las lluvias que ocurren en la región hacia las aguas subterráneas. Esta dinámica hidrológica es resultado de la conformación geológica de la cuenca así como de las láminas de lluvia precipitada que se ven beneficiadas por la ubicación Geográfica del Estado. Estas condiciones hidrológicas favorables también pueden representar un riesgo de contaminación a través de las descargas no controladas de aguas residuales hacia los cauces que drenan la cuenca, por lo que es necesario tener un mejor control de las mismas.

## **V.- CUANTIFICACIÓN DE GRADO DE EROSIÓN DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCALA**

Aspecto fundamental representa el recurso suelo dentro de la cuenca del río Zahuapan por su estrecha relación con la productividad agrícola, vegetación natural y el ciclo del agua en sus procesos de infiltración y escurrimiento. Sin embargo, dada su estructura y conformación natural, el suelo es un recurso natural que se encuentra en constante riesgo de ser erosionado por los procesos de escurrimiento y erosión eólica. Esto, como se señaló anteriormente, consecuencia del cambio del uso del suelo que desencadena su pérdida con diferentes tasas erosión. En base a ello, en este apartado se consideró importante la identificación, ubicación y cuantificación de áreas en la cuenca del río Zahuapan, que presenten diferentes niveles de erosión a través de un inventario. Esta información es de gran utilidad porque facilita en el corto plazo, la priorización de acciones de diferente índole (restauración-reforestación, protección-conservación, investigación y fomento) no solo en áreas severamente erosionadas, sino también en áreas que se encuentren en proceso de erosión a diferentes niveles.

Entre los puntos señalados como inadecuados en estudios anteriores en los programas de recuperación de tepetates (suelos severamente erosionados) en Tlaxcala, se presenta la falta de inventarios de la distribución de los duripanes (suelos con horizontes o capas compactadas cementadas por  $\text{CaCO}_3$ , yeso, sílice, sales u óxidos de Fe y Al.), lo cual trae como consecuencia problemas y errores importantes en las prácticas de restauración.

Por todo lo anterior, los resultados que se generan con este estudio pueden coadyuvar con la optimización de los recursos económicos destinados a estas acciones, porque permiten en principio dimensionar la magnitud del problema, y buscar mayores beneficios e impactos de los programas de restauración de estas áreas y de sus habitantes.

Para llevar a cabo la ubicación geográfica de los suelos erosionados, se utilizaron imágenes satélite SPOT XS con las cuales se realizó una clasificación supervisada cuyos resultados fueron verificados en 75 puntos de observación. La matriz de confusión derivada de las imágenes de satélite indicó un 81.33% de concordancia de la clasificación con los puntos de verificación en campo, por lo que se considera que el mapa presentado es aceptable, en términos de ubicación y clasificación de superficies erosionadas en estos municipios. Los resultados de la clasificación indican que la cuenca presenta un total de 5,103.48 ha de áreas erosionadas, de esta superficie el 82.21, 11.55 y 6.24% corresponden a erosión severa, media y leve respectivamente. Cada una de estas superficies erosionadas se encuentra debidamente clasificada y ubicada geográficamente dentro de la cuenca en el Sistema de Información Geográfica anexo, además de que se incluye el mapa temático que muestra las áreas con diferentes grados de erosión dentro de la cuenca en el anexo técnico respectivo.

## **VI.- ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DE LA VEGETACIÓN EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCALA**

Dentro de la cuenca del río Zahuapan, el cambio en el uso del suelo es uno de los factores que más influyen en la pérdida de los suelos como consecuencia de la erosión hídrica y eólica. En la mayoría de los casos, estos cambios de uso son en áreas de vocación forestal que han provocado la alteración de extensas superficies del estado. En la parte alta de la cuenca, en los municipios de Tlaxco y Terrenate, se estima que existe erosión severa (afloramiento de tepetates) que afecta a poco más de 3,000 ha.

