

ISÓTOPOS Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ACUÍFERO HUICHAPAN-TECOZAUTLA, HGO.

Por: Ing. Juan Manuel Lesser I.
Ing. Santiago Arellano Islas
Ing. David González Posadas
Dr. Luis Ernesto Lesser C.

TEMA: Hidrogeoquímica e isotopía

La zona de Huichapan-Tecozautla esta constituida por productos volcánicos, principalmente ignimbritas y en menor proporción basaltos. La intercalación de materiales permeables e impermeables, provocan la formación de horizontes acuíferos entre los que se identifican Tecozautla, Pathecito, Huichapan y Astillero. En Tecozautla se encuentra un acuífero en un medio fracturado con agua termal, donde la recarga ha sido difícil de identificar y podría tener un aporte profundo. En Pathecito, existe un flujo N-S que es cortado por la barranca de Pathecito, donde los excedentes de agua afloran en forma de manantiales termales; este acuífero se encuentra 100m por arriba del de Tecozautla. El acuífero Huichapan está constituido por ignimbritas basaltos y tobas, cuya alternancia da origen a una serie de acuíferos colgados. El acuífero del Astillero, se localiza dentro de una caldera volcánica y su nivel de saturación se ubica 450m por arriba del de Huichapan. La interpretación de deuterio y oxígeno-18 auxilió a determinar el funcionamiento de estos acuíferos; el contenido isotópico de El Astillero indica que el agua se infiltró a gran altitud y que corresponde a un sistema hidrogeológico independiente del resto. Valores altos de tritio en Huichapan (1.2-2.5 UT) indican que corresponde a agua joven; mientras que en la mayor parte del área las concentraciones de tritio fueron bajas (<0.8 UT) indicando que el agua tiene cierto tiempo de estancia en el subsuelo. En relación al carbono 14, destaca el agua del Geiser de Pathé, a la cual se le calculó una edad de 21,500 años, ello indica que corresponde a una paleo-agua atrapada en el subsuelo durante un largo tiempo; en contraste, el resto de las muestras presentaron valores que indican que es agua contemporánea y, en la zona de Pathecito, el agua presentó valores intermedios, la cual se clasifica como agua antigua, con cierto tiempo de estancia en el subsuelo considerada como agua de mayor edad que la de reciente infiltración de Huichapan y más joven que la paleo-agua del Geiser de Pathé.

ANTECEDENTES

La existencia de manantiales en las áreas de **Huichapan, Nopala, y Tecozautla**, dieron origen a los primeros asentamientos humanos en esta zona. En Huichapan, los manantiales de Las Albercas y El Sabino con gastos del orden de 100 lps, fueron un atractivo para el establecimiento de los primeros habitantes que se dedicaban al pastoreo y a la agricultura en baja escala. A finales de los años 1960's, el Ing. Manuel Anaya y Sorribas oriundo de Huichapan y decano de la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos, logró atraer la atención de la mencionada Secretaría para realizar trabajos que permitieran a la región contar con suficiente agua potable. Ello, ocasionó la realización del primer estudio geohidrológico del área de Huichapan y valles aledaños, el cual fue realizado por la empresa Hidrotec, S. A. en el año de 1969. Posteriormente el Ing. Anaya logró que se realizaran perforaciones exploratorias profundas, tanto dentro de la Ciudad de Huichapan como en sus alrededores. Desde esa fecha se detectó que el agua subterránea es escasa y por lo general profunda. Entre estas perforaciones, se realizaron las que se ubican dentro del Valle o Caldera de El Astillero, donde se encontró un acuífero colgado de extensión reducida pero que hasta la fecha ha sido uno de los sustentos del abastecimiento de Huichapan. Posteriormente, durante las últimas 4 décadas, se han llevado a cabo varios trabajos de carácter local, tendientes a identificar la presencia y el flujo de las agua subterráneas, con el fin de poder satisfacer las demandas de agua potable de los principales núcleos de población. Se han realizado perforaciones exploratorias con resultados muy variados, que van desde pozos fallidos que se agotan al momento de los aforos, hasta pozos de 70 lps con niveles estáticos de 90 a 200 metros de profundidad y en algunos casos niveles de 280 metros, que se pueden considerar como los niveles en explotación más profundos en el País.

Problemática semejante se ha observado en las últimas décadas en los alrededores de Huichapan, incluyendo **Nopala** y otros poblados menores. Respecto al área de **Tecozautla**, ésta corresponde a una zona independiente de la de Huichapan, ya que presenta un acuífero en rocas basálticas de buen potencial, donde la profundidad del nivel estático varía entre 30 y 60 metros, con caudales de 30 a 50 lps. Entre Huichapan y Tecozautla se encuentra un horizonte acuífero caracterizado por presentar agua termal, en la zona de

Pathecito, donde además de la presencia de numerosos manantiales, se han perforado pozos que en conjunto extraen cantidades apreciables de agua subterránea.

Las condiciones geohidrológicas de la zona, han sido motivo para la realización de varios estudios geofísicos y geohidrológicos, principalmente por parte de la CONAGUA. Estos estudios han arrojado resultados un tanto preocupantes, como lo son el hecho de que el volumen actual de extracción es de aproximadamente $80 \text{ hm}^3/\text{año}$ y la recarga de $52 \text{ hm}^3/\text{año}$, por lo que corresponde a un acuífero sobre-explotado.

LOCALIZACIÓN

La zona de estudio se localiza en la porción occidental del Estado de Hidalgo entre los paralelos $20^{\circ}15'$ y $20^{\circ}40'$ de latitud norte y los meridianos $99^{\circ}29'$ y $99^{\circ}47'$ de longitud oeste. Las principales poblaciones son Huichapan, Tecozautla y Nopala, las que corresponden a cabeceras municipales. En la figura 1 se muestra la localización de la zona estudiada.



Figura 1.- Localización de la zona estudiada

CENSO DE APROVECHAMIENTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

Se realizó un censo de aprovechamientos de agua subterránea que incluyó 218 aprovechamientos correspondientes a pozos, norias y manantiales, de los cuales se obtuvo su localización mediante geoposicionador, fotografía y sus características constructivas y de operación, principalmente nivel estático, caudal de extracción y tiempo de operación. La localización de los sitios censados se presenta en la figura 2. De los 218 aprovechamientos censados, 80 se utilizan en agricultura, 54 para agua potable o uso doméstico, 2 en abrevadero, 2 en la industria, 41 no se utilizan y el resto en usos varios. En Tecozautla, 15 pozos son operados por el sistema de Agua Potable, en Huichapan el Sistema utiliza 11 pozos y 5 manantiales, mientras que en Nopala el Sistema cuenta con 7 pozos y 9 manantiales en operación.

GEOMORFOLOGÍA

Existen varios tipos de relieve de la superficie del terreno entre las que destacan los siguientes: Sierras, caldera, conos volcánicos, lavas, valle, lomeríos, mesetas y barrancas (Figura 2).

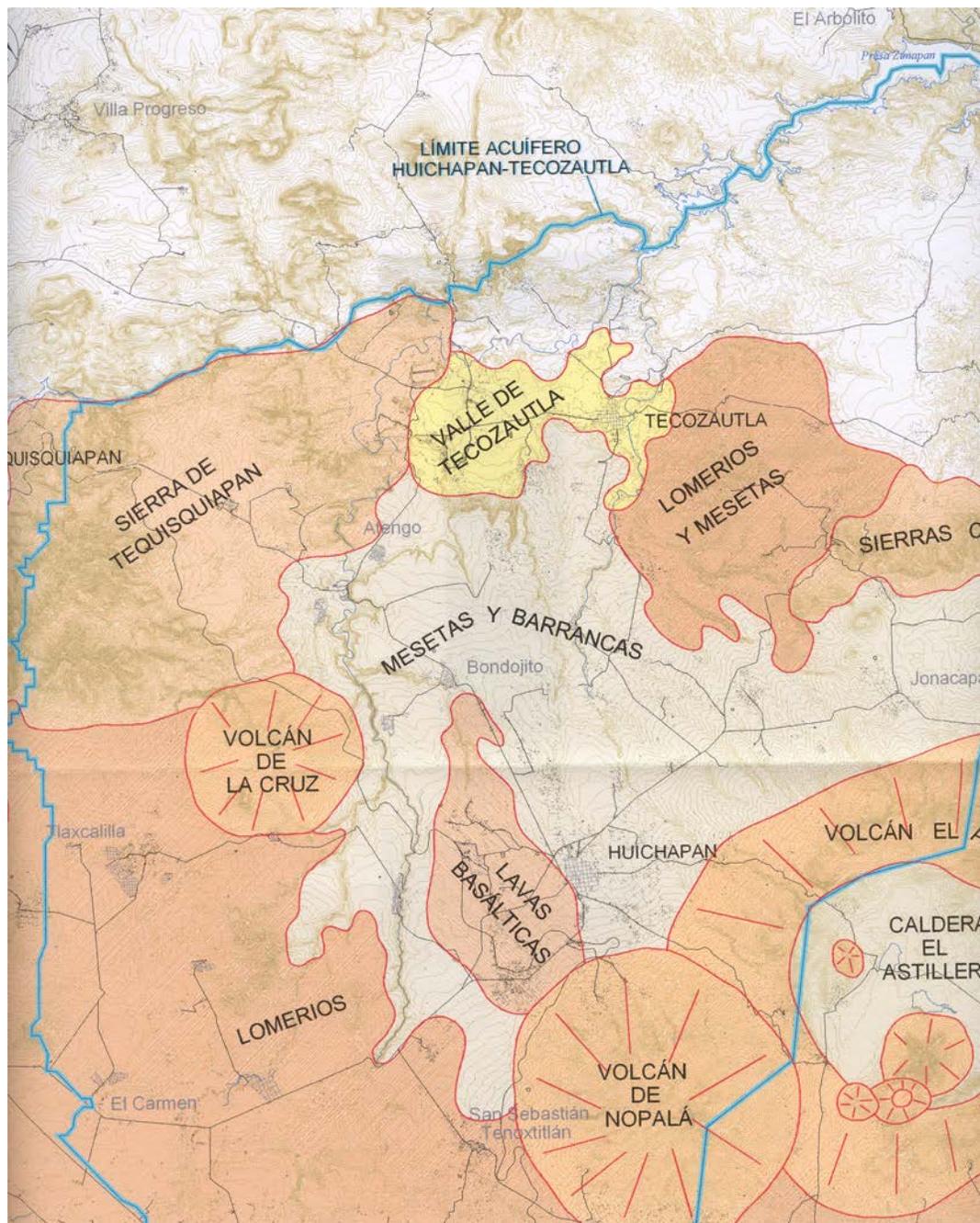


Figura 2.- Geomorfología

La **Caldera y Cono Volcánico** de El Astillero es el rasgo geomorfológico más notable en la zona. El cono volcánico de la misma tiene en su base un diámetro de alrededor de 16 kilómetros, mientras que el interior de la caldera tiene 12 kilómetros de diámetro. El interior de la caldera corresponde a un valle de formas suaves, plano, que se eleva a alrededor de 2,600 msnm, mientras que los bordes de la caldera alcanzan más de 2,700 msnm. Al sur de la caldera, se encuentran tres conos volcánicos conocido como Cerro Huatepec, que se eleva a más de 3,000 msnm. El valle en el interior de la caldera presenta una suave pendiente hacia su porción central y sur, donde existe un puerto topográfico que permite el drenado superficial de las aguas. Los bordes de

la caldera se encuentran bien definidos. Los flancos del volcán-caldera de El Astillero presentan pendientes medias, ya que en distancias de 2 kilómetros bajan 300 metros, de la cota 2,700 a la cota 2,400 msnm.

Dentro de la zona estudiada se encuentran otros **conos volcánicos** de diferentes tamaños, destacando entre ellos el del Cerro La Cruz, ubicado en la porción centro-poniente, el cual corresponde a un cono volcánico de pendientes medias, formado por lavas basálticas y andesíticas. Sobre el borde de la Caldera de El Astillero, existen varios conos volcánicos de menor tamaño que los descritos anteriormente.

Zona de **mesetas y barrancas**.- Las corrientes de lava que fluyeron a partir de los centros eruptivos de El Astillero y Nopala, se extienden principalmente hacia el norte. En gran parte corresponden a ignimbritas. Presentan una pendiente suave que, al norte de El Astillero va de la cota 2,300 msnm, para bajar a 1,900 a la altura de Pathecitos. En estas rocas, así como en una serie de tobas ubicadas en una franja a lo largo de la porción central de la zona de trabajo (Río Hondo), se presenta un notable fracturamiento vertical que ha facilitado su erosión por escurrimientos superficiales, dando origen a un gran número de barrancas, muchas de ellas de pendientes verticales. Al suroeste del área de estudio se encuentran una serie de **lomeríos** y planicies entre Tlaxcalilla y El Carmen.

Al poniente de Huichapan se encuentran una serie de **lavas** basálticas que cubren una zona plana con ligera pendiente hacia el norte. Al nororiente, con formas redondeadas, se encuentra una **sierra de rocas calcáreas**. Al noroeste se encuentra una sierra de formas abruptas conocida como **Sierra** de Tequisquiapan y finalmente el principal **valle** en la zona corresponde a la zona plana ubicada en Tecozautla (dentro de la caldera de El Astillero, se encuentra también una zona de valle).

