

CRITERIOS PARA DETERMINAR ÁREAS POTENCIALES PARA IMPLEMENTAR PROYECTOS DE RECARGA DE ACUÍFEROS: MIXTECA-TEHUACÁN-SIERRA NEGRA, MÉXICO

- Finlandia Barbosa-Moreno • Ignacio Sánchez-Cohen • Gabriel Díaz-Padilla • Sergio Orozco-Cirilo • Martín Gómez-Cárdenas • Rafael Alberto Guajardo-Panes • Verónica Mariles-Flores • Rafael Ariza-Flores •

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Resumen

En los municipios con alta marginación de las regiones de la Mixteca-Tehuacán-Sierra Negra, Puebla, la falta de agua es el principal problema que ha provocado la migración permanente de la población. La escasez en la realización de trabajos básicos en planeación territorial ha sido el principal obstáculo en la solución de esta problemática, tomando en cuenta como alternativa de solución la recarga natural de acuíferos. La recarga natural, como su nombre lo indica, se da en condiciones naturales; una forma de incrementar la disponibilidad del agua es mediante la implementación de proyectos de recarga, también llamada recarga artificial. La definición de áreas potenciales de recarga natural incluye diferentes factores, tanto a nivel superficial como subsuperficial; en éstos destacan los aspectos técnico, social, económico y ambiental. Por la complejidad del proceso, se requiere categorizar y agrupar los elementos que abarquen los aspectos anteriores, para que a partir de un estudio geográfico sirva como un mecanismo útil en el desarrollo de la ubicación, diseño y construcción de obras orientadas a resolver el problema de abastecimiento de agua en las regiones, las cuales representan una gran porción de las zonas semiáridas del país. El presente estudio se realizó en 2009, con el objetivo de definir criterios técnicos para evaluar las alternativas en la determinación de las áreas preliminares de recarga; estas alternativas fueron las siguientes: producción de agua de escorrentía, superficie de degradación extrema del suelo, extensión territorial, índice de marginación, densidad de población, cercanía a poblaciones, localidades dentro del límite de la microcuenca y vías de acceso, con base en una categorización estadística combinatoria. Los estudios precisaron como áreas regionales representativas de trabajo 11 microcuencas piloto, aptas para el desarrollo de obras, después de un análisis de 224.

Palabras clave: captación de agua, áreas potenciales de recarga, obras.

Introducción

En el estado de Puebla, México, escurren 5 mil millones de m³ de agua por año que no se aprovechan. En la región sur, la precipitación se concentra en los meses de junio a octubre en un 75.3%, donde se pierde por escorrentía y evapotranspiración la mayor parte del agua de lluvia, esta última ocasiona desastres para la población aguas abajo de la cuenca. Tal distribución, aunada a que los ochenta mu-

nicipios que presentan los mayores índices de sequía recurrentes (GEP, 2008) se localizan en la región de la Mixteca y Tehuacán-Sierra Negra, pone en evidencia el problema del agua (Granados *et al.*, 2005). Las diferentes instituciones encargadas de la regulación, gestión y distribución del agua en la entidad, y que están involucradas en solucionar esta problemática, se han visto en la necesidad de tomar acciones correctivas; una de ellas es establecer un sistema de infraestructura hidráulica, que permita el

abastecimiento de agua para usos prioritarios de la población en el ámbito local. Para esto son necesarios estudios de base (Carrera y Gaskin, 2008), que indiquen de manera precisa la localización geográfica en el espacio de obras destinadas a la captación de agua superficial, como un primer modelo piloto para diseñar a futuro la infraestructura hidráulica. Con antecedente de lo anterior, se realizó la presente investigación en las regiones de la Mixteca y Tehuacán-Sierra del estado de Puebla (figura 1), donde se definieron los criterios técnicos para determinar áreas de recarga de agua en la región, mediante multiplicación de polígonos, seguido de un análisis detallado en el nivel de microcuenca.

La recarga natural en los acuíferos es importante en las zonas semiáridas y aunque es difícil cuantificarla porque intervienen diversos factores (Martínez y Andreu, 2010), es el único recurso de fácil acceso y disponibilidad de agua en poblaciones rurales; consiste en la captación de agua superficial que proviene de una fracción de la precipitación y flujos de agua permanentes o temporales ubicados en la superficie o subsuperficie, que contribuyen a la conservación y el aprovechamiento sustentable del agua (Pérez, 2003).

Un criterio en este estudio se define como aquel elemento (técnico o social) necesario para delimitar y ubicar de manera geográfica un área potencial de recarga de agua superficial

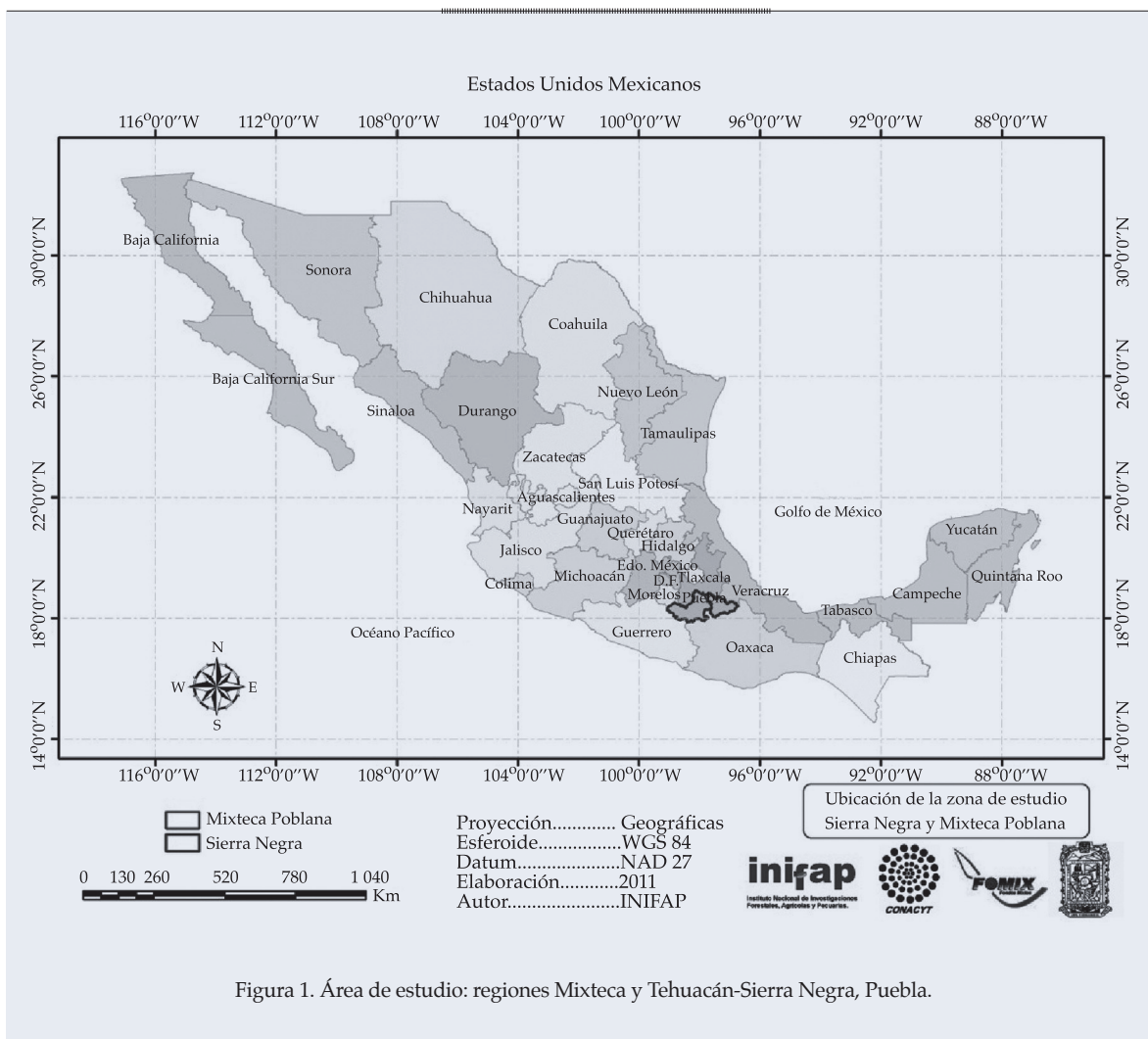


Figura 1. Área de estudio: regiones Mixteca y Tehuacán-Sierra Negra, Puebla.

y en consecuencia subsuperficial, y que interviene de manera directa e indirecta en el sistema acuífero. Los criterios principales para determinar la potencialidad de un área de recarga de agua del tipo natural con el uso de los SIG son los siguientes: pendiente (Chowdhury *et al.*, 2010; Matus *et al.*, 2008), textura del suelo (Hamadi *et al.*, 2007), uso del suelo (Singhal *et al.*, 2010; Erickson, 2009), escorrentía, geología (Zarkesh *et al.*, 2008), clima (Yeh *et al.*, 2009; Bhuiyan *et al.*, 2009) y densidad de drenaje (Ritesh *et al.*, 2009). La principal deficiencia en éstos es que no se toma en cuenta el factor social, ya que son estudios técnicos que sugieren recomendaciones con base en recarga artificial, o estudios específicos en zonas de inundación o de estratos rocosos. Todos definidos en regiones áridas y semiáridas.