En este sentido, el conocimiento detallado de las características de la vegetación adquiere gran relevancia por ser la base técnica de todas las acciones que se instrumentan para el manejo sustentable de los bosques con sus recursos asociados como el suelo y el agua. En base a

esto, se planteó la caracterización detallada de los atributos estructurales y de composición de la vegetación, con la finalidad de conocer la dinámica de los bosques, el manejo regulado, el deterioro natural e inducido en la estructura silvícola, así como la regeneración de las áreas forestales en la parte alta del río Zahuapan. Además de ello, se caracterizó el grado de deterioro de los suelos en esta área de estudio que permitieron generar propuestas de manejo sustentable de los recursos naturales de la cuenca.

Los resultados mostraron que la diversidad y densidad de especies arbóreas registradas en la cuenca alta del río Zahuapan son considerablemente altas, tanto en el estrato arbóreo como en el de renuevos. Considerando que estos bosques han sido intervenidos por periodos largos de tiempo (más de dos décadas), su composición, estructura, y existencias reales reflejan parámetros adecuados de desarrollo.

De las cuatro microcuencas analizadas en las que se subdividió la parte alta de la cuenca, el Fondón mostró consistentemente los valores más bajos de diversidad y densidad en los estratos arbóreos y de regeneración natural, reflejando condiciones no muy favorables para el desarrollo del arbolado. En contraste, los valores observados en la microcuenca de Tlaxco sugieren mejores condiciones para los bosques.

La tendencia incoetánea observada en las distribuciones diamétricas indica que los bosques de la cuenca alta del río Zahuapan están en una fase de desarrollo intermedio, es decir, en pleno crecimiento, con suficiencia de individuos en categorías pequeñas, lo cual también es concordante con la estructura de alturas.

Dado que en la subcuenca predominan los bosques de pinos y pino-encino, se puede esperar que los programas de manejo de estos bosques emprendidos por el gobierno Estatal y Federal continúen con las inercias actuales. Sin embargo, con base en los parámetros estructurales observados, se pueden adicionar objetivos al manejo para hacerlos compatibles con programas de conservación, restauración, de servicios ambientales, etc., con el objeto de potenciar su función en el balance hidrológico de la subcuenca. Estos aspectos así como las acciones relacionadas se detallan en el informe anexo técnico correspondiente.

# **GLOSARIO**



**Afluente.** Río o arroyo que no alcanza el mar sino que desemboca en otro río principal o en otro afluente al que alimenta con su caudal.

**Antropogénico.** El término antropogénico se refiere a los efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas a diferencia de los que tienen causas naturales sin influencia humana. Normalmente se usa para describir contaminaciones ambientales en forma de desechos químicos o biológicos como consecuencia de las actividades económicas, tales como la producción de dióxido de carbono por consumo de combustibles fósiles.

**Banco de material.** Sitio determinado para la extracción de materiales para la construcción o conservación de una obra.

**Biodiversidad.** Se refiere en general a la variabilidad de la vida; incluye los ecosistemas terrestres y acuáticos, los complejos ecológicos de los que forman parte, así como la diversidad entre las especies y dentro de cada especie.

**Biomasa.** Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

**Capa temática.** Estrato con información temática (topografía, ecología, edafología infraestructura, etc.) y que es parte de un Sistema de Información Geográfica (GIS).

**Cata.** Es una obra minera de carácter exploratorio de la que no se han podido obtener productos minerales con rendimiento económico.

**Cuenca.** Área de la superficie terrestre por donde el agua de lluvia escurre y transita o drena a través de una red de corrientes que fluyen hacia una corriente principal y por ésta hacia un punto común de salida. Territorio rodeado de montañas por el que corre un gran río con afluentes (ríos más pequeños o arroyos que lo alimentan) o existe un lago donde éste desemboca. En una cuenca pueden existir obras creadas por el hombre para aprovechar el agua, tal es el caso de las presas, como Chicoasén en la cuenca del río Grijalva.