ESTRATIGRAFÍA

La geología de la región se caracteriza por presentar tres secuencias litológicas principales representadas por (1) rocas carbonatadas del Cretácico, (2) andesitas y basaltos del Mioceno y (3) rocas piroclásticas del Plioceno. En el norte de la zona, las rocas volcánicas se encuentran intensamente fracturadas y falladas por dos sistemas estructurales denominados Pathé (NNW-SSE) y San Juan (ENE-WSW). Existen manifestaciones hidrotermales que se encuentran alineadas sobre la traza sur de la falla Pathé las que comprenden alteraciones de las rocas basálticas (zonas de caolín), vetas de cuarzo hidrotermal y manantiales calientes. La secuencias estratigráficas representativas de los diferentes episodios volcánicos que se sucedieron en el área, se basó en los trabajos de Silva (1991) y Lesser (1970). Para su descripción la referencia principal corresponde a la formación de la caldera de El Astillero, describiéndose facies volcánicas pre y post caldera. La Caldera de El Astillero es un ejemplo típico de las estructuras situadas a lo largo del extremo septentrional de la Faja Neovolcánica Transmexicana. Estas estructuras deben su origen a erupciones que expulsaron gran volumen de material, provocando el colapso gravitacional del centro emisor. Se caracterizan por presentar zonación composicional de la cámara magmática que los alimentó, lo que se evidencia por la disposición de los productos emplazados durante la vida activa de la caldera. La información disponible permite interpretar el ciclo evolutivo de la estructura, agrupando las diferentes rocas volcánicas en episodios volcánicos, diferenciables por su edad y características petrológicas, lo que permite precisar el mecanismo que dio origen a la caldera.

TERCIARIO MIOCENO SUPERIOR ANDESÍTICO (Tmsa)

Corresponde a la facies pre-caldera.

La base de la secuencia volcánica de la caldera de El Astillero está representada por los aparatos andesíticos de formas alargadas o redondeadas y sus derrames que forman el cerro Taxbatha (al NE de Pathecitos), al norte de la caldera, cerros Frío y El Ratón al occidente, y cerro La Cruz, al sur oeste, también las mesas que afloran al sur de San Sebastián Tenoxitlán y en la parte occidental de la presa Nopala. Estos aparatos están formados por una sucesión de lavas andesítica, a veces con fallamiento E-W, de color gris o rojizo, que por intemperismo adquieren tonalidades pardo. Herrera-F y Milán-Valdez (1981), reportan que por el método K-Ar, se fechó una muestra tomada en las cercanías de Taxbatha, la que dio una edad miocénica tardía de 0.0 ± 0.8 millones de años (Ma).

TERCIARIO MIOCENO SUPERIOR ANDESÍTICO-BASÁLTICO (Tmsab)

La segunda unidad volcánica que se encuentra en la zona de estudio está constituida por un paquete inferior de tobas riolíticas, con intercalaciones de lava andesítica que sugieren la presencia de una caldera pre-existente. Le sigue el miembro superior formado por derrames de lava basáltica, andesítica y dacítica, con intercalaciones de toba riolítica. De Anda (1956) reporta un espesor comprobado de 236 m en el pozo Pathé No. 1. Esta secuencia, que aflora en el cauce del Río San Juan, fue definida por Segerstrom (1962) como Grupo San Juan.

TERCIARIO PLIOCENO INFERIOR ANDESÍTICO (Tpia)

Al oriente, sur y occidente de la caldera de El Astillero, se identifican centros eruptivos constituidos por lavas cuya petrografía permite clasificar a estas rocas como andesita basáltica. Las rocas que forman este episodio fueron expulsadas antes del emplazamiento de la caldera. Se caracterizan por haber edificado volcanes de radio basal grande y poca altura. La fluidez elevada de los magmas que dieron origen a estas rocas, justifica la morfología cupular de las estructuras que constituyeron. Actualmente a pesar de parecer intensamente erosionados, las rocas basálticas vesiculares de textura porfídica están frescas. Por su posición y relación estratigráfica, estos volcanes y sus productos se asignan al Plioceno inferior, quizá poco tiempo antes de iniciarse el episodio que originó la caldera. La fase volcánica que formó una columna eruptiva cuyo colapso produjo la secuencia piroclástica denominada "Zona Don Guinyo" (Segertrom, 1962) es el fenómeno al que se puede atribuir el origen de la caldera de El Astillero. Las investigaciones realizadas en el área geotérmica de Pathé, suministraron información de los miembros de dicha secuencia y establecieron las unidades informales "tobas San Francisco" y tobas San Antonio (Herrera-F y, Milán-Valdez, 1981). Por otra parte, los estudios estratigráficos de los productos asociados a estructuras similares a la caldera, permiten establecer una secuencia idealizada de las fases que intervienen en su formación (Sparks et al., 1973).

TERCIARIO MIOCENO SUPERIOR TOBAS DON GUINYO (Tmstg)

Pertencen a la cima del Mioceno y base del Plioceno. Están formadas por tobas soldadas o ignimbritas de constitución riolítica y dacítica, con un espesor de aproximadamente 170 m, medidos en el arroyo Don Guinyó (localidad tipo), situado unos 22 km al oriente del poblado de Jonacapa. Las tobas Don Guinyó presentan en general una coloración rojiza, pseudoestratificación e intercalaciones de horizontes de piroclásticos pumíticos de color blanco y negro. Los horizontes de la parte basal tienen espesores hasta de 2.5 m y están más compactados. Su compacidad disminuye hacia la cima, hasta llegar a piroclásticos pumíticos. Aflora en el Valle de San Miguel Caltepanla y sobre el cauce del Río San Francisco. En el Valle de San Miguel Caltepanla presenta un espesor aproximado de 80 m, determinado mediante perforaciones efectuadas en las cercanías de los poblados de San Miguel Caltepanla y Jonacapa. Su límite poniente es marcado por el arroyo Pathecito, que también señala la dirección de un afallamiento normal ocurrido durante el Mioceno, el cual propició un alto topográfico que delimitaba por el occidente a una depresión localizada en lo que hoy es el Valle de San Miguel Caltepanla. Al ser arrojadas las nubes ardientes, tendieron a rellenar dicha depresión, depositando el material de menor fluidez en la depresión hasta el bajo estructural de la falla. Los materiales con mayor contenido de gases y menor peso específico, continuaron su depósito hasta las estribaciones de la sierra que limita la porción occidental del área, quedando expuestos espesores cercanos a los 50 m en el cauce del Río San Francisco.

TERCIARIO PLIOCENO MEDIO TOBAS SAN JUAN (Tpstj)

Se le ha asignado una edad del Plioceno Medio. Su localidad tipo esta situada a lo largo del Río San Juan. Cubre discordantemente tanto a las calizas del Cretácico y a las Tobas Don Guinyó. Consta de derrames de basalto y andesita y, en menor proporción, piroclásticos, tobas lacustres y conglomerados mal cementados, con un espesor total mayor de 150 m. Afloran al suroeste del poblado de San Antonio y en la carretera Huichapan-Tecoautla. Las rocas de esta unidad que forman las faldas del cerro El Astillero, se continúan hacia las partes bajas; en las inmediaciones del poblado de San José Atlán. Afloran como pequeñas ventanas dentro del conjunto de derrames basálticos que los cubren. En el subsuelo del Valle de Tecozautla esta unidad ha sido detectada por perforaciones, después de atravesar sedimentos con espesores de 16 y 10 m al noroeste de Tecozautla y 180 m en los poblados de Pathé y Bomaxothá.

TERCIARIO PLIOCENO INFERIOR TOBAS SAN FRANCISCO (Tpitf).

Pertencen a la cima del Mioceno y base del Plioceno. Afloran en el Valle Huichapan-Tecoautla. Su espesor es mayor a 150 m. Esta formado por tobas conglomeráticas, conglomerados y depósitos lacustres arenosos, de constitución principalmente riolítica y andesítica, provenientes de la destrucción de rocas pre-existentes pertenecientes. La secuencia probable de los sedimentos es: lechos lacustres de estratificación delgada, de granulometría que va de arena a arcilla y constitución riolítica; cubierta por una toba arcillosa masiva de un espesor aproximado de 6 m, la que a su vez superyase a depósitos conglomeráticos tobáceos, masivos, de color ocre, con fracturamiento columnar y espesor aproximados a los 15 m. La anterior secuencia se puede observar al sureste de la carretera Huichapan-Tecoautla, a la altura del poblado de San Antonio. Los piroclásticos típicos de esta unidad, aflora al NW de la caldera, no se identificaron los depósitos basales que indican la primera fase de actividad volcánica de la caldera. Está formada por lo menos de siete flujos de ceniza, separados por horizontes de piroclastos. Al oriente y sur de la caldera, fuera de la zona de trabajo, aflora la parte superior de un flujo de ceniza con características iguales a las de la secuencia antes descrita. Es una roca color café claro a rosáceo formada por fragmentos líticos de andesitas, con diámetros entre 0.5 y 3.0 cm. Los clastos están alterados y los fragmentos de pómez escasos, caolinizados, se presentan en una matriz

de ceniza fina que constituye el mayor volumen de la roca. Está compuesta por fragmentos de pómez con diámetros entre 1 y 5 cm, que incluye fragmentos basálticos grandes. Este cuerpo masivo, con rasgos burdos de pseudoestratificación, corresponde a un flujo de pómez. La base de la secuencia no está expuesta. Los horizontes inferiores que afloran son masivos o flujos de ceniza que de acuerdo al grado de compactación se clasifican como ignimbrita. Sobreyaciendo a la unidad anterior, en discordancia erosiva, se encuentra un derrame lávico de espesor variable, formado por una roca gris oscura, fracturada, que en ocasiones tiene aspecto masivo o brechoide con escorias. En el área de Pathecito, se distinguen las variaciones texturales de los flujos de ceniza inferiores. El segundo y cuarto flujo (de la base a la cima), contienen clastos abundantes con diámetros de 1 a 40 cm y de 1 a 5 cm, respectivamente, que les da un aspecto brechoide. En las figuras 5.7 y 5.8 se muestran un corte de la zona del balneario Pathecito de la secuencia San Francisco. Los rasgos petrográficos permiten clasificar a los flujos de ceniza como ignimbritas andesíticas, que es una composición más básica que la mencionada para la secuencia San Francisco y la posibilidad de emplazamiento algo posterior a la primera secuencia de piroclastos. Las muestras fechadas por el método K-Ar proporcionaron edades de 4.5 ± 0.3 y 4.2 ± 0.3 Ma (Yáñez-García, 1984; Freís, 1985; Freís y Mahood, 1986), época pliocénica inferior.

TERCIARIO PLIOCENO SUPERIOR LACUSTRE (T_{pss})

Con respecto a los productos formados y acumulados en el interior de la caldera de El Astillero, solo hay algunos afloramientos en los cauces del valle interior de la estructura. Forma una secuencia de capas delgadas estratificadas, con espesores de entre 20 y 30 cm, algunas formadas por fragmentos de pómez, cenizas finas o escorias basálticas. El aspecto arcilloso y el tamaño homogéneo de los fragmentos de pómez, indican que las capas son de origen lacustre. La perforación de un pozo artesiano puso en evidencia que, después del colapso del bloque central, se formó un lago en el interior de la estructura, donde se acumuló sedimento (Freís, 1985; Freís y Mahood, 1986), producto de la erosión y actividad volcánica incipiente en la caldera, esta secuencia se conoce hasta una profundidad de 100 m, lo que indica un período de tranquilidad volcánica y erosión de la estructura recién formada. Después de este período, se reactivó el vulcanismo con el emplazamiento de magmas viscosos que formaron dos domos lávicos. El primero localizado cerca del margen noroccidental de la caldera, que forma el Cerro la Verja, constituido por una roca gris clara que, al intemperizar, adquiere un tono blanquecino. En los flancos de este cuerpo se observa una brecha de fragmentos de la misma roca, cuya matriz es más fina, formada por cenizas blanco amarillentas. En muestra de mano la roca tiene aspecto pumítico y sólo se identifican plagioclasas y algunos cristales de cuarzo. El segundo domo de lava forma el cerro Hualtepec, el cual se emplazó cerca del margen meridional de la caldera. Presenta una morfología bien conservada, aunque no existe ningún rasgo significativo que confirme la existencia de un domo extrusivo. Las relaciones estratigráficas que presentan los sedimentos y los domos indican que su emplazamiento debió ocurrir en el Plioceno superior.

TERCIARIO PLIOCENO SUPERIOR ANDESÍTICO BASÁLTICO (T_{psab})

Durante el Plioceno superior se emplazó el volcán Nopala y otros aparatos volcánicos de dimensiones y características similares descritos en la Faja Volcánica Transmexicana, (Silva-Mora, 1979; Demant, 1978), cuya actividad se prolongó hasta el Pleistoceno (Steele, 1971; Heine y Heide-Weise, 1973). El Cerro de Nopala es un volcán constituido por la coalescencia de tres aparatos alineados según la dirección N7°E. Su altura es cercana a 1,000 m con relación a la superficie sobre la que se edificó. El volcán de Nopala se localiza al occidente de la caldera de El Astillero y descansa directamente sobre la secuencia piroclástica que causó el colapso y formación de la misma. El volcán Nopala está formado por el apilamiento de flujos de lava, sin escorias. Su cercanía a la caldera insinúa una relación con la cámara de la misma. Por sus relaciones estratigráficas y morfología casi intacta, se considera al volcán Nopala como formado durante el Plioceno tardío.

CUATERNARIO PLEISTOCENO LAVAS ANDESÍTICAS (Q_{pla})

Las rocas agrupadas en esta fase de construcción de El Astillero, constituyen los últimos productos del vulcanismo en la estructura y es posible que sean contemporáneos con algunos de los productos que edificaron el volcán de Nopala. Son las andesitas que forman el cerro El Soldado, ubicado en el borde nororiental de la caldera. La presencia de este cerro pone en evidencia la existencia de otros conductos de emisión más pequeños localizados a lo largo de la fractura que dio origen a la caldera. La periferia de la caldera está cubierta en general, por derrames andesíticos delgados que, en ocasiones, se asocian con escorias de igual composición. Hacia el interior de la estructura, sólo se emplazaron algunos derrames que edificaron el cerro El Soldado que constituyen el centro de emisión más grande para esos productos, con excepción del cerro Hualtepec, que podría ser de igual naturaleza. En general, el volumen principal de estas lavas escurrió hacia el exterior. Los derrames andesíticos que cubren la periferia de la caldera son rocas gris oscuro que intemperizan a colores pardo o amarillentos, con foliación por intemperismo que produce lascas que segregan a los derrames.