El impacto del presente estudio consiste en contribuir a una primera parte de un proceso metodológico estándar para la delimitación geográfica de áreas potenciales de recarga natural de agua, aplicable a regiones semiáridas del país, donde el abastecimiento de agua es uno de los principales problemas. El objetivo del presente trabajo fue determinar los criterios técnicos y sociales que más influyen en la zona de estudio para la definición de áreas potenciales de recarga natural a dos niveles: a escala regional 1:250 000 y microcuenca.

Metodología

Área de estudio

Las regiones de estudio se encuentran al sur del estado de Puebla, México, entre los meridianos 99°05'24" y 96°42'00" de longitud oeste y los paralelos 19°05'24" y 17°46'48" de latitud norte, y se denominan las regiones de la Mixteca y de Tehuacán-Sierra Negra. La primera se ubica en la zona suroeste del estado y se conforma por 62 municipios, con una extensión cercana a las 910 mil hectáreas; y la segunda se encuentra al sureste del estado, compuesta por 27 municipios, con una extensión territorial aproximada de 477 mil hectáreas.

Esta investigación se hizo en dos momentos: uno considerando las características del medio físico regional y con una escala cartográfica de 1:250 000. Con base en esta información se procedió a determinar en una escala más detallada (nivel de microcuenca), cuáles fueron los principales factores de mayor influencia en el área de estudio, para determinar de manera precisa las zonas de recarga natural de agua superficial, a fin de ubicar las futuras obras de conservación de suelo y captación de agua.

Definición de criterios

El criterio central para seleccionar las áreas potenciales de recarga consistió en asumir que se deben ubicar lugares de intercepción de los escorrentías temporales para reducir la pérdida por corrientes hacia los ríos y aguas abajo de la cuenca, e incrementar la infiltración (Kresic, 2009).

El análisis del medio físico se inició con la fisiografía y la altitud a partir del recorte digital del modelo de elevación digital a escala 1:250 000 de las regiones de estudio (figuras 2 y 3) (INEGI, 1995). Enseguida se hizo una revisión con la variable pendiente, para ubicar de manera preliminar las áreas de "Piedemonte" localizadas en la parte baja de las montañas. A partir del modelo de elevación digital generado se delimitaron y clasificaron los estratos altitudinales de la región de Tehuacán-Sierra Negra, de tal forma que las superficies con altitudes de 0 a 500 y de 2 100 a 3 300 msnm son estratos de potencial bajo; mientras que de 500 a 2 100 msnm son de potencial alto. Para la Mixteca se seleccionaron los intervalos de altitud de 500 a 1 300 msnm como de potencial alto y de 1 700 a 2 900 msnm de bajo potencial.

Se realizó un análisis de la multiplicación de los polígonos representativos de las variables. Los polígonos son unidades espaciales homogéneas que no tienen un tamaño o características específicas, estrato altitudinal (de alta y baja prioridad) y pendiente, con el cual se

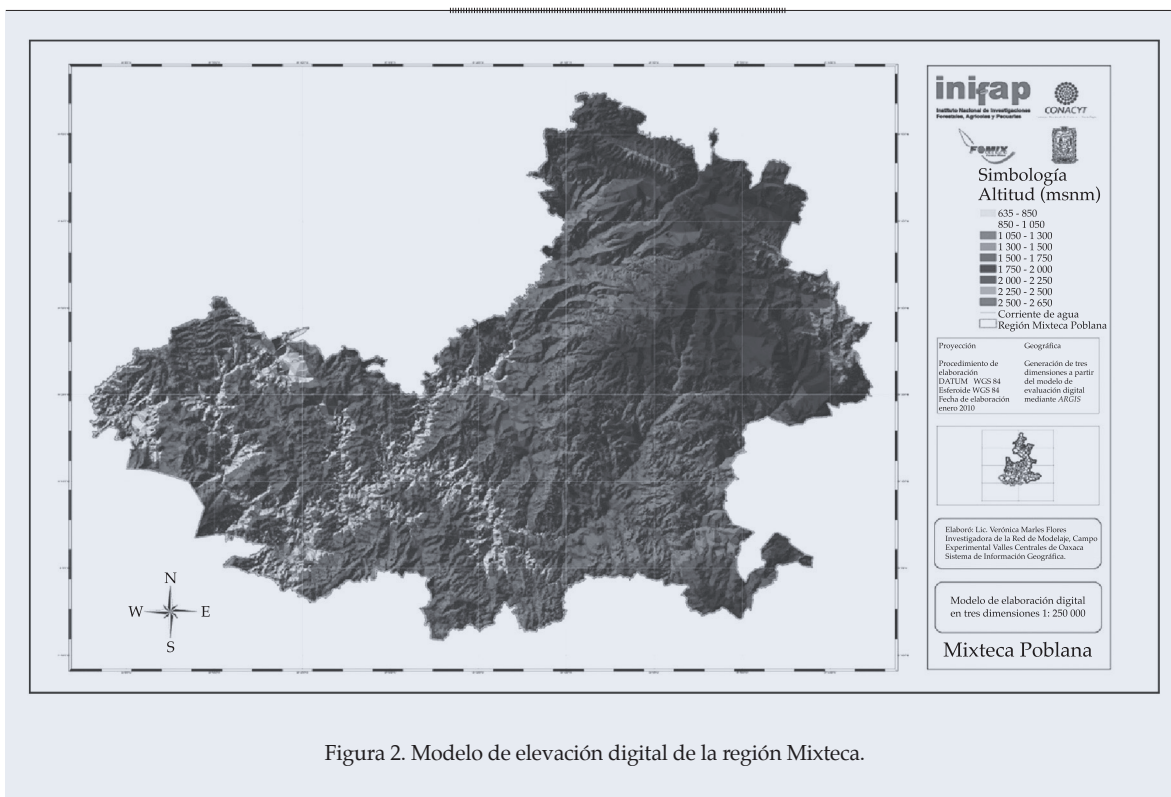


Figura 2. Modelo de elevación digital de la región Mixteca.

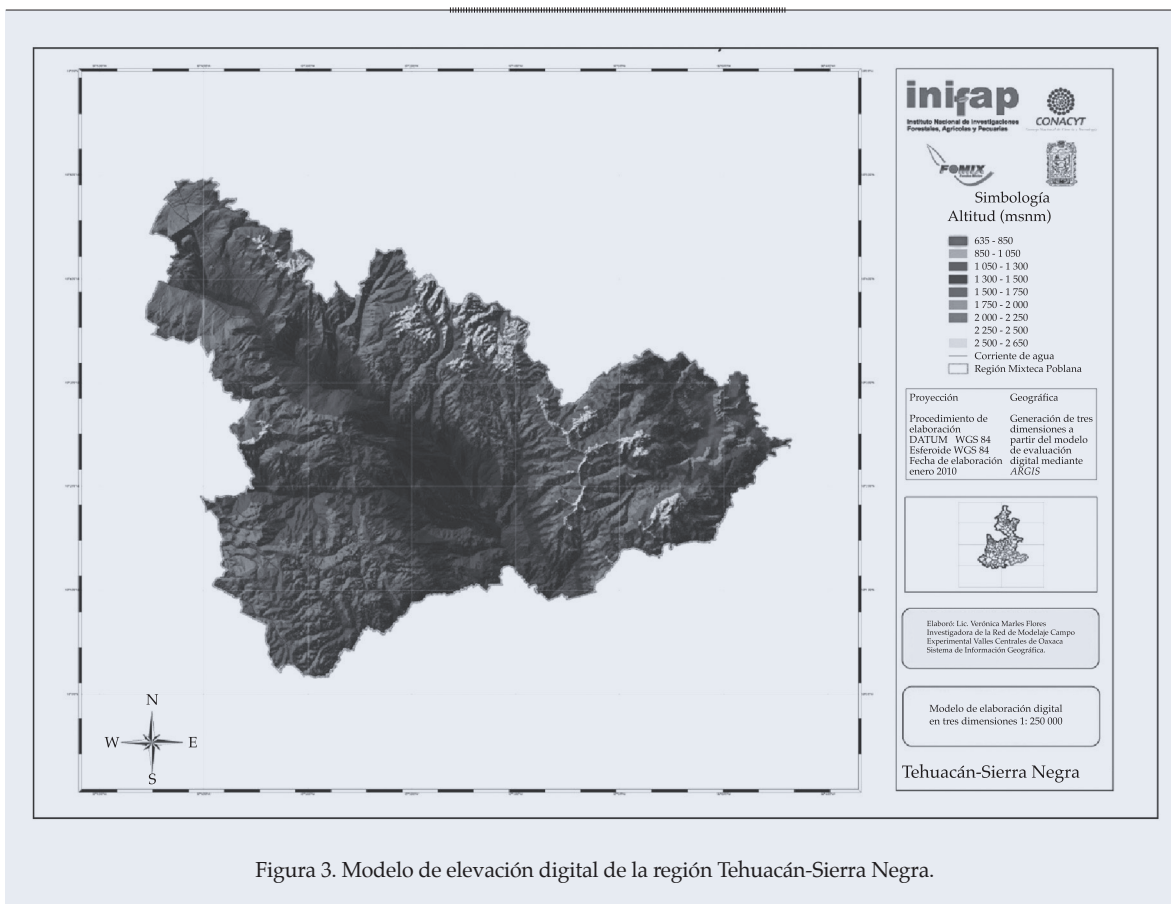


Figura 3. Modelo de elevación digital de la región Tehuacán-Sierra Negra.

generó la clasificación de las pendientes del suelo, de tal manera que áreas con pendientes entre 0 y 8% y las mayores de 30%, se consideraron con potencial bajo, y las áreas con pendiente entre 8 y 30% son consideradas de alto potencial de recarga. Los intervalos fueron generados con base en la determinación de estratos altitudinales, ubicando de esta manera las áreas de “pie de monte” (Lu *et al.*, 2007); a su vez, éstos se reclasificaron con valores de 1 (potencial bajo) y 2 (potencial alto) mediante el uso de *ARCINFO*, el cual es un *software* desarrollado por ESRI (Economic and Social Research Institute).