**Datación.** Acción que permite fijar fechas y establecer lapsos cronológicos vinculados con la estructura espacial.

**Datum geodésico.** Sistema de referencia con respecto al elipsoide de la tierra.

- Dendrocronología.** Ciencia que estudia los cambios ambientales del pasado analizando los anillos de crecimiento anual de los árboles.
- Dique.** Filón de roca volcánica que atraviesa verticalmente varias capas de la corteza terrestre y a veces puede sobresalir por encima de la superficie, formando una especie de muro o pared.
- Echado.** Es el ángulo de inclinación de una superficie medida con respecto a la línea horizontal.
- Efluentes.** Salida o flujo saliente de cualquier sistema que descarga líquidos, sólidos o desperdicios, como canales, descargas de plantas de tratamiento.
- Erosión en canalillos:** Comprende un proceso de desprendimiento y transporte de partículas de suelo por flujo concentrado, estos pueden ser fácilmente removidos por operaciones de labranza.
- Erosión en cárcavas:** Estado de degradación más avanzado de la erosión en forma de surcos desarrollados en vías de drenajes naturales (camino de animales, surcos agrícolas, entre otros) que por su profundidad no puede ser removida por operaciones de labranza y es necesario aplicar técnicas de recuperación de suelos para su corrección.
- Erosión laminar:** Remoción uniforme del suelo, en capas delgadas de los terrenos en pendiente, que resulta de la saturación del suelo y su deslizamiento superficial de la pendiente.
- Estabulada.** Se refiere a las condiciones de alimentación del ganado, bajo este sistema el ganado no pastorea.
- Falla.** Una falla es una grieta en la corteza terrestre. Generalmente, las fallas están asociadas con, o forman, los límites entre las placas tectónicas de la Tierra. En una falla activa, las piezas de la corteza de la Tierra a lo largo de la falla, se mueven con el transcurrir del tiempo. El movimiento de estas rocas puede causar terremotos.
- Fase lítica (somera) y lítica profunda.** Capa de roca dura y continua o un conjunto de trozos de roca muy abundantes que impiden la penetración de las raíces.
- Fase pedregosa.** Se refiere a la presencia de fragmentos de roca mayores de 7.5 cm de largo en la superficie del terreno o cerca de ella.
- Geomorfología.** Rama de la geografía que estudia la superficie terrestre, se centra en el estudio de las formas del relieve.

**Georreferenciar.** Consiste en la transformación de imágenes u objetos gráficos localizados en un plan de conformidad geométrica con la realidad, a un sistema de coordenadas y datum determinados, con el fin de dar validez cartográfica a los valores digitales del objeto y así poder realizar estudios de distancias, volúmenes y/o superficie.

**Hidrología isotópica.** Es una técnica nuclear que utiliza isótopos estables y radiactivos existentes en el medio ambiente –tanto de origen natural como artificial- para caracterizar el comportamiento dinámico del agua en el ciclo hidrológico o en aquellos procesos de la ingeniería en los cuales se le utiliza. Los isótopos ambientales del hidrógeno y del oxígeno, incorporados de manera natural en las moléculas del agua, pueden utilizarse para investigar la naturaleza de los recursos hídricos.

**Hidrosfera.** Es una de las capas fluidas que envuelven la tierra. Está constituida por agua en sus diferentes estados.

**Incoetánea.** Que no coincide en edad, plazo o tiempo con otro.

**Lixiviación.** Proceso en el que un disolvente líquido se pone en contacto con un sólido pulverizado para que se produzca la disolución de uno de los componentes del sólido.

**Microcuenca.** Cuenca pequeña, por lo general menor de 6 mil hectáreas, que se delimita considerando la cartografía Hidrológica de Aguas superficiales del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), escala 1:250,000; se hace referencia con base en la nomenclatura de Región Hidrológica, Cuenca y Subcuenca, y se denomina de acuerdo con la clasificación nacional de microcuencas o con el nombre de la corriente principal que la drena.

**Monoscópica.** Proceso de extracción de información digital mediante el cual los elementos son digitalizados sobre imágenes desplegadas directamente en la pantalla de una PC, sin hacer uso de un sistema especial de visualización.

**Morfogenético.** Conjunto de procesos elementales responsables del modelado del relieve que se pueden combinar de forma distinta.