CUATERNARIO PLEISTOCENO (Qpir, Qplb)

Se incluye en la facies post-caldera dos grupos de rocas; las riolitas más antiguas y los basaltos, más jóvenes. La riolitas forman un conjunto de domos lávicos orientados NW-SW, localizados a 20 km al suroccidente de la caldera de Huichapan. Son cuerpos de diámetro entre 1 y 3 km, cuyas riolitas son de color gris claro que intemperizan a tonos rojizos. Se observa fractura perlítica, producto de la desvitrificación. Las relaciones, morfología y posición de estos domos indican una extrema juventud, a veces, sus productos están localizados a un lado o debajo de los conos cineríticos ubicados al norte y sur de los domos, lo que permite interpretar que estos domos no tienen relación directa con el sistema que alimentó a la caldera y considerar que este conjunto de domos riolíticos se emplazó durante el Pleistoceno y, posiblemente en algunos casos, son contemporáneos a los conos cineríticos mencionados. El segundo grupo puede dividirse en dos subgrupos por sus características y origen. El primer subgrupo forma un campo a 20 km al N-NW de la caldera de El Astillero, con una longitud aproximada de unos 30 km, en dirección N75°E. Está formado por estructuras volcánicas conocidas como conos de salpicaduras de lava, sus dimensiones son variables, el cerro Tecozautla tienen 1.1 km de diámetro y 100 m. de altura, el cerro de Uxdejé a 4 km al NW del cerro Tecozautla, de 2.1 km de diámetro y 160 m de altura con relación a la superficie donde se edificó y fue afectado por el sistema de callamiento del Río San Juan (Milán, Valdez, 1982) y Milán-Valdez y Herrera-F., 1987). Estos aparatos se formaron por el aglutamiento y soleamiento de fragmentos de lava expulsados en estado incandescente; dan la impresión de formar un apilamiento de tezontle por el color rojo y vesicularidad de la roca, a pesar de que no hay escorias, lo que permite inferir que el fenómeno eruptivo espectacular que les dio origen fue fisural y produjo la formación de fuentes de lava. Al pie estos volcanes se extienden coladas de lava que forman las mesas basálticas que llegan hasta el contrafuerte occidental de la Sierra Madre Oriental. Por la posición estratigráfica y morfología, estos aparatos volcánicos se consideran del Cuaternario inferior.

CUATERNARIO HOLOCENO (Qhba, Qhtl)

El segundo subgrupo, ubicado a 14 km al suroccidente de la caldera de Huichapan, incluye algunos de los conos localizados en el flanco nororiental de la estructura, sus productos son lavas de composición basáltica y escoria, que están asociados a gran cantidad de volcanes cineríticos pequeños o monogenéticos, cuyo diámetro varía desde 0.5 hasta 1.5 km y una altura desde 100 hasta 180 m sobre la superficie donde se edificaron. Definen tres direcciones de emplazamiento; N70°W, N-S y N10°E, con una morfología que indica periodos de emplazamiento diferentes. La morfología y posición estratigráfica de estos aparatos permite considerar su emplazamiento durante el Holoceno. Las lavas Qhtl del campo volcánico NW y antes descrito, ocasionalmente están cubiertas por una secuencia de tobas estratificadas y sedimentos lacustres, donde se presenta la última manifestación volcánica del área.

GEOLOGÍA DEL SUBSUELO

Para ilustrar la distribución de las rocas y materiales que constituyen el subsuelo, se construyeron 2 secciones geológicas, denominadas A-A' y B-B', las cuales se muestran en las figuras 4 y 5. La sección A-A' tiene un trazo norte-sur a partir del geiser localizado al norte del Valle de Tecozautla. Presenta el subsuelo del mencionado valle constituido por materiales volcánicos fracturados, de acuerdo a los cortes litológicos y a los resultados de las pruebas de bombeo. Geológicamente, se correlacionan con los materiales volcánicos de edad cuaternaria y composición predominantemente basáltica. Se desconoce con precisión su espesor el cual se infirió entre 120 y 200 metros. Bajo ellos, se encuentra la Formación San Francisco. En la porción sur de la sección se presenta un escarpe topográfico que se interpretó como una falla normal, siendo el bloque caído el Valle de Tecozautla.

La sección B-B', corresponde prácticamente a la continuación norte-sur de la sección anterior, solamente que desplazada ligeramente hacia el oriente con el objeto de cortar aspectos más ilustrativos de esta zona. El extremo norte de la sección parte de la barranca de Pathechitos, en cuya base se encuentra una toba impermeable que es la consecuencia del afloramiento de los manantiales. El subsuelo de la mayor parte de la sección corresponde a material volcánico producto de la erupción del Volcán del Astillero, con una secuencia principalmente de ignimbritas, intercaladas con tobas deleznable que se han clasificado dentro de las unidades San Francisco y Don Guinyó, emplazadas aparentemente en la misma época. Bajo estos materiales, se sugiere la presencia de volcánicos, andesíticos y basálticos del Mioceno, cuya profundidad se desconoce con precisión y se marcó a aproximadamente 400 metros de profundidad. Bajo estas rocas y constituyendo el basamento geológico, se encuentran sedimentos marinos del Cretácico Superior (lutitas equivalentes a la Formación Mezcala) e Inferior (calizas de la Formación El doctor). Afloramientos de estas unidades se encuentran en las áreas de Jonacapa y Nindhó, al este y noreste respectivamente del área de estudio, por lo que deben de

continuarse bajo los productos volcánicos aunque se desconoce su profundidad. Tentativamente y con el apoyo de la geofísica se sugiere podrían encontrarse a entre 400 y 600 metros de profundidad.

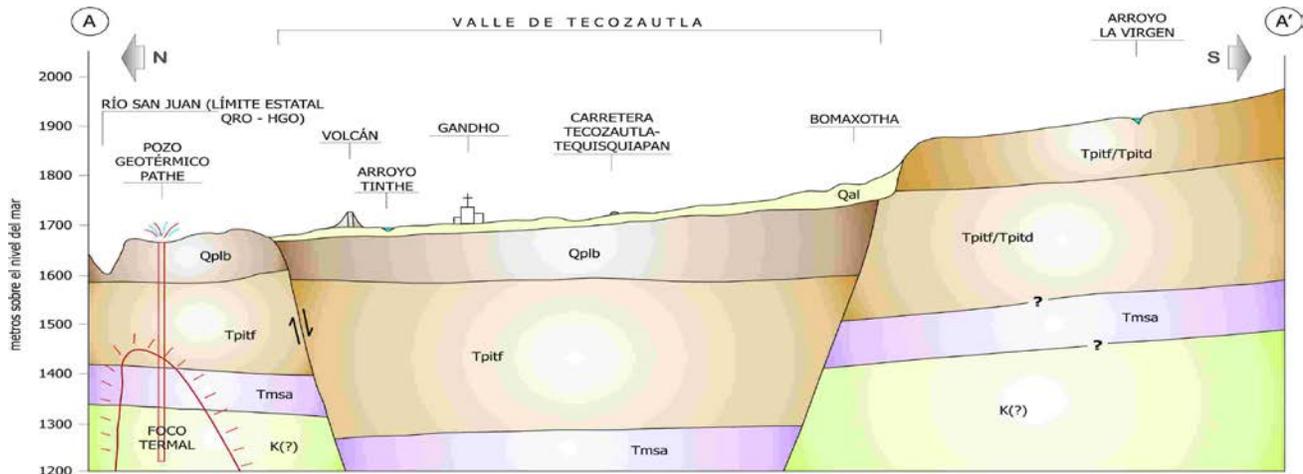


Figura 4.- Sección geológica Tecozautla

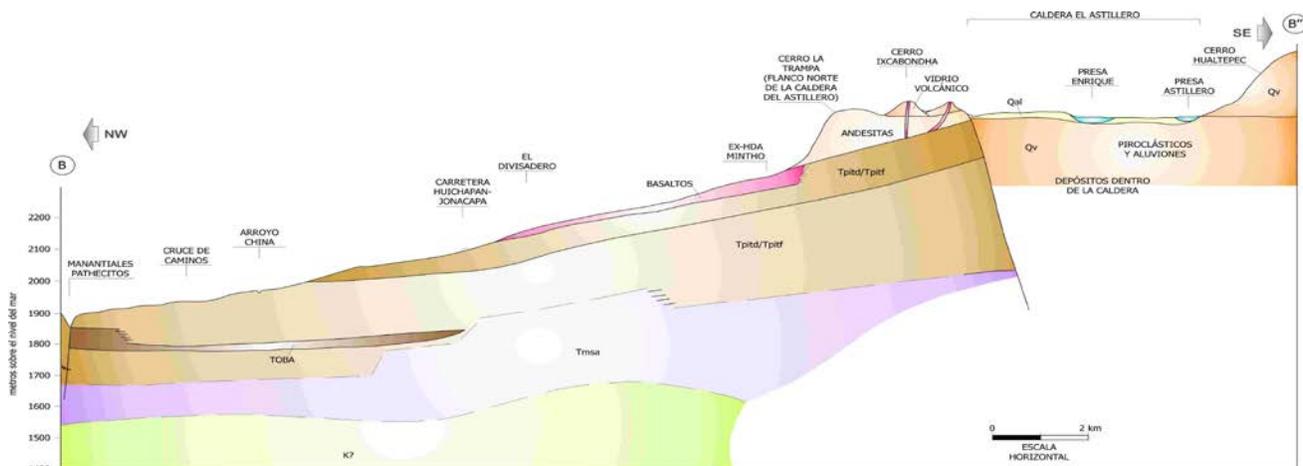


Figura 5.- Sección Geológica Pathecito

ANÁLISIS QUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Se obtuvieron 67 muestras de agua en aprovechamientos seleccionados y distribuidos espacialmente en las áreas de Huichapan, Nopala y Tecozautla. Los resultados obtenidos se pueden consultar en el informe integral.

Se marcó la salinidad por rangos, diferenciándose aquellos que presentan bajos valores, menores de 300 mg/l y que corresponden a agua de lluvia de reciente infiltración que no ha tenido contacto con rocas de fácil disolución. Otro rango marcado es aquel entre 300 y 600 mg/l y un tercer grupo para el agua que presenta concentraciones de sólidos totales disueltos mayores de 600 mg/l y que corresponde a agua con cierto tiempo de estancia en el subsuelo y que ha circulado a través de rocas que presentan cierta facilidad de disolución.

La familia de agua a que pertenece cada muestra fue obtenida de diagramas de Piper y es un reflejo del tipo de materiales que se encuentran en contacto con el agua. Los bicarbonatos y el sodio, son característicos del agua de lluvia.

Se compararon los resultados de los análisis químicos realizados con los límites máximos permisibles (LMP) de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana "NOM-127-SSA1-1994(2000) de agua para uso y consumo humano". Se observa que el agua subterránea de la zona es de buena calidad respecto a los parámetros analizados, con

concentraciones por debajo de los LMP, con escasas excepciones. Solo el agua del geiser de Pathé, presenta alto contenido de sodio, potasio y fluoruros.

Por lo que respecta a la calidad del agua para riego, se clasificó ésta utilizando el método de Wilcox, en el cual se cataloga al agua de acuerdo a la salinidad total expresada como conductividad eléctrica y al contenido de sodio expresado como relación de adsorción de sodio. Las muestras analizadas, el corresponden al los tipos C1-S1 y C2-S1, la cual puede utilizarse en riego prácticamente sin restricción alguna.

ANÁLISIS DE ISÓTOPOS EN AGUA

Las muestras se obtuvieron en un envase plástico de 40 ml de capacidad para la determinación de deuterio y oxígeno 18, en un envase plástico de 500 ml para la detección de tritio y en un envase de vidrio ambar de 250 ml con septa, para la determinación de carbono 14. Se remitieron para su procesamiento al laboratorio de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Waterloo, en Ontario, Canadá, el cual esta avalado por el Organismo Internacional de Energía atómica de Viena, Austria.

Para la interpretación por deuterio y oxígeno 18, se construyeron gráficas para las zonas de Tecozautla, Pathecito, Huichapan, Tlaxcalilla y Nopala-Astillero. En la figura 6 se muestran los puntos para toda la zona, donde se observa que los puntos se encuentran por debajo la recta meteórica mundial.