Las áreas potenciales de recarga de ambas regiones se determinaron a partir de los polígonos, que mostraron las numeraciones mayores, producto de su multiplicación algebraica. El procesamiento digital de delimitación, clasificación y reclasificación de áreas son similares a los descritos por Mariles *et al.* (2009).

Criterios en el nivel de microcuenca

Las áreas potenciales definidas regionalmente precisaron la superficie potencial para recargar agua; sin embargo, para efectos de planeación, fue necesario hacer un segundo estudio a una escala menor. Para esto se tomó como unidad básica la microcuenca.

Altitud

Con base en la información cartográfica y modelación geoespacial por medio de los SIG (Sistema de Información Geográfica), se delimitaron flujos de agua transversal, tomando en cuenta como área de captación las superficies de baja altitud; al mismo tiempo se identificaron los principales sistemas hídricos. Enseguida fueron delimitadas y caracterizadas las microcuencas; la delimitación consistió en la modelación de microcuencas a diferentes niveles de superficie promedio, con la utilización de las extensiones de análisis geoespacial y análisis hídrico de *ArcView 3.2* (ESRI, 1999), que a través de algoritmos matemáticos evalúa

la topografía del terreno. En este estudio se especificó como superficie mínima de cada unidad 6 000 ha.

El proceso de la generación de microcuencas tiene como base el uso del MED (Modelo de Elevación Digital), con resolución de un dato cada 90 m (INEGI, 1995), al cual se aplica el proceso metodológico descrito por Maidment y Djokic (2000).

Para clasificar las microcuencas delimitadas se consideró como criterio de entrada la altitud promedio y se formaron tres grupos: zona alta, con altitud promedio mayor a los 1 500 msnm; zona intermedia, con altitud promedio entre los 1 000 y 1 500 msnm, y zona baja, con altitud promedio menor a los 1 000 msnm.

Escorrentía

El segundo criterio fue determinar la escorrentía en cada microcuenca con base en la metodología propuesta por Treviño *et al.* (2002), la cual considera un modelo digital de pendientes, coberturas edafológicas y uso de suelo para estimar el volumen medio escurrido mediante la siguiente ecuación:

$$Vm = (Cep) (A) (Pp) \quad (1)$$

donde Vm es el volumen medio escurrido; Cep , el coeficiente de escorrentía ponderado; Pp , la precipitación pluvial media anual, y A es la superficie de la cuenca en kilómetros cuadrados.

Los coeficientes de escorrentía considerados en el estudio fueron los de Prevert (Treviño *et al.*, 2002). Es importante definir la escala temporal a la que son aplicables dichos coeficientes.

Para contar con datos continuos de la precipitación media anual acumulada histórica de la región fue necesario realizar un proceso de interpolación de datos puntuales del estado de Puebla (Díaz *et al.*, 2007) y con base en la metodología TPSS (Thin Plate Smoothing Spline) se generó una malla continua de

valores de precipitación de acuerdo con las características del terreno.

El proceso cartográfico para la estimación de la escorrentía se realizó mediante el apoyo de los SIG *ArcView* 3.2 (ESRI, 1999) e IDRISI (Clark Labs, 1999). En este proceso fueron considerados y representados tres criterios adicionales: pendiente, textura y uso del suelo, los que se obtuvieron a partir del modelo de pendientes generado por INEGI (1995) (90 m resolución) y la transformación de información vectorial de texturas (INEGI, 2004) y el Inventario Nacional Forestal (Semarnat, 2001) a modelos raster.

Se reclasificaron los coeficientes de Prevert con la multiplicación del mapa obtenido de escorrentía y el generado para el continuo de precipitación, a fin de obtener metros cúbicos por píxel. Con base en la delimitación de las microcuencas, se sumaron los valores de los píxeles contenidos en cada microcuenca para cuantificar la cantidad de escorrentía anual, expresada en metros cúbicos de cada una de ellas.

Degradación del suelo

Al considerar que la degradación del suelo está relacionada directamente con la producción o cosecha de agua a través de la erosión hídrica, en combinación con la vegetación (Brissio, 2005), se sobrepuso la capa de degradación de suelo realizado por la Semarnat (2008) y se determinó el grado de degradación de las microcuencas al tomar en cuenta el uso actual del suelo, seleccionando las áreas de degradación con categoría de extrema.

Selección de criterios para microcuencas tipo

A este nivel se han definido solamente criterios técnicos. Para categorizar a un grado más detallado fue necesario tomar en cuenta para las cuencas delimitadas en cada región los criterios de tipo social: índice de marginación y densidad poblacional, que son los que determinaron la atención prioritaria a las comunidades

rurales de las regiones afectadas por la falta de agua. Con base en la degradación extrema del suelo, producción de agua y extensión de la microcuenca, resultaron a) cinco tipos de microcuencas en cada región; b) de los índices de marginación resultaron tres categorías, y c) de la densidad poblacional, cinco clases.

Mediante una técnica combinatoria (Conapo, 2005) para las tres categorías anteriores (a, b y c) se obtuvieron 45 combinaciones finales, con éstas se inició el proceso de priorización para la selección de las microcuencas, que necesitan urgentemente un manejo integral. Como últimos criterios se tomó en cuenta la cercanía a poblaciones, localidades dentro del límite de la microcuenca y vías de acceso.

Criterios técnicos del medio físico

Altitud y pendiente

Las altitudes de la Mixteca poblana varían desde los 635 hasta 2 650 msnm, aunque la mayor parte de la región está por debajo de los 1 000 msnm, mientras que al noreste de la región se registran altitudes mayores de 1 500 msnm. La región es de topografía accidentada, conformada de formaciones montañosas de mediana altitud y lomeríos disectados por cañadas, formadas a su vez por corrientes temporales durante la estación lluviosa. La representación gráfica de cerca del 90% del área indica la presencia de erosión intensa, continua e histórica. La pendiente es diversa, las zonas con el 3% o de pendiente suave forman parte de cerca del 20% de la superficie total regional, mientras que el resto de la superficie es mayor al 15%.

En la región Tehuacán-Sierra Negra predominan las altitudes mayores a los 1 450 msnm y elevaciones por arriba de los 2 800 m. Las porciones elevadas constituyen la Sierra Negra y las altitudes menores de 1 450 msnm conforman el fondo del Valle de Tehuacán y una pequeña fracción del oriente de la Sierra Negra. El valle desciende 1 000 m de su punta noroeste a su extremo en el sureste (de 2 100 a

1 100 msnm); en éste confluyen las escorrentías de la Sierra Negra en su margen noreste y suroeste. Las pendientes que predominan son las mayores al 15% y el área regional es de topografía accidentada, con excepción del valle.

Hidrología

La región Mixteca pertenece a la región hidrológica 18, "Balsas", y a la cuenca del mismo nombre. Las subcuencas más importantes son las del río Acatlán y río Atoyac, seguidas de las del río Mixteco y río Nexapa, de los cuales se derivan corrientes de alta densidad de drenaje secundario (figura 4). La región Tehuacán-Sierra Negra se encuentra en la región hidrológica 28 o "Papaloapan" y pertenece a la cuenca del mismo nombre. Las subcuencas importantes son las del río Salado y río Petlapa; la primera da lugar a la formación del Valle de Tehuacán, éstas son seguidas de las del río

Acatlán y del río Blanco. La distribución de aprovechamientos de agua es de la siguiente manera: en la parte de la sierra se tienen los manantiales y en la parte del valle, pozos de extracción de agua (figura 5).

Geología

El material parental que predomina en la Mixteca es el metamórfico de la era Paleozoica, conformado principalmente por esquistos y rocas meta-sedimentarias de periodos menos primitivos; las primeras abarcan zonas del centro-este y sur, mientras que las últimas son abundantes en la parte centro-oeste. En zonas de altitud media a elevada se tienen rocas ígneas intrusivas, como andesita, y en áreas de pendiente baja, la roca caliza de origen sedimentario reciente. Para la zona septentrional se ubican las formaciones de origen metamórfico del Precámbrico y esquistos de origen sedimentario (figura 6).