**Orografía.** Parte de la geografía física que trata de la descripción de las montañas o conjunto de montes de una comarca, región, país, etc.

**Ortofoto.** La ortofoto (del Griego *Orthós*. correcto, exacto) es una presentación fotográfica de una zona en la superficie terrestre, donde todos los elementos presentan la misma escala, libre de errores y deformaciones, con la misma validez de un plano cartográfico. También se dice que es una imagen corregida geoméricamente trasladándole de una proyección central a una proyección ortogonal y referida dentro de un marco cartográfico.

**Orto-rectificación.** Es un proceso computacional por el que se eliminan de las imágenes las distorsiones horizontales y verticales principalmente debidas al relieve. Este proceso mejora de forma espectacular la calidad y utilidad de la imagen porque le otorga las mismas cualidades que posee un mapa.

**Paleoclima.** Reconstrucción del clima que prevaleció antes de que se tuvieran las tecnologías para su registro y análisis.

**Pedología.** Ciencia que estudia las características químicas, físicas y biológicas del suelo y, los procesos evolutivos modificados por el tiempo, igualmente estudia su distribución geográfica y su aptitud a la limitación en su uso.

**Perenne.** Son aquellas plantas que viven durante varias temporadas (más de dos años).

**Píxel.** La parte más pequeña de la pantalla del monitor es un punto cuadrado o rectangular que recibe el nombre de píxel. La palabra píxel surge de la combinación de dos palabras inglesas comunes, picture (imagen) y element (elemento). Un píxel se describe de forma más correcta como una unidad lógica, y no física, ya que el tamaño físico de un píxel individual lo determina el fabricante del monitor. El tamaño de un píxel se mide en milímetros (mm).

**Proxy.** Sistemas naturales que dependen del clima, que estuvieron presentes en el pasado y aún existen, por lo que se puede derivar información paleoclimática de ellos.

**Región hidrológica.** Porción de territorio en el que se encuentran aguas superficiales (ríos).

**Remanentes.** Residuo o reserva de una cosa.

**Resolución radiométrica.** Se refiere al número de niveles digitales utilizados para expresar los datos recogidos por un sensor. En general, cuando mayor es el número de niveles mayor es el detalle con que se podrá expresar dicha información.

**Rumbo.** Dirección considerada en el plano del horizonte, y principalmente cualquiera de las comprendidas en la rosa de los vientos. Precisamente la palabra procede del latín *rhombus* (rombo), que son las formas geométricas que unidas señalan las diferentes direcciones posibles en la rosa de los vientos.

**Salinidad.** Contenido de sal disuelta en un cuerpo de agua o en el suelo.

**Sedimento.** Tipo de material sólido acumulado sobre la superficie terrestre que se forma a lo largo de un lago. Es un material sólido, acumulado sobre la superficie terrestre, derivado de las acciones de fenómenos y procesos que actúan en la atmósfera, en la hidrosfera y en la biosfera.

**Semiestabulada.** Sistema de crianza de ganado en el cual los animales se alimentan tanto en establo como con pastoreo.

**Sensor multiespectral.** Recogen simultáneamente datos de diferentes bandas espectrales. Las mediciones sobre diferentes zonas del espectro electromagnético, aportan una amplia información sobre distintos aspectos del medio ambiente. Por ejemplo, la radiación ultravioleta se utiliza para monitorizar los niveles de ozono en las capas altas de la atmósfera. Las bandas visible e infrarrojas permiten determinar la salud de la cubierta vegetal (cultivos, bosques). Los captadores sensibles a la radiación infrarroja térmica sirven para determinar la temperatura del suelo, de las nubes, y de la superficie de los mares.

**Sensores remotos.** Son sistemas de adquisición de información de la superficie terrestre, soportados sobre diferentes tipos de plataformas (terrestres, aéreas o satelitales), funcionan a través de la captura de la energía reflejada o radiada por la superficie, ya sea emitida por el sol (sensores pasivos) o por el mismo sensor (sensores activos). Los productos que se obtienen al emplear estas herramientas son diversos y de diferentes especificaciones, entre ellos los más conocidos son las fotografías aéreas y las imágenes de satélite. Los datos obtenidos se emplean como herramientas en las ciencias sociales, naturales, en la planeación, entre otros.