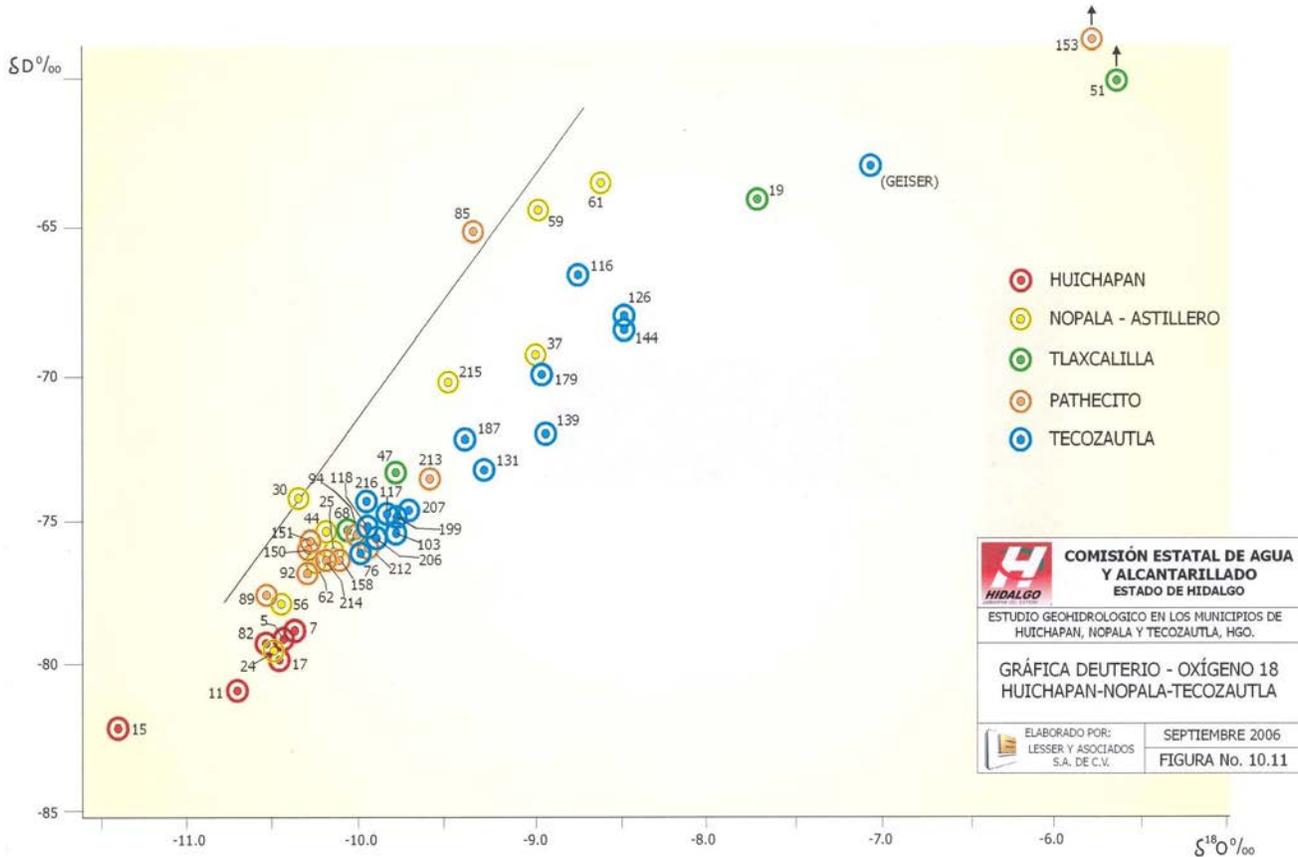


Figura 6.- Gráfica Deuterio-Oxígeno 18

Las zonas o rangos de deuterio y oxígeno-18 que caracterizan a cada una de las zonas mencionadas presentan existe semejanza en todas las muestras con excepción de el Astillero lo que sugiere que corresponde a un gran sistema acuífero que va de Huichapan hasta Tecozautla pasando por Pathecito y siendo la única excepción el Astillero. La zona de Huichapan es la que presenta menores valores isotópicos lo que indica que el agua se infiltra a mayor altitud sobre el nivel del mar. En Tecozautla es donde se encuentran valores isotópicos altos que indican que el agua se precipito e infiltro a menor altitud y la zona de Pathecito que topográficamente se encuentra a mitad de distancia entre Huichapan y Tecozautla, de la misma manera los valores isotópicos presentan valores intermedios. Los valores isotópicos de los tres sistemas, Huichapan, Pathecito y Tecozautla

forman una sola zona alargada. Destaca como diferente el comportamiento isotópico del agua del Astillero lo cual indica que corresponde a un sistema hidrogeológico independiente.

Por lo que respecta a los valores de tritio, se vaciaron sobre el plano de la figura 8, observándose que dos manantiales correspondientes a los aprovechamientos TH-15 y TH-19 son los que presentan mayor contenido de tritio con 2.4 y 2.5 UT (UT = unidades de tritio; 1 UT = 3.221 picocuries/l). Dichos valores de tritio corresponden a agua de lluvia de reciente infiltración. Se clasifica como agua joven infiltrada sobre las faldas de los cerros de Nopala y el Astillero y, con pocos años de haberse incorporado al subsuelo, posiblemente menos de 10 años. En el resto del área incluyendo Pathecito y Tecozautla, las concentraciones de tritio detectadas fueron menores que el límite de detección del método que es de 0.8 UT, lo cual indica que el agua tiene cierto tiempo de estancia en el subsuelo que se estima podría ser de 10 a 30 años, tiempo requerido para que esta se desplace de los alrededores de Huichapan hasta Tecozautla. En el Valle de Tecozautla los aprovechamientos TH-116, TH-126, TH-179, TH-187 y TH-216 presentan entre 1.2 y 2.1 UT que corresponde a agua joven y se encuentran rodeados por otros pozos con valores menores de 0.8 UT. Lo anterior indica que existe infiltración de lluvia local la cual se mezcla con el flujo regional.

En relación al carbono 14, éste es un radioisótopo del carbono. Este elemento en el agua forma parte de un ciclo donde pasa de CO_2 a HCO_3^- y CO_3^{2-} , en función del equilibrio químico que a su vez depende, entre otras cosas del pH. La materia orgánica de la capa de suelo, puede ser disuelta por el agua, la cual arrastra abundante concentración de carbono y CO_2 . La oxidación de la materia orgánica disuelta (DOC) consume O_2 y da lugar a reacciones químicas tipo redox en presencia de bacterias, donde NO_3^{2-} , Fe^{+3} y SO_4^{2-} toman parte, acompañadas por reacciones de disolución y precipitación. Lobby (1946) descubrió el radioisotópico del carbono y determinó su vida media ($T_{1/2}$) en 5,568 años. Posteriormente Godwin afinó el valor a 5,730 años (Clark y Fritz, 1997, pag. 200). O sea que, después de 5,730 años la concentración original de carbono 14 se reduce a la mitad; en el doble de años, se reduce a la cuarta parte, etc.

La medida usual del carbono-14 corresponde al porcentaje de la concentración inicial de ^{14}C (a_0 ^{14}C), conocido también como "porcentaje de carbono moderno" (pmC). El agua de lluvia presenta cierto contenido de H_2CO_3 de la atmósfera, sin embargo, la principal fuente de ^{14}C en el agua es proporcionada por la capa de suelo al infiltrarse el agua a través de ella. En la atmósfera la cantidad de $^{14}\text{CO}_2$ es de 360 ppmv, mientras que el suelo contiene de 10 a 100 veces más. La cantidad disuelta en el agua, solo disminuirá mediante el decaimiento radioactivo. En los últimos años se ha venido utilizando la espectrometría de masas para la medición de pequeñas concentraciones de carbono (< 5 mg C), lo cual permite su detección en agua en concentraciones reducidas.

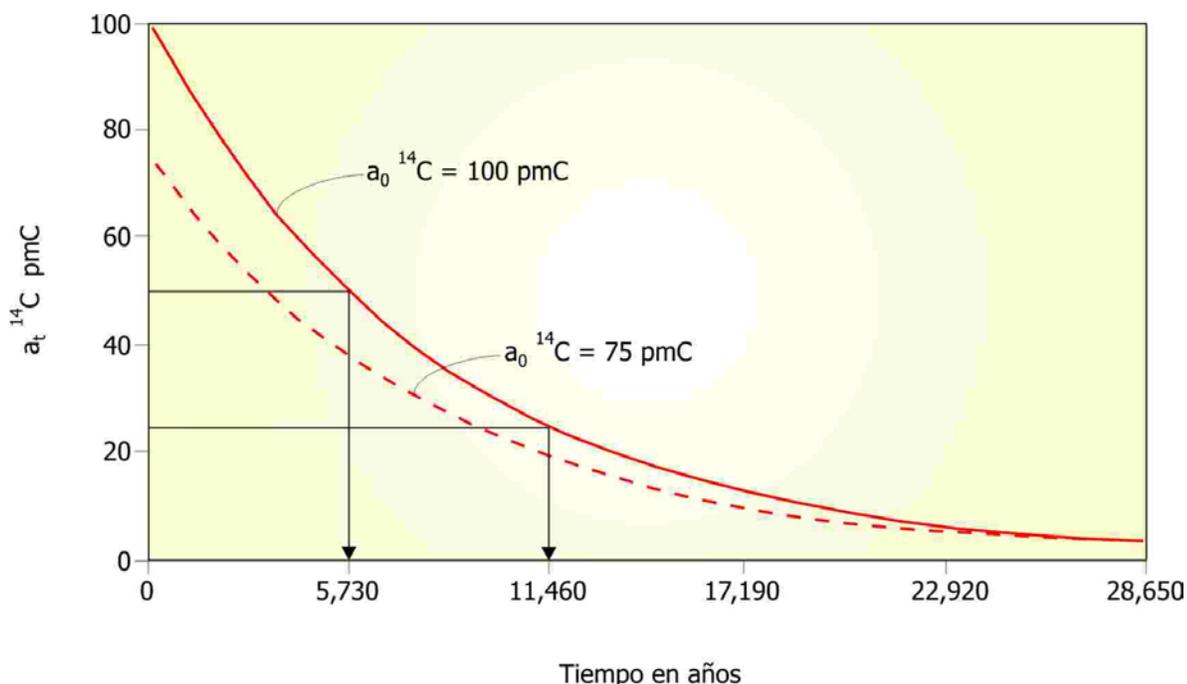


Figura 7.- Decaimiento del carbono-14.

En la zona estudiada, se obtuvieron muestras de agua las cuales fueron remitidas para su análisis por ^{14}C al laboratorio de la Universidad de Waterloo, en Ontario Canadá. Los datos del laboratorio fueron corregidos utilizando un valor para el porcentaje de carbono moderno (pmC) igual a 70. Considerando a la ecuación de decaimiento radioactivo.

$$a_t = a_o e^{-\lambda t}$$

Donde : λ = constante de decaimiento

a_t = porcentaje de carbono moderno (mpC) en el agua

a_o = concentración original de pmC (70 pmC)

t = tiempo (años)

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$$

La vida media del carbono 14 es de 5,730 años.

De donde: $t = - 8267 \ln \left[\frac{a_t}{a_o} \right]$

Para su interpretación, científicos han encontrado que el radio isótopo carbono-14 fue correlacionado con los anillos de crecimiento de los troncos de árboles y que su aplicación para datar madera fósil, cerámicas, etc., con edades de miles de años, lo cual representa utilidad en la arqueología. Este conocimiento ha sido llevado a la geohidrología, tendiente a datar paleo-aguas, o sea aquellas aguas que tienen miles de años de estancia en el subsuelo y cuya composición es diferente al agua meteórica de nuestro tiempo.

Tomando en consideración las implicaciones tanto en la presencia del elemento carbono en sus varias formas en el agua (CO_2 , CO_3^{-2} y HCO^{-3}), en las cuales se encuentran el ^{14}C en concentraciones reducidas y que estas incrementan notablemente su valor a su paso por la capa de suelo, así como por las reacciones químicas de reducción-oxidación y disolución-precipitación, se puede concluir que los valores de carbono-14 pueden presentar variaciones considerables. Además, los valores de ^{14}C reportados por el laboratorio pueden ser corregidos mediante modelos de diferentes tipos, obteniendo finalmente la edad del agua. Por todo lo que implica, tanto la presencia de ^{14}C en agua, como los cálculos de corrección, la datación del agua, permiten determinar cuando el agua es reciente o moderna y diferenciarla de aquella que es antigua (paleo-agua), en especial de aquella que representa miles de años.

En los resultados encontrados en este trabajo, destaca el agua del Geiser de Pathé (TH-134) la cual presentó 5.15 pmC y se le calculó una edad de 21,573 años. Ello indica que corresponde a agua y vapores (paleo-agua) que estuvieron atrapados en el subsuelo durante un largo tiempo. En contraste, muchas de las muestras presentaron valores altos de pmC, mayores de 100, que al aplicar la corrección para obtener su edad, se obtienen valores negativos, lo que indica que es agua contemporánea de reciente infiltración, como es el caso de los pozos muestreados alrededor de Huichapan. En la zona de Pathecito, el agua presentó valores alrededor de 60 pmC, la cual se clasifica como agua antigua, con cierto tiempo de estancia en el subsuelo. La edad de esta agua de acuerdo al carbono-14, es de alrededor de 1,000 años, valor que se debe tomar con reserva y preferiblemente considerarla como *agua con mayor edad que la de reciente infiltración* de Huichapan y más joven que la paleo-agua del Geiser de Pathé.