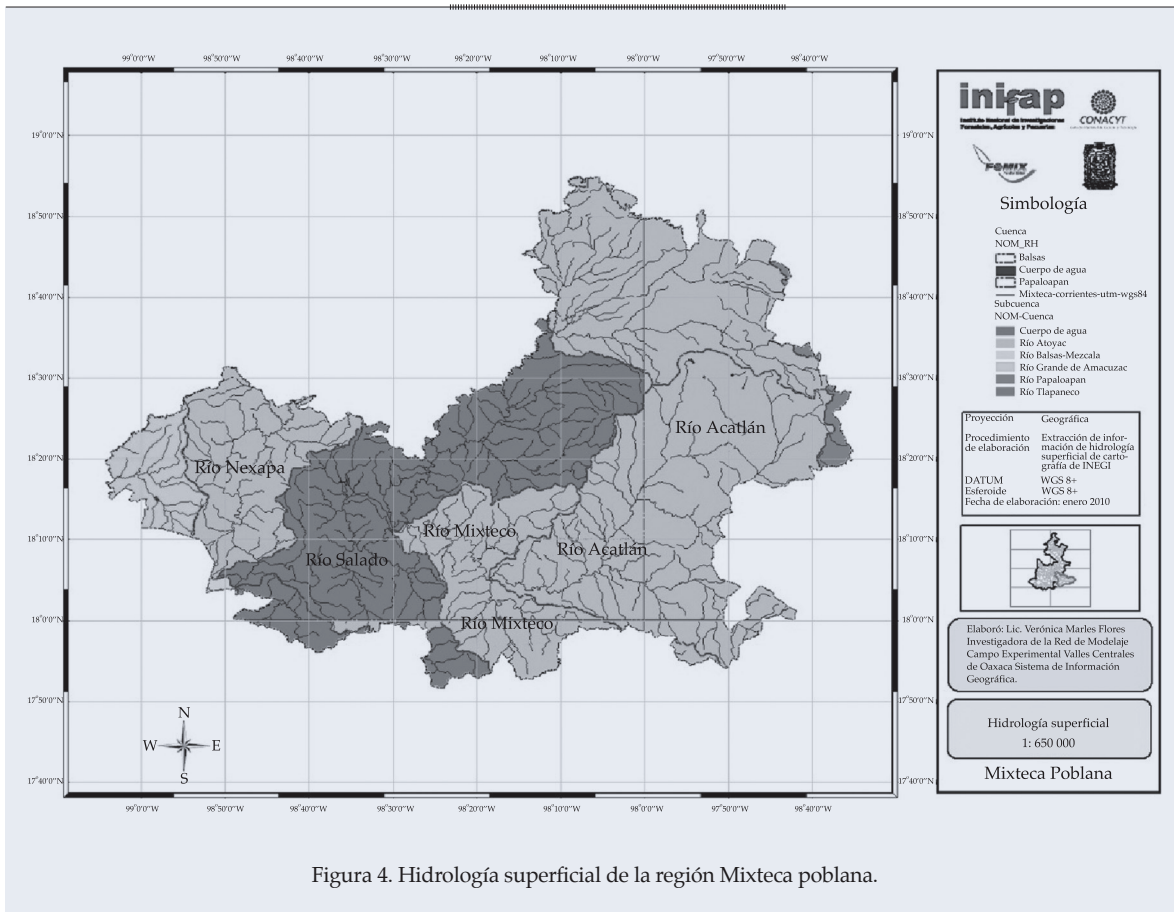


Figura 4. Hidrología superficial de la región Mixteca poblana.

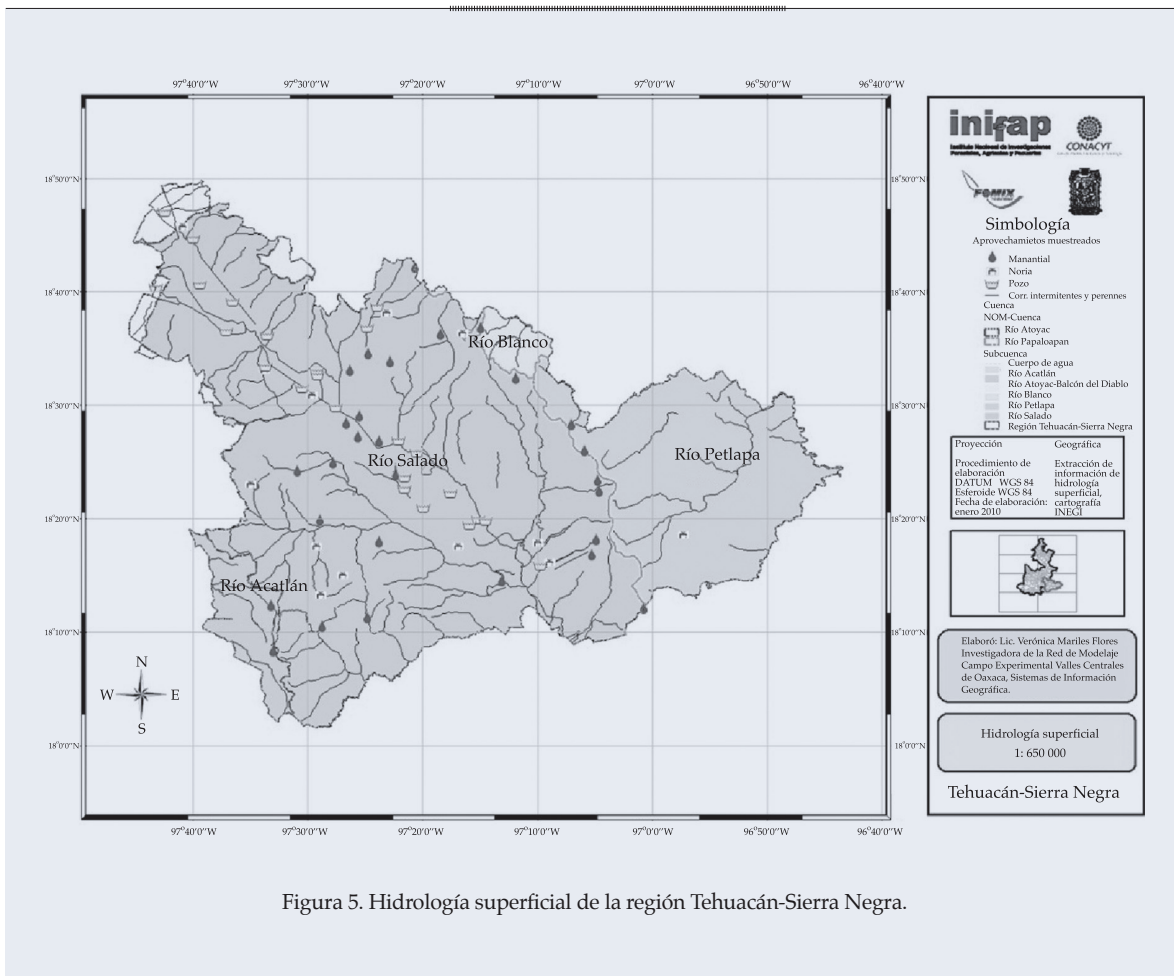


Figura 5. Hidrología superficial de la región Tehuacán-Sierra Negra.

Por el contrario, en la región de Tehuacán-Sierra Negra, en la zona de mayores altitudes existen materiales de formación sedimentaria, que incluyen calizas y lutitas; las cataclitas y algunos materiales como los basaltos y areniscas se encuentran en menor proporción, mientras que en el fondo del valle destaca la presencia de depósitos aluviales (figura 7).

Edafología

La mayor parte del área de la Mixteca está cubierta por suelos de poco desarrollo, de la clase de los regosoles, seguidos por los litosoles y una pequeña parte de feozem y rendzinas en zonas de baja pendiente. Para la región de Tehuacán-Sierra Negra ocurre de manera

similar, pero con distribución diferente; en la dirección NW a SE del valle se localizan los vertisoles pélicos; mientras que los litosoles son los que cubren la mayor superficie de los márgenes verticales paralelos al valle. El área de la sierra tiene predominantemente luvisoles crómicos y órticos, seguidos de cambisoles dístricos y feozem háplico.

Cubierta vegetal

En ambas regiones, la vegetación predominante es la selva baja caducifolia; la zona correspondiente al valle son áreas agrícolas, y la zona con altitudes mayores corresponde al ecosistema de bosque (pino-encino, pino y mesófilo de montaña) y selva (perennifolia y subcaducifolia).