**Silvicultura.** Ciencia destinada a la formación y cultivo de los bosques.

**Sodicidad.** Cantidad de sodio presente en el suelo, agua o cualquier otra sustancia.

**Somero.** Ligero, superficial, casi encima o muy inmediato a la superficie.

**Subcuencas.** Cada uno de los cauces importantes tiene corrientes alimentadoras que se forman con las precipitaciones que caen sobre sus propios territorios de drenaje a las que se les llama subcuencas.

**Sustentabilidad ambiental.** Se refiere a la administración eficiente y racional de los recursos naturales, de manera tal que sea posible mejorar el bienestar de la población actual sin comprometer la calidad de vida de las generaciones futuras.

**Unidad geohidrológica.** Material (roca o suelo) o conjunto de materiales, cuyas características fisicoquímicas les permiten, en diferente grado, almacenar y transmitir el agua subterránea.

**Vertiente.** Declive de una montaña o conjunto de declives en una cordillera por donde corren las corrientes de agua de algunos ríos que van a desembocar al mar, lagos, lagunas u otros ríos.





Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

## Centros Nacionales de Investigación Disciplinaria, Centros de Investigación Regional y Campos Experimentales



- Sede de Centro de Investigación Regional
- Centro Nacional de Investigación Disciplinaria
- Campo Experimental

## **Comité Editorial del CENID-RASPA**

**Presidente:** Dr. José Antonio Cueto Wong

**Secretario:** Dr. Miguel A. Velásquez Valle

**Vocales:** Dr. Juan Estrada Ávalos  
M. C. Miguel Rivera González

### **Revisores Técnicos**

Dr. Rodolfo Jasso Ibarra

Dr. Miguel A. Velásquez Valle

### **Edición y diseño:**

M. C. Aleida Hernández Antúnez

Ing. Alan J. Servín Prieto

Lic. Leticia Zamora Téllez

La presente publicación se terminó de imprimir en Diciembre de 2010 en la imprenta Carmona, Impresores. Calzada Lázaro Cárdenas No. 850, Col. Eduardo Guerra, Torreón, Coahuila.

Su tiraje fue de 500 ejemplares

**CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA  
RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA**

**DR. JOSÉ ANTONIO CUETO WONG**

Director

**ING. ARMANDO ESTRADA GONZÁLEZ**

Jefe de Operación

**LIC. FLOR CARINA ESPINOZA DELGADILLO**

Jefe Administrativo

**PERSONAL INVESTIGADOR**

<b>Investigador</b>	<b>Red de Investigación e Innovación</b>
Catalán Valencia Ernesto Alonso	Modelaje
Cerano Paredes Julián	Servicios Ambientales
Constante García Vicenta	Servicios Ambientales
Estrada Ávalos Juan	Agua y Suelo
González Barrios José Luis	Agua y Suelo
González Cervantes Guillermo	Agua y Suelo
Inzunza Ibarra Marco Antonio	Agua y Suelo
Macías Rodríguez Hilario	Agua y Suelo
Muñoz Villalobos Jesús Arcadio	Agua y Suelo
Potisek Talavera María del Carmen	Agua y Suelo
Rivera González Miguel	Agua y Suelo
Román López Abel	Agua y Suelo
Sánchez Cohen Ignacio	Agua y Suelo
Trucíos Cacicano Ramón	Agua y Suelo
Valenzuela Núñez Luis Manuel	Servicios Ambientales
Velásquez Valle Miguel Agustín	Modelaje
Villa Castorena María Magdalena	Agua y suelo
Villanueva Díaz José	Servicios Ambientales



[www.gobiernofederal.gob.mx](http://www.gobiernofederal.gob.mx)  
[www.sagarpa.gob.mx](http://www.sagarpa.gob.mx)  
[www.inifap.gob.mx](http://www.inifap.gob.mx)  
[www.bicentenario.gob.mx](http://www.bicentenario.gob.mx)