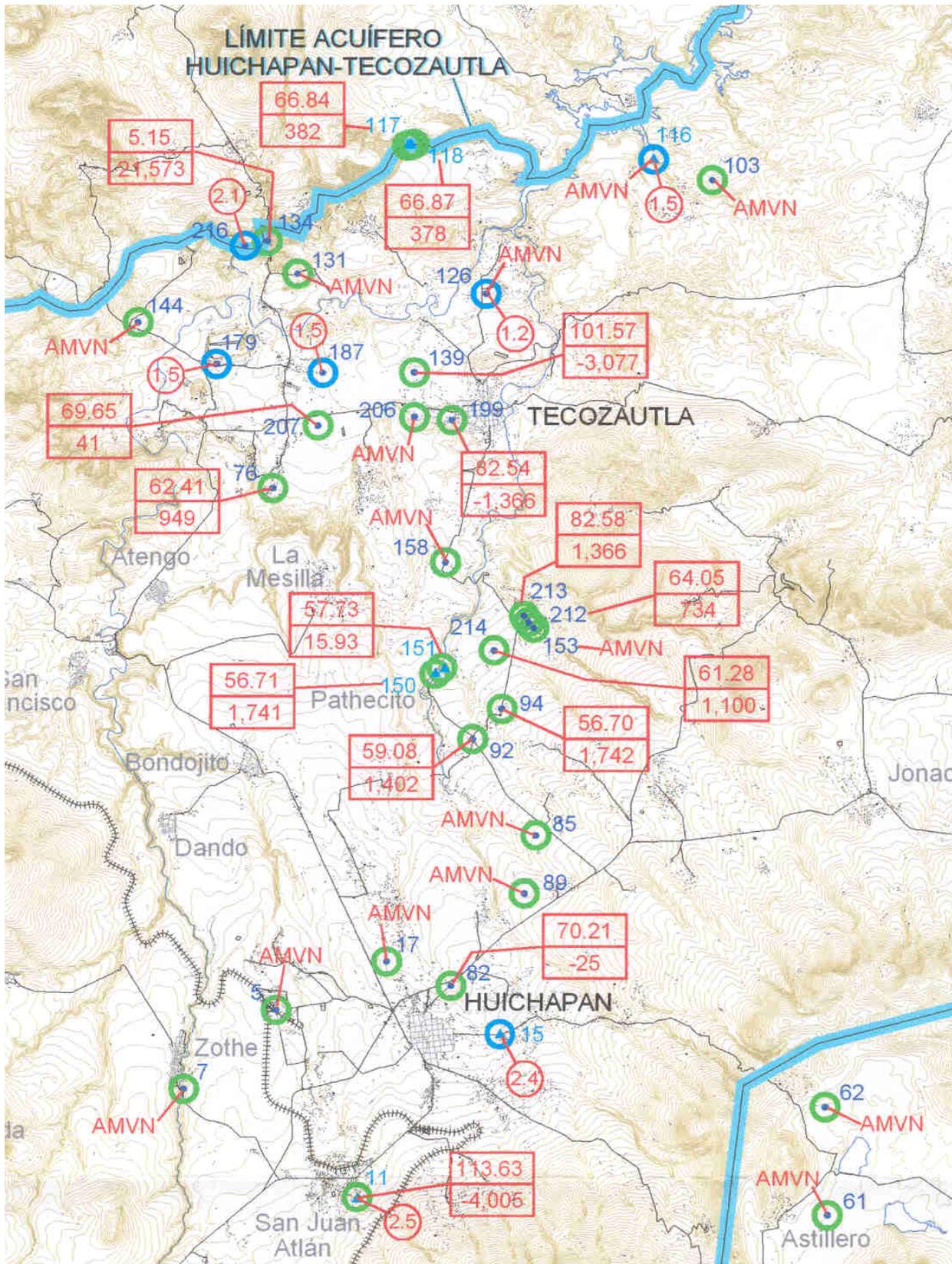


Figura 8.- Concentraciones de Tritio y Carbono 14

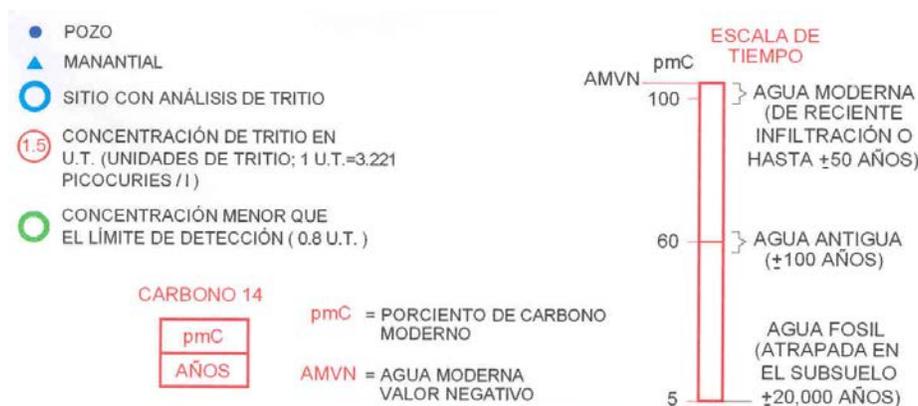


Figura 9.- Explicación de la figura 8.

PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTÁTICO

A partir de diversas fuentes de consulta se obtuvo la profundidad al nivel estático en varias fechas, las cuales se presentan en el informe integral para los años de 1974, 1978, 1996 y 2000. En la figura 10 se incluye la configuración construida para el presente año del 2006, en la cual se observa que el nivel del agua en Tecozautla se ubica a entre 60 y 80 metros de profundidad y hacia el sur se profundiza. La presencia de un lomerío en el centro del valle provoca la formación de las curvas 60 y 80 metros. Al noreste de la zona en estudio la profundidad al nivel estático va de 40 a 180 metros y esta en relación a la topografía del terreno. Al norte de Huichapan se trazaron curvas que van de 20 a 200 metros, con formas irregulares debido a la topografía del terreno.

ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO Y DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

En la presente sinopsis se muestra la configuración correspondiente al 2006 (figura 11, observándose que en Tecozautla existe un flujo hacia el norte del valle, con una salida subterránea hacia el Río San Juan. En los aprovechamientos ubicados en el extremo NE de la zona de estudio, se marcó un flujo subterráneo de sur a norte, aparentemente para drenar rumbo al Río San Juan. Los datos piezométricos obtenidos permitieron confirmar la existencia de subsistemas acuíferos. Uno de ellos correspondiente a Pathecito, en el cual el agua proviene del SE con fuerte gradiente hidráulico para, a la altura del pozo 90, cambiar a un gradiente bajo y posteriormente ser drenado por la barranca a través de manantiales. En la zona entre Nopala-Huichapan-Bondojito, los aprovechamientos son escasos y representan a un acuífero regional, pobre y con permeabilidad variable. Sin embargo, se trazaron curvas que permiten inferir un flujo subterráneo de sur a norte, aunque en gran parte el flujo fue inferido.

EVOLUCIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO

Se trazaron las evoluciones del nivel estático para los periodos de 1996-2006 y 2000-2006. En la primera evolución se detectaron abatimientos de 8 metros en el Valle de Tecozautla, de 1 metro en las cercanías de Pathecito, pero también recuperaciones entre 0 y 4 metros en la parte sur de Pathecito. Para el segundo periodo, se contó con pocos datos que solo permitieron el trazo de algunas curvas en Tecozautla con entre -1.0 y -4.0 metros.

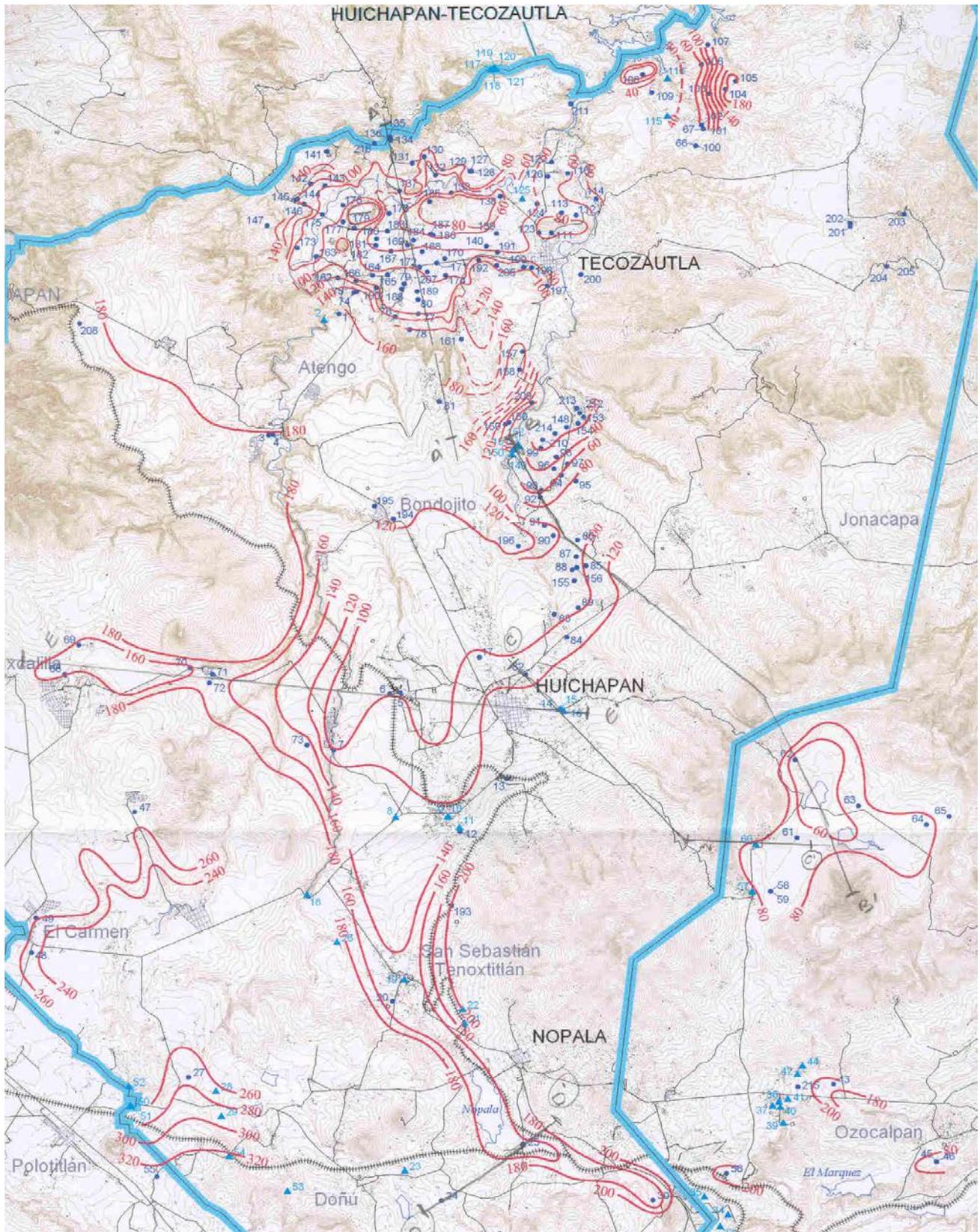


Figura 10.- Profundidad al nivel estático

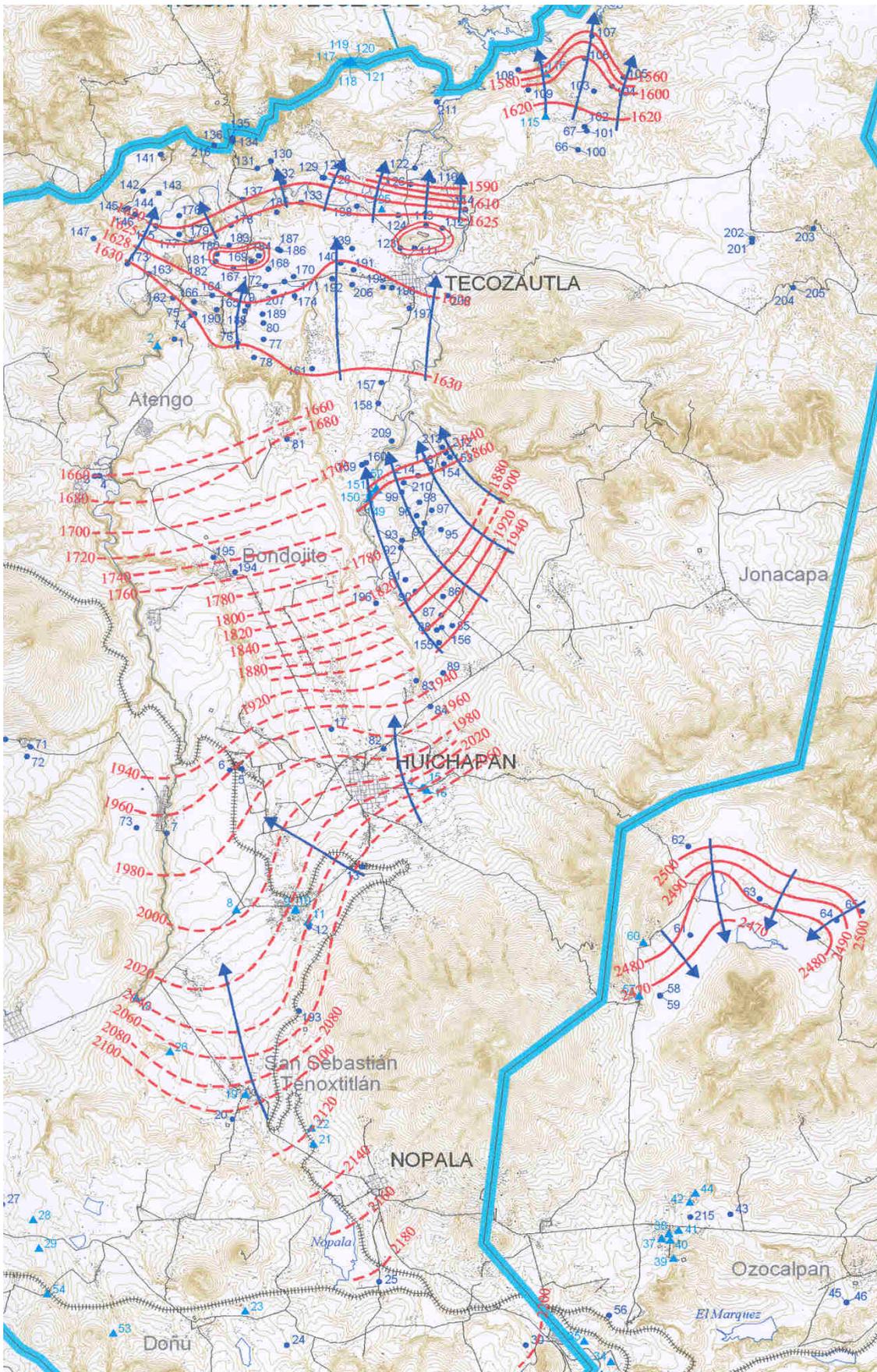


Figura 11.- Elevación del nivel estático.