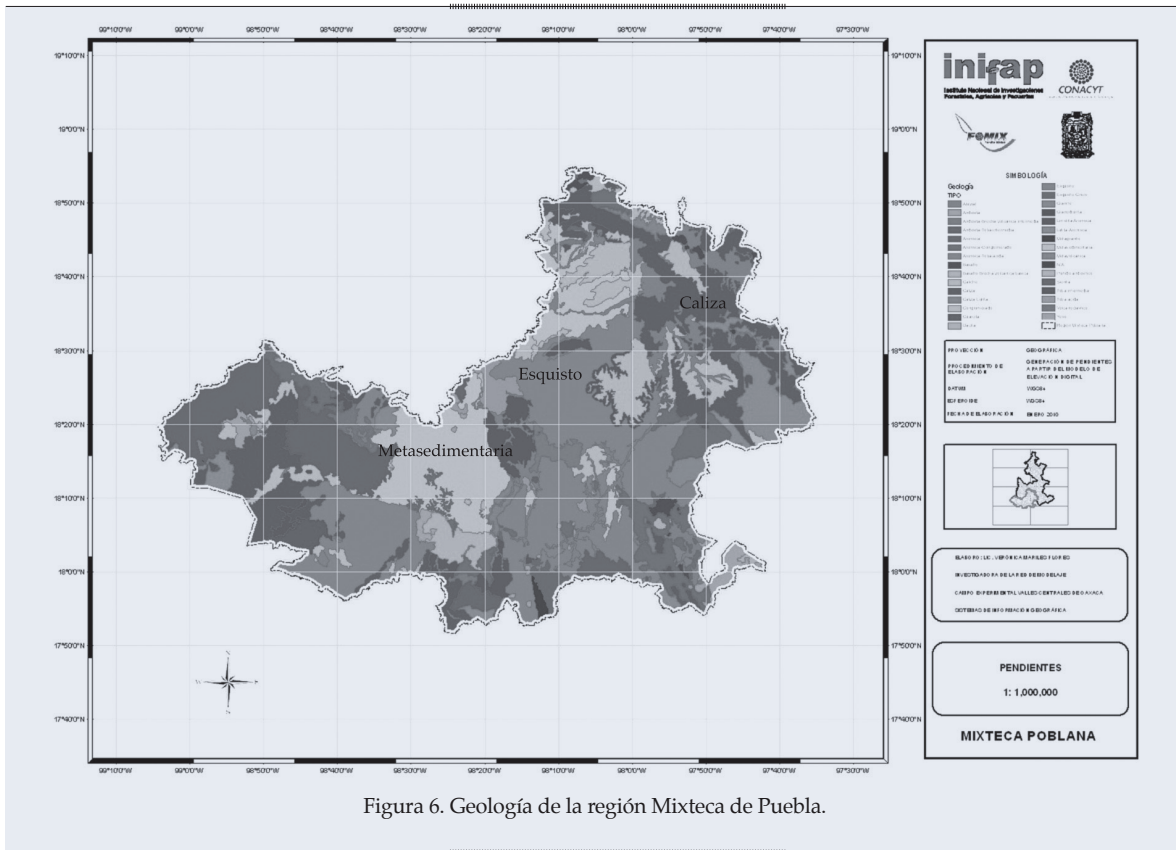


Figura 6. Geología de la región Mixteca de Puebla.

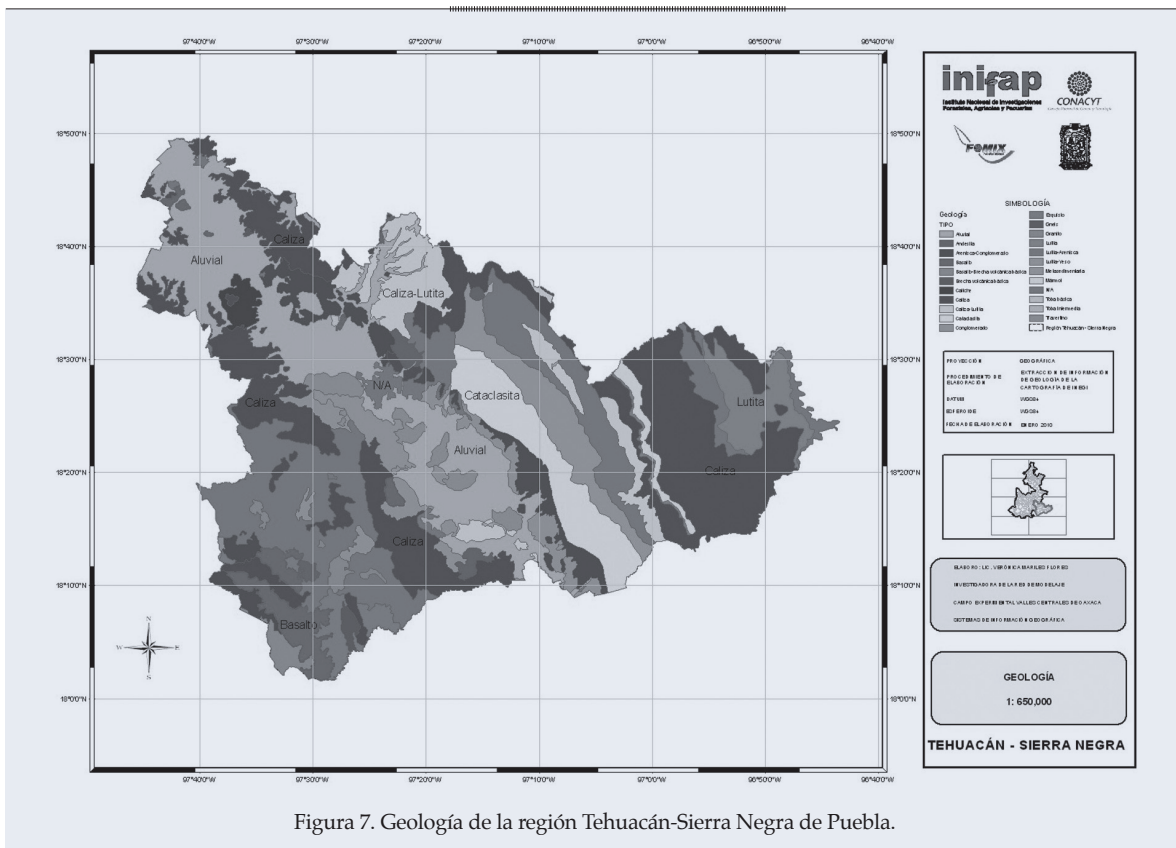


Figura 7. Geología de la región Tehuacán-Sierra Negra de Puebla.

Precipitación

En la región de la Mixteca se tiene una precipitación promedio anual de entre 800 y 900 mm en la parte oeste de la región, mientras que en el norte y este, los valores disminuyen hasta cerca de 400 mm. En la región de Tehuacán-Sierra Negra, la precipitación varía entre los 400 y 900 mm en el oeste de la región (Granados et al., 2005), mientras que hacia el este ocurren lluvias mayores de 3 000 mm. Como se aprecia, la precipitación es muy variable, por lo que la recarga de acuíferos se ve afectada en la mayor parte de ambas regiones. Los acuíferos que se localizan en el área de estudio de acuerdo con Conagua (2007) son Atlixco-Izúcar de Matamoros e Ixcaquixtla para la región Mixteca, y el del Valle de Tehuacán para la región de Tehuacán-Sierra Negra.

Resultados y discusión

El producto de un primer análisis de criterios técnicos regional y en escala 1:250 000 fueron los mapas de las figuras 8 y 9.

Criterios técnicos y sociales en el nivel de microcuenca

Altitud

En el área de estudio se calificaron 11 microcuencas de zona baja de recepción de agua (menor a 1 000 msnm), 99 en zona intermedia o de transporte (1 000 a 1 500 msnm) y 114 en zona alta (mayor a 1 500 msnm). Las microcuencas más importantes son las de baja recepción, ya que las de los otros dos grupos se encuentran en la fase de escurrimiento