PRUEBAS DE BOMBEO

Se realizaron 22 pruebas de bombeo procurando repartirlas en toda la zona de estudio, aunque se hace notar que en muchos lugares no existen pozos equipados que lo permitan. Los valores obtenidos varían entre 0.099 y $1.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ para 9 pruebas; entre 8.6 y $32 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ en 4 pruebas. En 5 pruebas, la transmisividad obtenida fue entre 41 y $264 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Tres pruebas resultaron no interpretables (NI). Se interpretaron por los métodos de Hantush, Thies y Jacob. Corresponden a acuíferos semiconfinados y confinados.

FUNCIONAMIENTO DEL ACUÍFERO

La zona de Huichapan, Nopala, Tecozautla, corresponde a una extensa área de 40 x 55 kilómetros, constituida por productos volcánicos en espesores de varios cientos de metros, entre los cuales predominan las ignimbritas con fracturas verticales. La principal estructura volcánica corresponde al flanco norte de la Caldera del Astillero la cual presenta una fuerte pendiente topográfica con alrededor de 2500 msnm en el sur, que disminuye en dirección al norte hasta 1700 msnm, compuesta por una alternancia de rocas fracturadas de permeabilidad variable, intercaladas con capas de tobas y cenizas impermeables que provocan la formación de varios horizontes acuíferos colgados en el centro y sur (Huichapan y Nopala). Se identificó también un acuífero regional que se extiende en prácticamente toda el área de estudio, caracterizado por presentar agua en fracturas aisladas, en general de baja permeabilidad en el centro y sur y, alta permeabilidad en el norte (Tecozautla). Para la descripción del funcionamiento del agua subterránea, se dividió la zona en estudio en 6 subsistemas acuíferos denominados: Tecozautla; Pathecito; Huichapan; El Astillero, Nopala y Tlaxcalilla

Subsistema acuífero Tecozautla.- El subsuelo se encuentra formado por materiales volcánicos permeables, de acuerdo a los cortes litológicos de pozos y a los resultados de las pruebas de bombeo, las que indican claramente que existe un acuífero en un medio fracturado. El agua subterránea se encuentra a profundidades que varían en general de 50 a 80 metros. El flujo subterráneo tiene una dirección sur-norte. Este subsistema acuífero, se caracteriza por presentar agua termal y alta permeabilidad. Existen un gran número de pozos que lo explotan con caudales entre 20 y 60 lps. Su recarga ha sido difícil de identificar. Se considera que proviene del sur y que podría, en gran medida, corresponder a un aporte profundo. En la figura 12 se incluye la sección A-A', la cual ilustra el funcionamiento geohidrológico de esta zona.

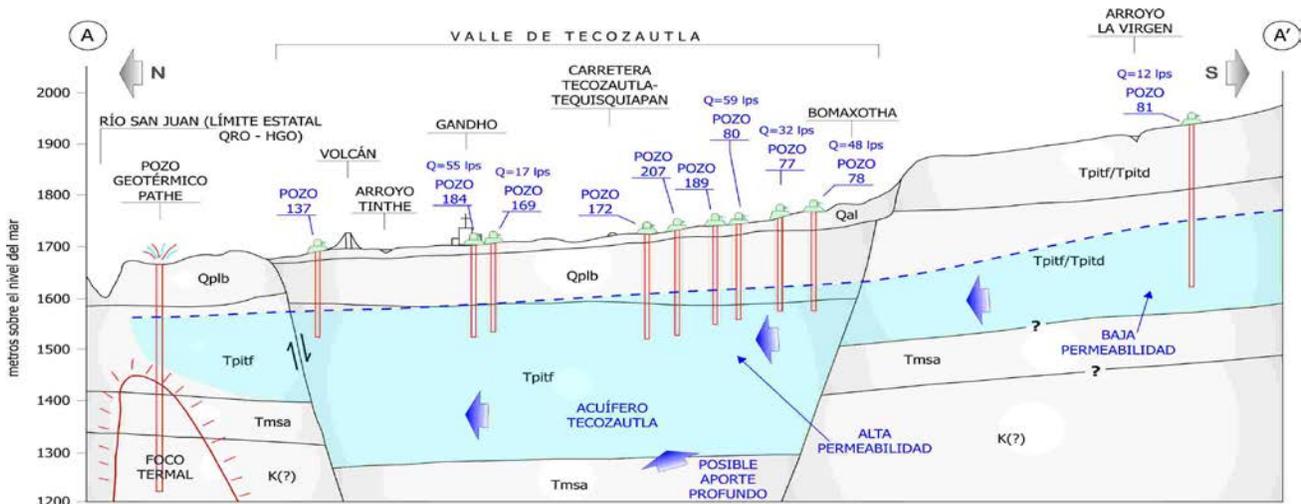


Figura 12.- Funcionamiento del acuífero, Tecozautla.

Subsistema acuífero Pathecito.- El subsuelo en esta porción que abarca una superficie de 8 x 5 kilómetros, está compuesto por una serie de coladas de lavas permeables de alrededor de 150 metros de espesor, las que descansan sobre una capa de tobas impermeables. El agua de lluvia se infiltra en las lavas, sobre el flanco noroeste del Volcán del Astillero para circular por el subsuelo sobre la capa de toba impermeable. Este flujo de agua subterránea que circula de sur a norte, es captado por aproximadamente 24 pozos y finalmente el flujo es cortado por la barranca de Pathecito, donde los excedentes de agua afloran en forma de manantiales, los que se caracterizan, entre otras cosas, por presentar termalismo. Bajo la toba impermeable se encuentran

ignimbritas con fracturas aisladas que permiten la formación de un acuífero regional caracterizado por presentar en general baja permeabilidad y un nivel de saturación muy profundo. El nivel estático del acuífero se encuentra a entre 1,840 y 1,940 msnm a diferencia del subsistema acuífero de Tecozautla donde el nivel va de 1,590 a 1,630 msnm o sea con una diferencia de más de 100 metros. En la figura 13 se incluye la sección B-B', la cual ilustra el funcionamiento geohidrológico de esta zona y su continuación al sur, hasta El Astillero.

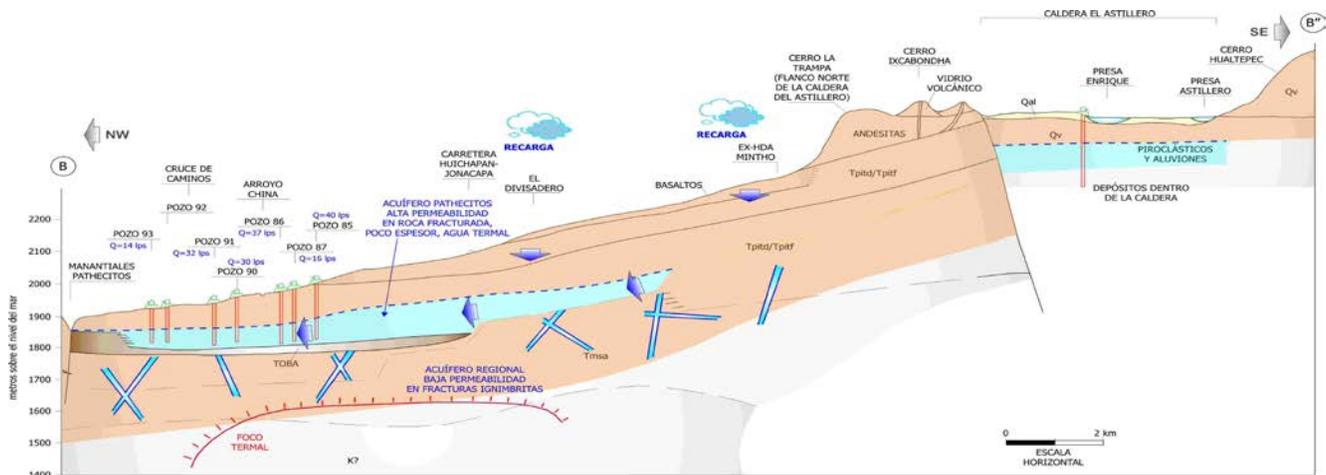


Figura 13.- Funcionamiento del acuífero, Pathecito

Subsistema acuífero Huichapan.- Corresponde a una extensión de 7 x 20 kilómetros entre Huichapan, Bondojo y Atengo. El subsuelo de esta porción, está constituido por una serie de ignimbritas y en menor proporción basaltos, de permeabilidad variable, intercalados con tobas impermeables. La alternancia de estos materiales (ubicados a varias alturas), permite la acumulación de agua y da origen a una serie de horizontes acuíferos colgados, que en algunas ocasiones afloran como manantiales. Un ejemplo de ello, lo constituyen los manantiales de La Sabina y La Sabinita de Huichapan. A mayor profundidad, se continúan las ignimbritas con fracturas aisladas que permiten la formación del acuífero regional de baja permeabilidad y con un nivel de saturación generalmente entre 100 y 200 metros de profundidad. En la figura 14 se incluye la sección C-C', la cual ilustra el funcionamiento geohidrológico de esta zona y su continuación hasta El Astillero.

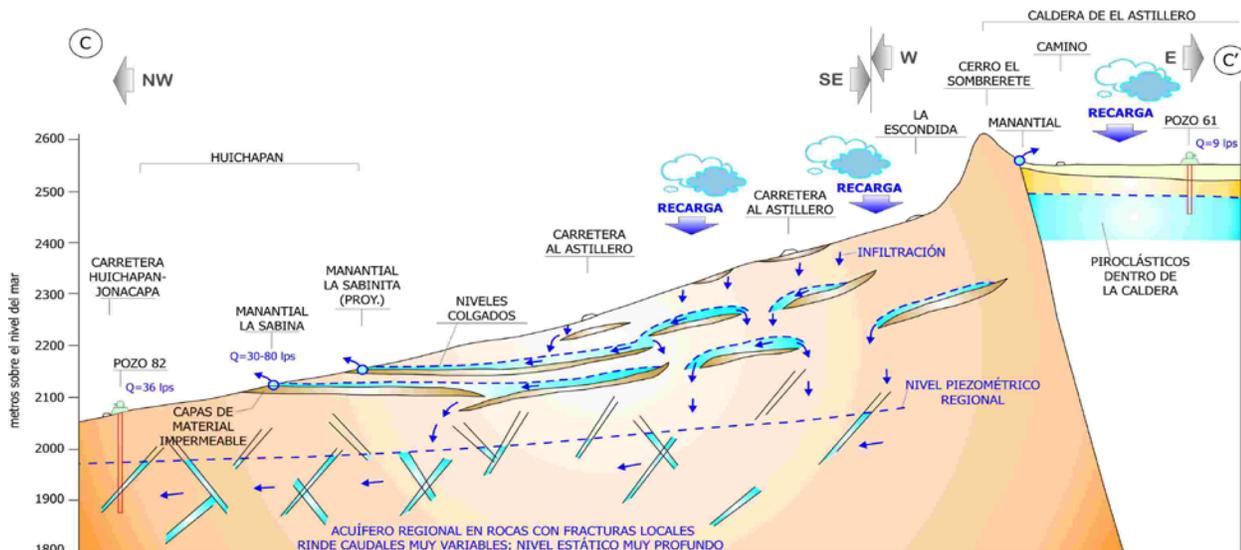


Figura 14.- Funcionamiento del acuífero, Huichapan

Subsistema acuífero Nopala.- Se extiende en las inmediaciones del poblado del mismo nombre, donde el subsuelo se encuentra compuesto por una serie de lavas, principalmente basálticas, de buena permeabilidad, intercaladas con tobas impermeables. Esta alternancia de lavas permeables y tobas impermeables da origen a alrededor de 27 pequeños manantiales que bordean el Volcán de Nopala. Estos manantiales presentan

caudales reducidos, generalmente entre 2 y 10 litros por segundo. En la figura 15 se incluye la sección D-D', la cual ilustra el funcionamiento geohidrológico de esta zona.

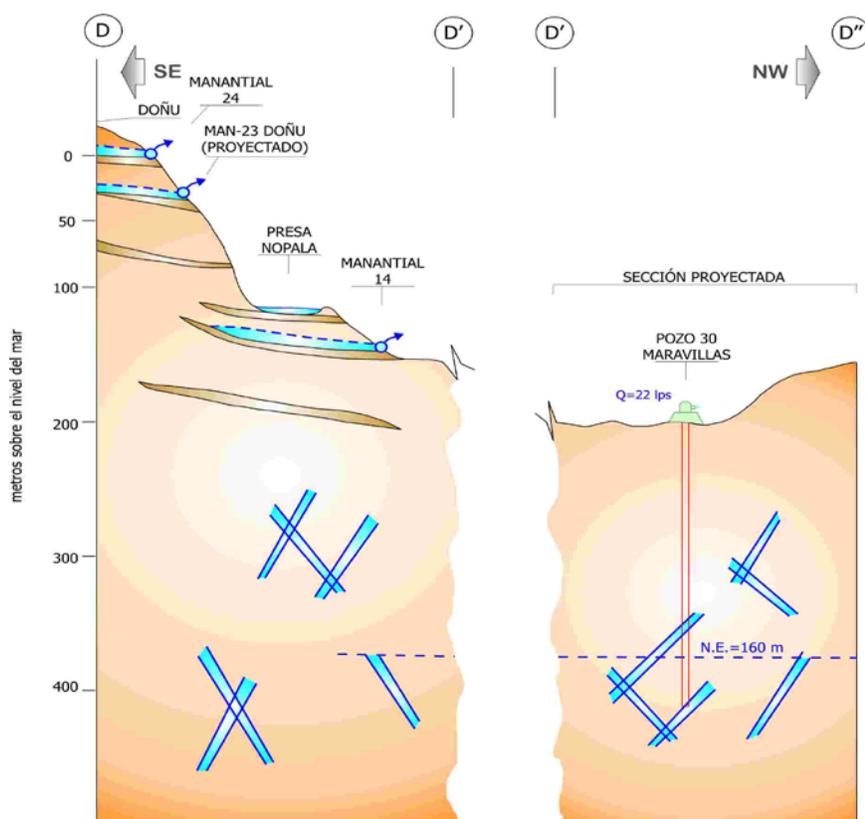


Figura 15.- Funcionamiento del acuífero, Nopala

Subsistema acuífero El Astillero.- Se localiza dentro de la caldera volcánica del mismo nombre. Corresponde a un valle ubicado a gran altitud (2,550 msnm), donde se ha formado un acuífero colgado en materiales piroclásticos y aluviones permeables. La parte baja y plana de este valle tiene forma circular, con un diámetro de alrededor de 7 kilómetros. El nivel del agua se encuentra a una profundidad del orden de 60-80 metros.

Subsistema acuífero Tlaxcalilla.- El área entre los poblados de Tlaxcalilla, La Cruz y El carmen, el subsuelo está constituido por una alternancia de tobas y derrames lávicos (ignimbritas), de permeabilidad heterogénea, con fracturas aisladas que forman un acuífero regional profundo. La gran profundidad al nivel del agua, cercana a los 200 metros, es debida principalmente a la gran altitud topográfica, de esta zona.

ECUACIÓN DE BALANCE

Se estableció la ecuación de balance volumétrico del acuífero en el cual las entradas de agua subterráneas son iguales a las salidas más el cambio de almacenamiento. Las entradas corresponden a recarga por flujo subterráneo y a la infiltración, tanto aquella procedente de la lluvia dentro de la zona, como la infiltración generada por retornos de riego (para el caso de Tecozautla). Las salidas se dividen en el flujo subterráneo que sale del sistema acuífero, manantiales y la extracción a través de pozos.

CÁLCULO DE ENTRADAS Y SALIDAS POR FLUJO SUBTERRÁNEO

Se trazaron celdas para el cálculo del flujo subterráneo utilizando la configuración de la elevación del nivel estático. En cada una de las celdas se aplicó la Ley de Darcy para obtener la cantidad de agua que fluye a través de ellas, la cual es igual a: $Q = TBi$, donde T es la transmisividad expresada en m^2/seg ; B es el largo de las celdas; i es el gradiente hidráulico. En la figura 14.1 se muestran las celdas marcadas para el cálculo del flujo subterráneo, tanto de los subsistemas acuíferos de Tecozautla y Pathecito, que son los únicos que presentan condiciones que permitan el cálculo del balance.

Subsistema acuífero Tecozautla.-

En esta porción se consideraron tres celdas de entrada identificadas como E-1 a E-3, ubicadas en el extremo sur del valle. Se marcaron 6 celdas de salida por flujo subterráneo (S-1 a S-6), ubicadas hacia el norte del subsistema. Las entradas fueron de $0.43 \text{ hm}^3/\text{año}$ y las salidas de $4.79 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Subsistema acuífero Pathecito.-

En este subsistema se trazaron tres celdas de entrada de flujo de agua subterránea identificadas de la E-4 a la E-6 y tres celdas de salida por flujo subterráneo (S-7 a S-9). El volumen de entrada fue de $9.14 \text{ hm}^3/\text{año}$, mientras que el de salida fue de $3.78 \text{ hm}^3/\text{año}$.

EXTRACCIÓN

Se calculó la extracción del agua subterránea a partir de los datos del censo de aprovechamientos de agua subterránea y en las zonas consideradas para el balance de agua subterránea. En el subsistema acuífero de Tecozautla la extracción es de $14.8 \text{ hm}^3/\text{año}$, mientras que en el de Pathecito, es de $6.10 \text{ hm}^3/\text{año}$.

CAMBIO DE ALMACENAMIENTO

Se calculó la variación del nivel estático respecto al tiempo. La que presentó mayor apoyo correspondió a aquella que cubre el período de 2000-2006. En base a esta configuración se calculó el área entre curvas, la cual se multiplicó por la evolución media anual y por un coeficiente de almacenamiento de 0.07, con lo cual se obtuvo un cambio de almacenamiento de $-2.00 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el subsistema acuífero Tecozautla.

Para el subsistema de Pathecito, existe una evolución positiva hacia el poniente y una negativa hacia el oriente que al momento de calcular la evolución media en el área considerada, resulta cero. Sin embargo, se hace notar que en la zona de pozos y hacia los manantiales si ha existido abatimiento.

INFILTRACIÓN

La infiltración se dedujo de la ecuación de balance, donde las entradas (entradas subterráneas + infiltración), son iguales a las salidas (salidas subterráneas + extracción + cambio de almacenamiento). De la ecuación mencionada se despejó la infiltración vertical, se aplicaron los valores mencionados en los incisos anteriores y se obtuvo que, para el acuífero de Tecozautla la infiltración vertical es de $17.16 \text{ hm}^3/\text{año}$, mientras que para el subsistema de Pathecito la infiltración es de $0.74 \text{ hm}^3/\text{año}$.

BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA

El subsistema acuífero de Tecozautla, a las entradas subterráneas (0.43) + la infiltración (17.16), se le restan, la extracción (14.8) y las salidas subterráneas (4.79). El cambio de almacenamiento es de -2.0 , cifras todas ellas expresadas en $\text{hm}^3/\text{año}$.

En Pathecito, las entradas subterráneas son de 9.14 , la infiltración de 0.74 , la extracción de 6.1 , las salidas subterráneas de 3.78 y el cambio de almacenamiento tiende a cero, valores todos ellos expresados en $\text{hm}^3/\text{año}$.

En los subsistemas acuíferos restantes (Nopala, Huichapan, Tlaxcalilla), la cantidad de agua subterránea es reducida y difícil de cuantificar, ya que la misma carencia hace que existan pocos aprovechamientos y aislados. Para el balance de agua subterránea, se consideró que en estas zonas existe una recarga de $5.0 \text{ hm}^3/\text{año}$, una extracción similar y un cambio de almacenamiento de cero.

Finalmente, para el subsistema acuífero de El Astillero, la extracción asciende a $2.0 \text{ hm}^3/\text{año}$, la recarga se estimó en un valor ligeramente menor ($1.9 \text{ hm}^3/\text{año}$), lo que provoca un ligero cambio del almacenamiento, que ocasiona un abatimiento del nivel estático de alrededor de 0.5 m/año .

Sumando los datos de los subsistemas anteriores, se tiene que las entradas o recarga asciende a $34.37 \text{ hm}^3/\text{año}$, las salidas son de $36.47 \text{ hm}^3/\text{año}$. La diferencia entre entradas y salidas corresponde al cambio de almacenamiento que es de $-2.1 \text{ hm}^3/\text{año}$.

DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA DE ACUERDO A LA NOM-011

La disponibilidad media anual del agua subterránea, se determinó aplicando las especificaciones y el método señalado en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, denominada "*Conservación del recurso agua, que*

establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”, en su fracción relativa a las aguas subterráneas.

Conforme a dicha norma, la disponibilidad media anual se obtiene restando, a la recarga total, la descarga natural comprometida y los volúmenes de agua concesionados inscritos en el Registro Público de derechos de agua (REPGA).

En el acuífero Huichapan, Nopala Tecozautla, la recarga media anual es de 34.37 hm³/año. De acuerdo a las observaciones y mediciones realizadas en el presente trabajo, se considera que la descarga natural comprometida asciende a 8.57 hm³/año. Por otra parte el volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPGA es de 36,248,678 m³/año al 31 de enero del 2003 de acuerdo a publicación del Diario Oficial de la Federación. Por lo tanto, la disponibilidad media anual de aguas subterráneas queda como sigue:

Disponibilidad media anual de agua subterránea	=	Recarga media anual	-	Descarga comprometida	-	Volumen Concesionado
-10,448,678	=	34,370,000	-	8,570,000	-	36,248,678

De lo anterior se desprende que en el acuífero de Huichapan, Nopala Tecozautla, no existe disponibilidad de agua subterránea, ya que el volumen concesionado es mayor que la recarga. Además de que existe sobreexplotación en el área de Tecozautla que ocasiona el abatimiento de los niveles y en Pathecito que esta provocando la disminución de los caudales de los manantiales.

MATEMÁTICO DEL ACUÍFERO

Se elaboró el modelo matemático de flujo del agua subterránea del Valle de Tecozautla, actualizado al 2006 e integrado de tal manera que se le pueda dar seguimiento para su modificación, enriquecimiento y en general para su manejo. El paquete utilizado fue la última versión del Visualmodflow Premiun 2006.

Este modelo matemático Modflow, fue tomado por Waterloo Hydrogeologic, Inc., quienes desarrollaron a la versión Visual Modflow-Pro que facilita el manejo de datos y el desplegado de planos con resultados. Actualmente es el paquete de modelación de flujo subterráneo más utilizado, tanto en México como en los Estados Unidos. Permite el uso y modelación en 3 dimensiones; adicionalmente contiene un módulo para el transporte de contaminantes. Comercialmente se le conoce como la integración de Modflow (para modelar el flujo), Modpath (para modelar la trayectoria de partículas) y (MT3D para modelar el transporte de sales). Su gran ventaja es el desarrollo de gráficos que facilitan el manejo del modelo. Mediante este procesador, el modelo puede seleccionar el tipo de unidades, asignar las propiedades de las rocas, así como las condiciones de frontera, correr, calibrar y realizar simulaciones.

GENERALES SOBRE LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE FLUJO

Para construir el modelo se inicia por definir el área que va a ser considerada, así como también la distribución de las formaciones geológicas con respecto a la profundidad. De esta manera se determina el número de capas que debe tener el modelo. Una vez identificadas las formaciones geológicas en extensión y profundidad, se les asignan sus propiedades hidráulicas apoyándose para ello en las pruebas de bombeo. También se identifican las fronteras hidráulicas y/o geológicas, así como las zonas de recarga y los puntos o zonas de descarga al acuífero. Para explicar de manera simplificada la construcción del modelo, se idealiza a la zona de estudio como un bloque rectangular en cuya parte superior se encuentra el Valle Tecozautla (figura 16).

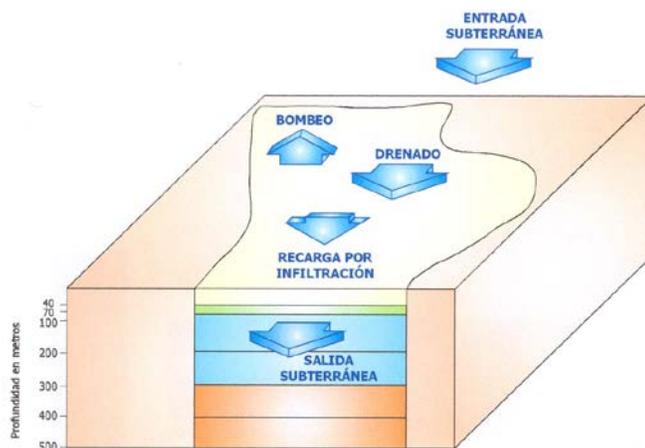


Figura 16.- Modelo conceptual de flujo Valle de Tecozautla

El interior del bloque representa el subsuelo con aproximadamente 400 metros de espesor de rocas y materiales divididos en 3 capas. El modelo requiere para su construcción, del tamaño y forma del acuífero, los cuales son alimentados al modelo mediante los archivos de la configuración de la superficie del terreno y las configuraciones de la base de cada una de las capas en que se divide el subsuelo.

DISCRETIZACIÓN

El área modelada incluyó el Valle de Tecozautla. En la zona de valle donde se encuentra el acuífero se consideraron celdas activas, mientras que las elevaciones que circundan al valle se marcaron con celdas inactivas. Sobre dicha base se trazaron filas y renglones de 250 metros por lado que constituyen la discretización en planta u horizontal (Figura 17). Por lo que respecta al número de capas se tomó en cuenta que existen cuando menos 300 metros de aluviones saturados. La información de los cortes litológicos indica la existencia de una sola unidad. Se consideró el modelo con 3 capas las 2 primeras que representan el acuífero con un total de 300 m de espesor (figura 17). El espesor se dedujo tomando en cuenta los aspectos siguientes. Por una parte la profundidad de explotación de la mayor parte de los pozos, la cual varía de 80 a 120 metros. Por otra parte, se consideró que efectos por debajo de los 300 metros no influyen en el flujo del agua y en la principal zona de extracción. Finalmente se utilizó una capa de amortiguamiento que simula el basamento con 100 m de espesor.

POZOS

La información sobre los pozos, con la cual se alimentó el modelo, consistió de datos de pozos. Los pozos se ubicaron de acuerdo a sus coordenadas geográficas. Se identifican de acuerdo a su número local y se alimentaron con la profundidad de la zona ranurada o de aporte de agua al pozo los gastos de extracción.

PROPIEDADES

Los valores de transmisividad del acuífero, se expresan en el modelo como conductividad hidráulica en m/s. Fueron obtenidos de la configuración de transmisividad que se trata en el capítulo 13. El coeficiente de almacenamiento se expresa en el modelo como rendimiento específico (S_y) cuando este trabaja como acuífero libre y como coeficiente de almacenamiento (S_s) cuando el modelo trabaja como acuífero confinado o semiconfinado. Estos parámetros se obtuvieron tanto de datos de campo, como de la granulometría de los materiales y de la literatura consultada, los valores utilizados se muestran en las figuras 18 y 19.

FRONTERAS DE FLUJO Y RECARGA VERTICAL

Se utilizaron fronteras de carga lejana (GHB) ubicadas alrededor del valle excepto en el extremo este (figura 20), las cuales reflejan la entrada por flujo subterráneo.