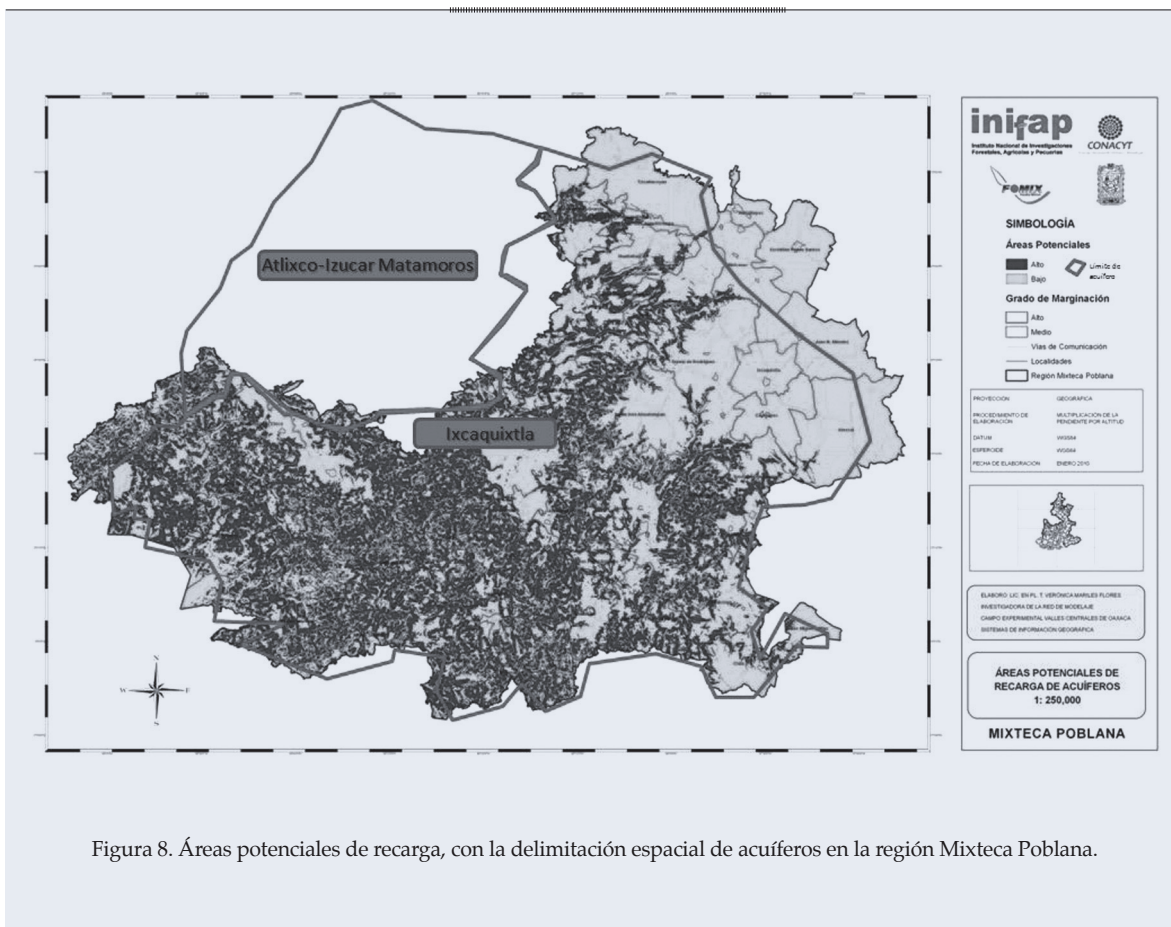


Figura 8. Áreas potenciales de recarga, con la delimitación espacial de acuíferos en la región Mixteca Poblana.

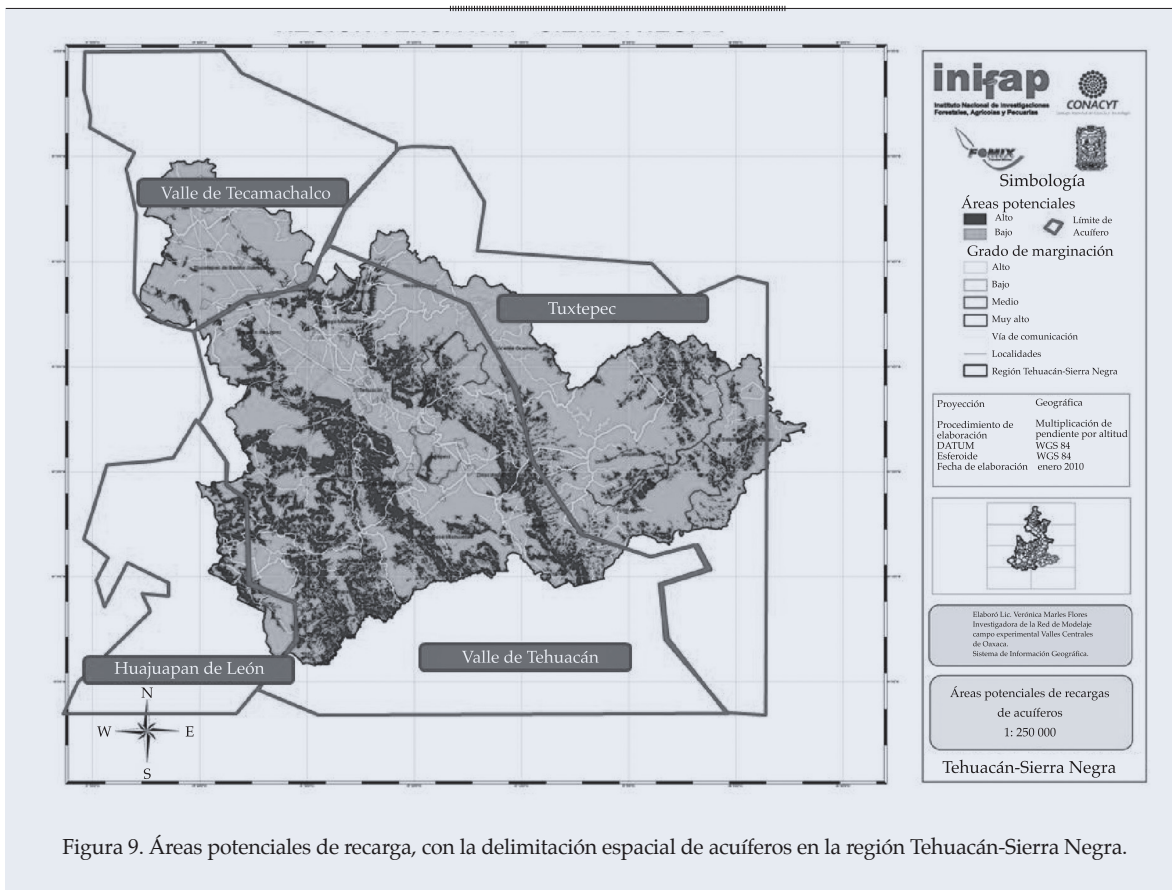


Figura 9. Áreas potenciales de recarga, con la delimitación espacial de acuíferos en la región Tehuacán-Sierra Negra.

y transporte del flujo de agua, y las primeras en la de captación e infiltración. En estas microcuencas es propicia la recarga natural de acuíferos mediante el establecimiento de obras o proyectos para este fin, porque el objeto de interés no es recarga artificial sino natural. Estas microcuencas se seleccionaron, además de la altitud, por otros criterios, motivo del presente trabajo, y coinciden con un estudio reciente hecho por la Conagua-Puebla para la región de Tehuacán-Sierra Negra, porque para la Mixteca no se han hecho este tipo de estudios.

Escorrentía

La región Mixteca tiene suelos con textura media, mientras que en la región Tehuacán-Sierra Negra existen zonas similares con textura fina, medio y gruesas en áreas reducidas. Las capas temáticas de pendiente, precipitación y uso del suelo para obtener la escorrentía ya se describieron.

En la zona de estudio se obtuvieron valores de escorrentía máxima de 23 070 m³ por píxel (cada 8 100 m²), con lo que se generó una clasificación por intervalo cada 4 000 m³. Se obtuvo un mapa con las estimaciones de escorrentía anual por cada microcuenca; la de mayor registro de escorrentía resultó en 314.50 millones de m³ y en promedio hay un escorrentía anual de 42.741 millones de m³, para el área de ambas regiones. No se han reportado a este nivel estos resultados, sólo es importante destacar que al menos en las regiones hidrológicas a las que pertenece la zona de estudio, se tiene una escorrentía de 16 587 hm³ al año para la región hidrológica Balsas y 50 887 hm³ al año para la del Papaloapan, con 15 y 16 cuencas, respectivamente (Conagua, 2007). En todo el estado de Puebla sólo se localizan cuatro estaciones hidrométricas y el gasto medio anual reportado es muy localizado para el lugar específico donde se encuentra; la escorrentía máxima por píxel es

el valor máximo obtenido para ambas regiones de estudio.

Las escorrentías reportadas son válidas para ambas regiones, porque la Mixteca es una zona de libre alumbramiento; en la de Tehuacán-Sierra Negra se reporta un volumen concesionado por microcuenca. Como se explica en el cuadro 1, éstas no están consideradas en las 11 que se seleccionaron.

Degradación del suelo

Las zonas más degradadas se encuentran en la región oeste y este de la zona de estudio, por los usos de suelo bosque, selva y matorral, y matorral, bosque, así como zonas destinadas al uso agrícola, respectivamente.

La superficie total de degradación del suelo con categoría de extrema en las microcuencas localizadas en el área de estudio es de 1 033 843 ha, por lo que en promedio es de 5 744 ha por microcuenca. Del total, el 20.8% corresponde a zonas agrícolas, 9.3% a bosque, 14.3% a

matorral, 8.8% a pastizal, 39.4% a selva, 1.4% a la zona urbana y 6% a otros usos de suelo.

Análisis combinatorio de criterios

Con el análisis de criterios técnicos a escala 1:250 000 y otros considerados como principales que se usaron para definir áreas potenciales de recarga de agua a nivel microcuenca, resultaban 178 microcuencas de las 45 combinaciones principales, por lo cual se tomaron los criterios ya descritos, y mediante un proceso de categorización, asignación y priorización, y bajo un análisis estadístico de componentes principales (primer componente 31% y segundo componente 19%), se obtuvieron finalmente 11 microcuencas representativas, de las cuales seis corresponden a la región Mixteca y cuatro a la de Tehuacán-Sierra Negra. En estas microcuencas seleccionadas se propondrán obras de recarga y retención de agua superficial con base en el análisis cartográfico descrito (figura 10).

En las 11 microcuencas representativas, de acuerdo con Conagua (2007), la de Ixcaquixtla (1) se ubica dentro del acuífero de Ixcaquixtla, (2) Tepanco, (3) Ajalpan y parte de la microcuenca de (4) Xoxocotla se encuentran ubicadas en los acuíferos del Valle de Tehuacán y Valle de Tecamachalco; la microcuenca que abarca (5) Atzompa y Tlatlauquitepec forma parte de un estrato permeable limitado por los acuíferos del Valle de Tecamachalco y el de Atlixco-Izúcar de Matamoros.

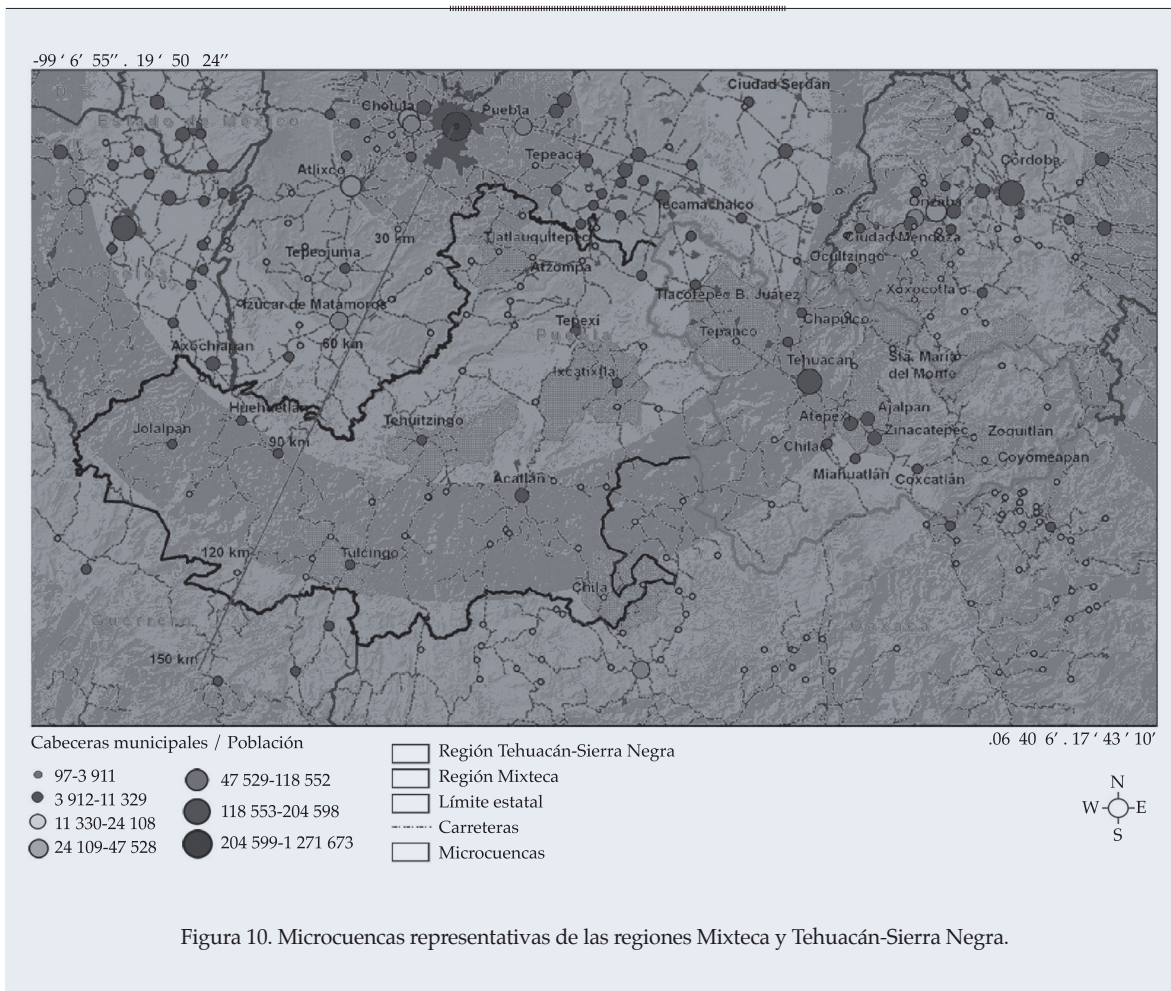
Las microcuencas de (6) Santa María del Monte y (7) Zoquitlán son las principales abastecedoras de agua para el acuífero del Valle de Tehuacán. Las microcuencas de (8) Jolalpan, (9) Tulcingo, (10) Tehuiztzingo y (11) Chila tienen estratos permeables.

En la zona de estudio se han llevado a cabo muchos trabajos de campo para atender el problema de agua (GEP, 2008), en ellos se han gastado recursos económicos y no se ha podido avanzar en alternativas concretas de solución, por lo tanto este estudio será de gran utilidad para futuras acciones, pues se

Cuadro 1. Volumen de agua concesionado.

| Microcuenca | Volumen concesionado (hm ³) |
|-------------|---|
| 1 | 1.28-3.37 |
| 2 | 0.01-0.48 |
| 3 | 1.28-3.37 |
| 4 | 0.84-1.27 |
| 5 | 7.52-35.99 |
| 6 | 3.38-6.66 |
| 7 | 0.49-0.83 |
| 8 | 0.01-0.48 |
| 10 | 7.52-35.99 |
| 11 | 0.01-0.48 |
| 12 | 7.52-35.99 |
| 13 | 36-83.87 |
| 14 | 3.38-6.66 |
| 16 | 6.67-7.51 |
| 17 | 0.84-1.27 |
| 21 | 36-83.87 |
| 22 | 0.84-1.27 |

El número de microcuenca es el asignado por la Conagua (COTAS, 2010).



presenta un análisis mucho más detallado; los demás trabajos están orientados a escalas regionales y con otros fines, como recarga artificial (COTAS, 2010) combate a la erosión de suelos, deforestación y construcción de obras de captación de agua superficial de acuerdo con la iniciativa de la gente que se interese por obtener este beneficio. Por todo lo anterior, el análisis de criterios es una herramienta útil con resultados de los que carecen otros estudios hechos en la región e internacionalmente, ya que la mayoría se orienta a la atención de las metodologías de cuantificación de la recarga con modelación numérica (Cuthbert, 2010) y a la delimitación de áreas potenciales de este tipo de recarga (Chenini y Ben, 2010), y muy pocos consideran al análisis integral de criterios mediante el estudio de la recarga natural tanto

a nivel superficial como subterráneo (Sekar y Randhir, 2006).

Conclusiones

La mayor parte de los trabajos experimentales orientados a la delimitación de zonas potenciales de recarga de acuíferos coinciden en que se requieren estudios más detallados de la zona de estudio. Por lo tanto, en este trabajo se están dando a conocer los principales criterios técnicos y sociales que contribuyen en la delimitación del área potencial de recarga en dos niveles: regional a escala 1:250 000 y a nivel microcuenca, concluyendo que para establecer obras de infraestructura hidráulica, esta es información básica, para ubicarlas de manera geográfica, además es de gran relevancia por

disponer de pocos trabajos en relación con la ubicación geográfica de zonas de recarga natural de acuíferos. Las zonas de recarga natural delimitadas coinciden con las hechas por la Conagua para la región Tehuacán-Sierra Negra, pero para el caso de la Mixteca, esta institución no ha hecho trabajos en el tema.

Los criterios definidos son de naturaleza temporal mientras se trate de otras regiones a analizar, lo cual les confiere la propiedad de poder aplicar esta metodología y ponderarla a regiones con similares características a las de este estudio.

El efecto combinado de los criterios tratados proporcionó un mayor número de unidades de estudio respecto de las iniciales; el cual sirvió para considerar todas las características tipo de cada una de ellas y facilitar el análisis; por ello podemos afirmar que se analizaron todas las características físicas del medio de la región representadas en 11 unidades.

Los principales criterios técnicos y sociales para definir el área potencial de recarga de agua fueron producción de agua, superficie de degradación extrema del suelo, extensión territorial, índice de marginación, densidad de población, cercanía a poblaciones, localidades dentro del límite de la microcuenca y vías de acceso, con base en una categorización y álgebra de mapas.

Los criterios de selección contundentes de determinación fueron los sociales, ya que dirigen el efecto de los técnicos y se presentan como uno de los elementos de origen de la problemática regional. De ambos grupos, los que más influyeron en la delimitación de áreas potenciales de recarga de agua fueron índice de marginación y escorrentía.

Recibido: 09/12/10

Aprobado: 19/9/11

Referencias

BHUIYAN, C., SINGH R.P., and FLUGEL, WA. Modelling of ground water recharge-potential in the hard-rock

Aravalli terrain, India: a GIS approach. *Environmental Earth Sciences*. Vol. 59, No. 4, 2009, pp. 929-938.

BRISSIO, P.A. *Evaluación preliminar del estado de contaminación en suelos de la provincia del Neuquén donde se efectúan actividades de explotación hidrocarburíferas* [en línea]. Disponible en World Wide Web: <http://www.tesis.bioetica.org/pab.htm>, consultado el 15 de enero de 2010.

CARRERA, H.J.J. and GASKIN, S.J. Spatio-temporal analysis of potential aquifer recharge: Application to the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology*. Vol. 353, 2008, pp. 228-246.

CHENINI, I. and BEN, A. Groundwater recharge study in arid region: An approach using GIS techniques and numerical modeling. *Computers & Geosciences*. Vol. 36, 2010, pp. 801-817.