CONDICIONES INICIALES Y CALIBRACIÓN

Se seleccionó el año 2000 como valores iniciales. Se realizó una primera corrida del modelo para el periodo comprendido entre los años del 2000 (condiciones iniciales) y el 2006, la cual fue calibrada por el método de ensayo y error, modificando valores de conductividad hidráulica y almacenamiento dentro de rangos aceptables, hasta obtener una configuración del nivel estático al año del 2006, semejante a la observada, momento en el que se consideró el modelo como calibrado. Una configuración que muestra la comparación entre los datos observados y los calculados se presentan en la figura 21.

SIMULACIÓN

Una vez calibrado el modelo, se realizó una corrida de simulación a 10 años, mediante la cual se obtuvo que, bajo las condiciones actuales, se tendrán abatimientos de alrededor de medio metro anual en la zona del valle.

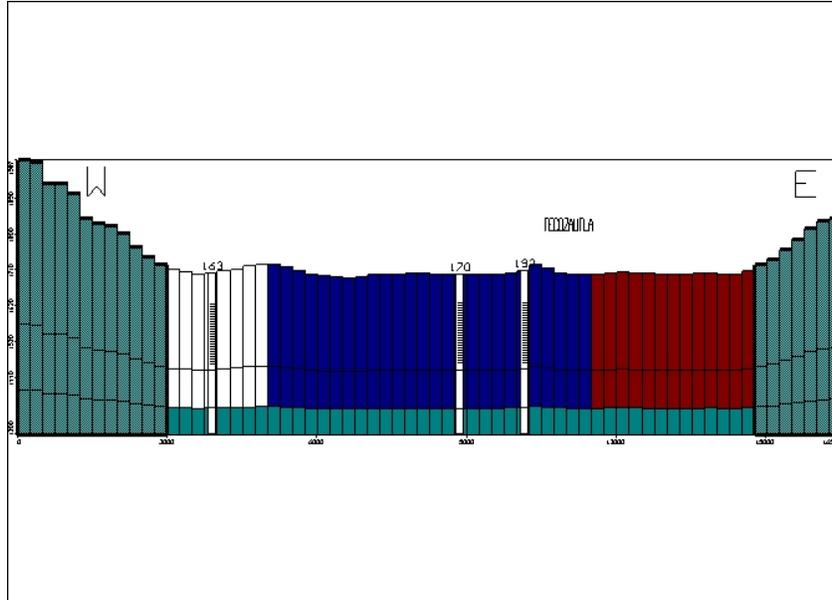


Figura 17 – Sección W-E con discretización, pozos y zonas de conductividad hidráulica - Modelo Tecozautla

Conductivity					
	Zone	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]	Active
▶	1	0.0001	0.0001	0.0001	<input checked="" type="checkbox"/>
	2	2E-5	2E-5	2E-5	<input checked="" type="checkbox"/>
	3	5E-6	5E-6	5E-6	<input checked="" type="checkbox"/>
	4	1E-7	1E-7	1E-7	<input checked="" type="checkbox"/>
	5	8E-5	8E-6	8E-6	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 18 Valores de Conductividad hidráulica (K) – Modelo Tecozautla

Storage							
	Zone	Ss [1/m]	Sy []	Eff. Por. []	Tot. Por. []	Active	Distribution Array
▶	1	0.0001	0.1	0.2	0.2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2	0.0001	0.2	0.2	0.2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3	1E-5	0.01	0.2	0.2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4	0.0001	0.2	0.2	0.2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 19 Valores de Almacenamiento (S_s y S_y) – Modelo Tecozautla

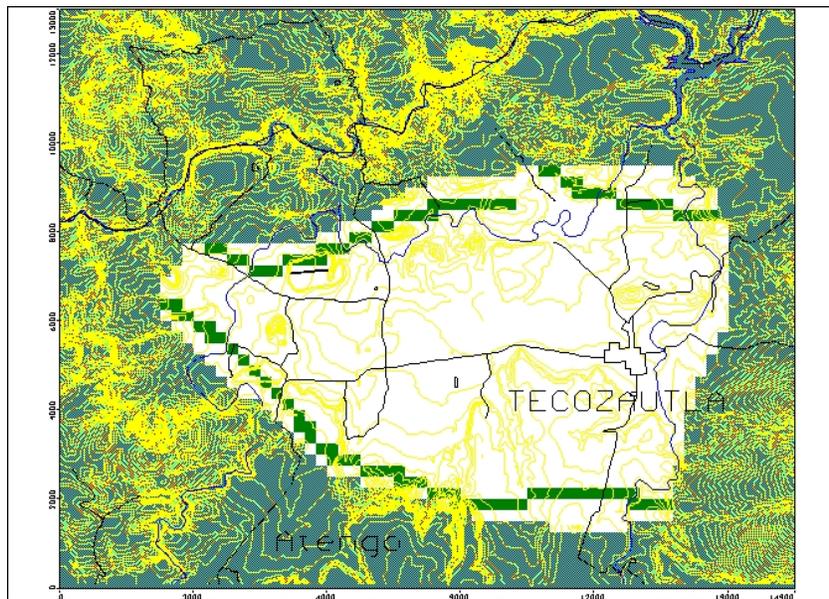


Figura 20.- Fronteras de carga lejana (GHB) – Modelo Tecozautla

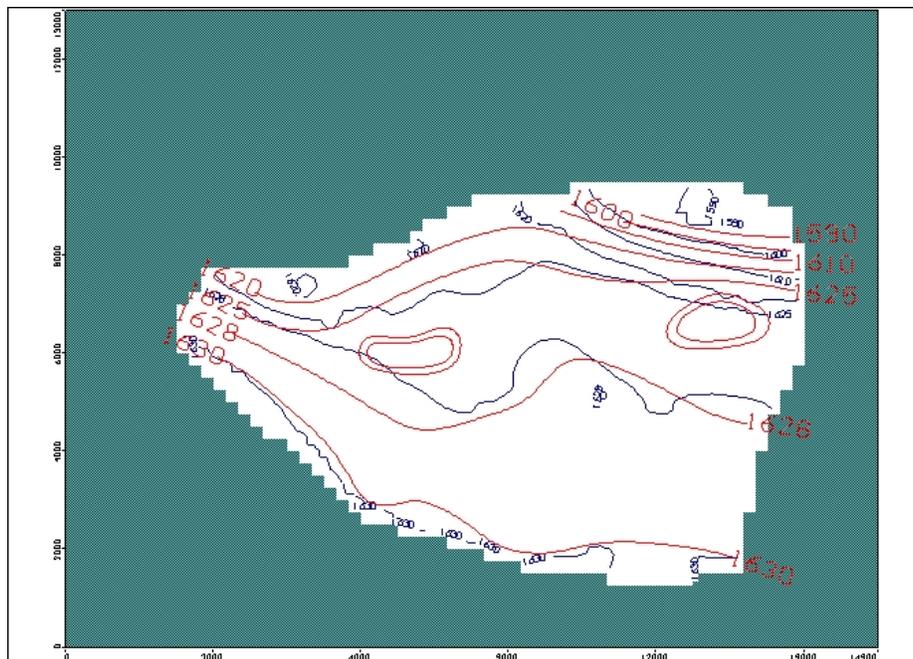


Figura 21.- Calibración 2000-2006 – Modelo Tecozautla
 Rojo – Elevación nivel estático observado
 Azul – Elevación nivel estático calculado

CONCLUSIONES

Se dividió la zona en estudio en 6 subsistemas acuíferos denominados: Tecozautla; Pathecito; Huichapan; El Astillero, Nopala y Tlaxcalilla.

Subsistema acuífero Tecozautla.- El subsuelo de esta porción, se encuentra formado por materiales volcánicos permeables, como lo indican algunos cortes litológicos y lo confirman los resultados de las pruebas de bombeo, las que muestran que existe un acuífero en un medio fracturado. El agua subterránea se encuentra

a profundidades que varían en general de 50 a 80 metros. El flujo subterráneo tiene una dirección sur-norte. Este subsistema acuífero, se caracteriza por presentar agua termal y alta permeabilidad. Existen un gran número de pozos que lo explotan con caudales entre 20 y 60 lps. Su recarga ha sido difícil de identificar, se considera que proviene del sur y que podría, en gran medida, tener un aporte profundo.

Subsistema acuífero Pathecito.- El subsuelo en esta porción que abarca una superficie de 8 x 5 kilómetros, está compuesto por una serie de coladas de lavas permeables de alrededor de 150 metros de espesor, las que descansan sobre tobas impermeables. El agua de lluvia se infiltra en las lavas del flanco noroeste del Volcán del Astillero, para circular por el subsuelo sobre la capa de toba impermeable. Este flujo de agua subterránea circula de sur a norte y es captado por aproximadamente 24 pozos. Finalmente el flujo es cortado por la barranca de Pathecito, donde los excedentes de agua afloran en forma de manantiales, caracterizados por presentar termalismo. Bajo la toba impermeable se encuentran ignimbritas con fracturas aisladas, las que permiten la formación de un *acuifero regional* caracterizado por presentar, en general, baja permeabilidad y un nivel de saturación muy profundo. El nivel estático de este subsistema acuífero se encuentra a entre 1,840 y 1,940 msnm (a diferencia del subsistema acuífero de Tecozautla donde el nivel va de 1,590 a 1,630 msnm o sea con una diferencia de más de 100 metros).

Subsistema acuífero Huichapan.- Corresponde a una extensión de 7 x 20 kilómetros entre Huichapan, Bondojo y Atengo. El subsuelo de esta porción, está constituido por una serie de ignimbritas y en menor proporción por basaltos, permeables, con intercalaciones de tobas impermeables. La alternancia de estos materiales (ubicados a varias alturas), permite la acumulación de agua y da origen a una serie de horizontes *acuiferos colgados*, que en algunas ocasiones afloran como manantiales. Un ejemplo de ello, lo constituyen los manantiales de La Sabina y La Sabinita de Huichapan. A mayor profundidad, se continúan las ignimbritas con fracturas aisladas, las que permiten la formación del *acuifero regional* de baja permeabilidad y con un nivel de saturación generalmente entre 100 y 200 metros de profundidad.

Subsistema acuífero Nopala.- Se extiende en las inmediaciones del poblado del mismo nombre, donde el subsuelo se encuentra compuesto por una serie de lavas, principalmente basálticas, de buena permeabilidad, intercaladas con tobas impermeables. Esta alternancia de lavas permeables y tobas impermeables, da origen a alrededor de 27 pequeños manantiales (*acuiferos colgados*) que bordean el Volcán de Nopala, los cuales presentan caudales reducidos, generalmente entre 2 y 10 litros por segundo. Bajo estos materiales y con un nivel estático profundo, se encuentra el *acuifero regional*.

Subsistema acuífero El Astillero.- Se localiza dentro de la caldera volcánica del mismo nombre. Corresponde a un valle ubicado a gran altitud (2,550 msnm), donde se ha formado un *acuifero colgado* en materiales piroclásticos y aluviones permeables. La parte baja y plana de este valle tiene forma circular, con un diámetro de alrededor de 7 kilómetros. El nivel del agua se encuentra a una profundidad del orden de 60-80 metros.

Subsistema acuífero Tlaxcalilla.- El área entre los poblados de Tlaxcalilla, La Cruz y El Carmen, el subsuelo está constituido por una alternancia de tobas y derrames lávicos (ignimbritas) de permeabilidad heterogénea, con fracturas aisladas, que forman un *acuifero regional profundo*. La gran profundidad al nivel del agua, cercana a los 200 metros, es debida principalmente a la altitud topográfica de esta zona. Algunos pozos llegan a rendir caudales de hasta 70 lps.

CONCLUSIONES DEL BALANCE Y DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA

En el *subsistema acuifero de Tecozautla*, las entradas subterráneas ascienden a $0.43 \text{ hm}^3/\text{año}$, la infiltración es de $17.16 \text{ hm}^3/\text{año}$, la extracción de $14.8 \text{ hm}^3/\text{año}$, las salidas subterráneas alcanzan $4.79 \text{ hm}^3/\text{año}$ y el cambio de almacenamiento es negativo con $-2.0 \text{ hm}^3/\text{año}$. En *Pathecito*, las entradas subterráneas son de $6.29 \text{ hm}^3/\text{año}$, la infiltración de $0.35 \text{ hm}^3/\text{año}$, la extracción de $6.1 \text{ hm}^3/\text{año}$, las salidas subterráneas de $0.54 \text{ hm}^3/\text{año}$ y el cambio de almacenamiento tiende a cero. En los subsistemas acuíferos restantes (*Nopala, Huichapan y Tlaxcalilla*), la cantidad de agua subterránea se considera reducida, además de que es difícil de cuantificar, ya que su misma carencia hace que existan pocos aprovechamientos y aislados. Para el balance de agua subterránea, se consideró que en estas zonas existe una recarga de $5.0 \text{ hm}^3/\text{año}$, con una extracción similar y un cambio de almacenamiento de cero. En el Acuífero de El Astillero, se extraen $2 \text{ hm}^3/\text{año}$ con una recarga ligeramente menor a la extracción ($1.9 \text{ hm}^3/\text{año}$), lo que provoca un abatimiento medio anual del orden de $0.5 \text{ m}^3/\text{año}$. Sumando los subsistemas acuíferos mencionados, la recarga para toda la zona de estudio asciende a $31.13 \text{ hm}^3/\text{año}$. Las salidas son de $33.13 \text{ hm}^3/\text{año}$. La diferencia entre entradas y salidas corresponde al cambio de almacenamiento que es de $-2.1 \text{ hm}^3/\text{año}$. La recarga media anual es de $31.130 \text{ hm}^3/\text{año}$, la descarga

comprometida de 4.00 hm³/año y el volumen concesionado de 36.248 hm³/año, por lo que la disponibilidad de agua subterránea en esta zona, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-011, es negativa con -9.11 hm³/año.