CHOWDHURY, A., JHA, M.K., and CHOWDARY, V.M. Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur district, West Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques. *Environmental Earth Sciences*. Vol. 59, No. 6, 2010, pp. 1209-1222.

CLARK LABS. *Software IDRISI 3.2*. Worcester: Clark Labs, 1999.

CONAGUA. *Estadísticas del agua en México*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2007, 263 pp.

COTAS. *Estudio hidrológico de la Sierra Negra en la vertiente hacia el acuífero del Valle de Tehuacán, Puebla, y de su potencial para la recarga artificial de agua pluvial*. Informe Gerencia Estatal de Puebla Conagua. México, D.F.: Comité Técnico de Aguas Subterráneas Tehuacán, 2010, 71 pp.

CONAPO. *Índices de marginación*. México, D.F.: Secretaría General del Consejo Nacional de Población, 2005, 52 pp.

CUTHBERT, M.O. An improved time series approach for estimating groundwater recharge from groundwater level fluctuations. *Water Resources Research*. Vol. 46, Article No. W09515, 2010.

DÍAZ, P.G., MEDINA, G.G., SILVA, S.M.M. y SERRANO, A.V. *Estadísticas climatológicas básicas del Estado de Puebla (periodo 1961-2003)*. Veracruz, México: INIFAP, CIRGOC, Campo Experimental Cotaxtla, Libro Técnico núm. 15, 2007, 181 pp.

ERICKSON, O. and HEINZ, G.S. Natural Groundwater Recharge Response to Urbanization: Vermillion River Watershed, Minnesota. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 135 No. 6, 2009, pp. 512-520.

ESRI. *Software ArcView GIS 3.2*. Redlands, USA: Environmental Systems Research Institute, 1999.

GEP. Manejo de microcuencas, recarga de acuíferos y riego agrícola en el estado de Puebla. *Memorias de la "Tribuna del Agua"*. Expo Zaragoza. Zaragoza, España: Gobierno del Estado de Puebla, Secretaría de Desarrollo Rural, Conagua, Sagarpa, 2008, 240 pp.

GRANADOS, S.D., HERNÁNDEZ, M.A. y LÓPEZ, G.F. Relación hombre-naturaleza en un ciclo que perpetúa la vida: agua y galerías filtrantes en el Valle de Tehuacán.

- TERRA Latinoamericana*. Vol. 23, núm. 3, 2005, pp. 351-361.
- HAMADI, K., MAKRAM, A., SALAH, J., and JAMILA, T. GIS-based multi-criteria analysis for potential wastewater aquifer recharge sites. *Elsevier. Desalination*. Vol. 215, 2007, pp. 111-119.
- INEGI. *Modelo de elevación digital en formato raster con resolución de píxel de 90 metros*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1995.
- KRESIC, N. *Groundwater Resources: Sustainability, Management, and Restoration*. Chapter 3, Groundwater Recharge. McGraw Hill, Ohio, USA, 2009, pp. 235-293.
- LU, X., JIN, A., and BASSAM, B.F. Temporal-spatial change of vertical groundwater recharge in representative zones of the North China Plain. Book Series: Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences. *Taylor & Francis Ltd. Water-Rock Interaction*. Vols.1 y 2, 2007, pp. 1333-1337.
- MAIDMENT, D. and DJOKIC, D. *Hydrologic and Hydraulic Modeling support*. California: ESRI-PRESS. 2000.
- MARILES, F.V., CRUZ, E., SERRANO, V., SOLARES, F., AYERDE, D., VARGAS, D., BORJA DE LA ROSA, A., FUENTES, M.E., GÓMEZ, M., CASTELLANOS, J.F., and OROZCO, S. *Distribución actual y potencial de linaloe en los estados de Guerrero, Morelos, Puebla y Oaxaca*. *Campo Experimental Valles Centrales de Oaxaca*. Desplegable Informativo núm. 8. Oaxaca, México: INIFAP, 2009.
- MARTÍNEZ, S.P. and ANDREU, J.M. Lumped and distributed approaches to model natural recharge in semiarid karst aquifers. *Journal of Hydrology*. Vol. 388, 2010, pp. 389-398.
- MATUS, O., FAUSTINO, J., and JIMÉNEZ, F. Methodology for participative identification of potential water-recharge areas in watersheds; validation in Jucuapa River watershed, Nicaragua. *Recursos Naturales y Ambiente*. Vol. 55, 2008, pp. 74-82.
- PÉREZ, M.F. Criterios para una explotación sustentable del agua subterránea. Aspectos cualitativos y estrategias para el manejo de acuíferos. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. 18, núm. 1, enero-marzo de 2003, pp. 5-20.
- RITESH, V. and SOHONY, R.A. GIS based site and structure selection model for groundwater recharge: a hydrogeomorphic approach. *Journal of Environmental Science & Engineering*. Vol. 51, No. 4, 2009, pp. 311-314.
- SEMARNAT. *Mapa digital del inventario nacional forestal del año 2000*. Escala 1:250,000. México, D.F.: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2001.
- SEMARNAT. *Mapa digital de la degradación del suelo*. Escala 1:250,000. México, D.F.: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2008.
- SEKAR, I. and RANDHIR, T.O. Spatial assessment of conjunctive wáter harvesting potential in watershed systems. *Journal of Hydrology*. Vol. 334, 2006, pp. 39-52.
- SINGHAL, D.C., ISRAIL, M., SHARMA, V.K., and KUMAR, B. Evaluation of groundwater resource and estimation of its potential in Pathri Rao watershed, district Haridwar (Uttarakhand). *Current Science*. Vol. 98, No. 2, 2010, pp. 162-170.
- TREVIÑO, G.E., MUÑOZ, C.A., CAVAZOS, C. y BARAJAS, L. Evaluación del flujo hídrico superficial en la Sierra de San Carlos, Tamaulipas. *Ciencia UANL*. Vol. 4, 2002, pp. 525-530.
- YEH, H.F., LEE, C.H., HSU, K.C., and CHANG, P.H. GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone. *Environmental Geology*. Vol. 58, No. 1, 2009, pp. 185-195.
- ZARKESH, M.M.K., MEIJERINK, A.M.J., and GOODARZI, M. Decision support system (DSS) for site selection floodwater spreading schemes using remote sensing (RS) and geographical information systems (GIS). *Desert*. Vol. 12, No. 2, 2008, pp. 149-164.

Abstract

BARBOSA-MORENO, F., SÁNCHEZ-COHEN, I., DÍAZ PADILLA, G., OROZCO-CIRILO, S., GÓMEZ-CÁRDENAS, M., GUAJARDO-PANES, R.A., MARILES-FLORES, V. & ARIZA-FLORES, R. *Criteria to determine potential areas to implement aquifer recharge projects in Mixteca-Tehuacán-Sierra Negra, Mexico. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. III, Special Number TyCA-RETAC, February-March, 2012, pp. 53-68.*

Lack of water is one of the main problems for highly marginalized populations in municipalities in the Mixteca-Tehuacán-Sierra Negra region of Puebla. This has caused continuous migration of the population. The absence of land planning projects has been the main obstacle to solving this problem, where the natural recharge of aquifers can serve as an alternative solution. Natural recharge, as suggested by its name, occurs in natural conditions, and the implementation of recharge projects—also called artificial recharge—can increase the availability of water. The definition of potential areas includes various factors both at the surface and subsurface levels, such as technical, social, economic and environmental aspects. Because of the complexity of the process, elements involved in the above factors need to be categorized and grouped, so that a geographical study can serve as a useful mechanism in the development of the location, design and construction of projects to solve the water supply problem that exists in a large portion of the country's semiarid areas. This study was conducted in 2009 to define technical criteria to evaluate alternatives for determining preliminary recharge areas, including: runoff water production, extreme surface soil degradation, territorial size, marginalization index, population density, proximity to communities, communities within the limits of the watershed and access roads. The categorization was based on combinatorial statistics. The studies analyzed 224 watersheds and identified 11 pilot watersheds as regionally representative areas suitable for developing projects.

Keywords: catchment, potential recharge areas, works.

Dirección institucional de los autores

Ing. Finlandia Barbosa-Moreno

Dr. Ignacio Sánchez-Cohen

Dr. Gabriel Díaz-Padilla

Dr. Martín Gómez Cárdenas

Lic. Rafael Alberto Guajardo Panes

Lic. Verónica Mariles Flores

Dr. Rafael Ariza Flores

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas
y Pecuarias

Melchor Ocampo 7, Santo Domingo Barrio Bajo

68200 Villa de Etla, Oaxaca, MÉXICO

Teléfono: + 52 (951) 5215 502, extensión 133

barbosa.finlandia@inifap.gob.mx.

sanchez.ignacio@inifap.gob.mx

diaz.gabriel@inifap.gob.mx

gomez.martin@inifap.gob.mx

guajardo.rafael@inifap.gob.mx

mariles.veronica@inifap.gob.mx

ariza.rafael@inifap.gob.mx

Dr. Sergio Orozco Cirilo

Subdirector de Posgrado e Investigación

Instituto Tecnológico Superior de Ciudad Serdán

Av. Instituto Tecnológico s/n

Col. La Gloria 75520

Ciudad Serdán, Puebla, MÉXICO

orozcosergio@yahoo.com.mx