



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE ALCHICHICA,
ESTADO DE PUEBLA.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEÓLOGO
P R E S E N T A:
ARMANDO ALCALÁ RODRÍGUEZ

DIRECTOR: Dr. Oscar A. Escolero Fuentes.



MÉXICO, D.F.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

AGRADECIMIENTOS

A la UNAM, máxima casa de estudios, por haber contribuido en mi formación profesional.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA IN108702) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT1667 Q) por los apoyos que permitieron realizar esta investigación.

Al INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM por la becas otorgadas mediante el proyecto interno C-107 del Dr. Luis E. Marín.

Al Dr. Luis E. Marín y al Dr. Oscar A. Escolero por la confianza que depositaron en mí para la realización de este proyecto, sus atinados consejos y valiosas aportaciones a este trabajo. Pero sobre todo por brindarme su amistad sincera.

A mis profesores de la Fac. de Ingeniería, especialmente al Dr. Dante J. Morán Zenteno por permitirme ser parte de su equipo de trabajo.

Al Dr. Javier Alcocer Durand por todo su apoyo y por la información proporcionada.

A la M. en C. Teresa Scolamacchia por sus valiosas aportaciones hechas a esta tesis y por mostrarme “el maravilloso mundo” de las oleadas piroclásticas.

A mis compañeros Ahiram Monter Ramírez y Erick Y. Ramírez Pérez por su valiosa ayuda prestada para realizar este trabajo y por todos los momentos gratos que pasamos en la Fac.

A Eva, Marisol, Elsa, Mario, Rodolfo, por todo su apoyo.

DEDICATORIAS

A mis padres, Armando y Enedina, por todo el apoyo y esfuerzo realizado para que estudiara fuera de casa.

A mis hermanos, Claudia, Nina y Omar, por su apoyo, por sus consejos y palabras de aliento en los momentos más difíciles, los quiero mucho.

A mi novia, Mayra Toledo, por su apoyo incondicional y por todos esos momentos de felicidad que me ha regalado durante todo este tiempo, gracias nena.

A mis tíos Alberto y Alvaro Alcalá por encausarme en el campo de las Ciencias de la Tierra y por hacerme pasar un rato agradable durante sus visitas.

A mi primo Josefo por su apoyo.

A toda mi familia, que aunque está lejos, comparte la misma emoción que yo al concluir una etapa más en mi vida.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Armando Alcalá
Rodríguez
FECHA: 29-Sep-04
FIRMA: 

Índice

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Zona de estudio	6
1.2. Hidromagmatismo.	11
1.2.1. Estructuras volcánicas asociadas al hidromagmatismo .	11
1.2.2. Tipos de depósitos	12
1.2.3. Estructuras primarias y su significado	13
1.3. Hidrogeología	14
1.3.1. Red de Flujo	17
2. METODOLOGÍA	20
2.1. Hidrología Subterránea	20
2.2. Geología	22
3. RESULTADOS	23
3.1. Hidrogeología	23
3.2. Geología	34
4. DISCUSIÓN	44
5. CONCLUSIONES	48

Índice de figuras

1.	Localización Cuenca Libres-Oriental.	6
2.	Provincias Geológicas	8
3.	Modelo Digital del Terreno (tomada de: Referencia 2)	10
4.	Experimento de Darcy	15
5.	Nivelación diferencial con tres puntos de liga	21
6.	Censo de aprovechamientos de agua subterránea	23
7.	continuación censo de aprovechamientos.	24
8.	Censo de aprovechamientos de agua subterránea.	25
9.	Continuación censo de aprovechamientos.	26
10.	Ubicación de los pozos censados.	28
11.	Los brocales de pozos nivelados y norias se muestras con rom- bos y las 4 estaciones de monitoreo del lago con cruces.	29
12.	Red de Flujo	30
13.	Canales de flujo de entrada y salida de agua subterránea	31
14.	Corte SE. Cráter Alchichica	35
15.	Perforación de pozo TA-17. Uso: Agua potable	35
16.	Columna litológica Pozo TA-17	42
17.	Esquema que ilustra el balance hidrológico en el lago Alchichica	45
18.	Nivel de agua actual del lago. El cambio de vegetación indica el nivel de agua hace 40 años.	46

RESUMEN

Se realizó un estudio hidrogeológico en el área circundante al lago-cráter Alchichica perteneciente a la Cuenca Libres Oriental para elucidar sobre la interacción que existe entre el lago y el agua subterránea. Así mismo, se propone el esquema de funcionamiento entre ambos.

En esta zona de la cuenca el acuífero se comporta como libre al no encontrarse una capa impermeable que esté por encima del material granular. El espesor del paquete de material piroclástico va más allá de 100 m según lo observado en la columna estratigráfica del pozo TA-17 motivo por el cual la infiltración de agua de lluvia es prácticamente inmediata con un desarrollo hidrológico superficial muy escaso.

El estudio hidrogeológico se basó en construir la red de flujo subterráneo partiendo del censo de 51 aprovechamientos de agua subterránea ubicados en el área y la nivelación de norias y brocales de pozos utilizando el método de doble nivelación diferencial y Estación Total.

Se cuantificó la contribución de entradas de agua al lago respecto a las salidas de agua observando un déficit en el cambio de almacenamiento de $-0.6 \frac{m^3}{año}$ el cual se ve reflejado en el descenso en el nivel de agua del lago. En los últimos 40 años el nivel ha descendido 4.5 m.

La elevada tasa de evaporación de la zona ha ocasionado una mayor concentración de sólidos totales disueltos (STD) en el agua del lago, este es el factor dominante que ocasiona que su concentración de sales (con valores promedio de conductividad de $9.53 \frac{m\Omega}{cm}$) sea muy contrastante tanto con los valores registrados en los pozos del área de entrada de agua subterránea al lago, localizados al SE del mismo (con valores de $1.5 \frac{m\Omega}{cm}$) como con los valores de las norias en el área de salida de agua subterránea al NW del cráter (con valores de $3.5 \frac{m\Omega}{cm}$).

1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad del agua ante su demanda creciente se ha convertido en un problema que, para muchos países, se ha tornado fuera de control ocasionando escasez del vital líquido y deficiencias en cuanto al manejo de sus recursos, la desecación de algunos lagos, la sobreexplotación de acuíferos y la contaminación de ríos son algunos ejemplos que reflejan la gravedad del asunto.

La problemática del manejo del agua representa un gran reto que tiene que abordarse desde un punto de vista multidisciplinario donde participen especialistas de diferentes áreas cuyo objetivo común sea lograr un manejo adecuado de nuestros recursos hídricos.

En México, la mayoría del agua potable que utilizamos proviene del agua subterránea. De acuerdo a los datos publicados por la Comisión Nacional del Agua (CNA), existen 653 acuíferos de los cuales, hasta el año 2002, 100 de éstos están considerados como sobreexplotados (Marín, en prensa).

En algunas regiones del país es muy marcado el deterioro que han sufrido los recursos hídricos superficiales, ya sea por contaminación o por desecación. Un ejemplo es que la mayoría de los lagos mexicanos se encuentran en estado avanzado de desecación propiciada por actividades antropogénicas y por procesos naturales, siendo muy notable observar en algunos casos la disminución en volumen de los cuerpos de agua (Alcocer *et al.*, 2004).

Hay casos muy marcados en donde existe una estrecha dependencia entre los recursos hídricos superficiales y subterráneos en donde la alteración en el comportamiento natural de una de ellos afecta el comportamiento natural del otro (Alcocer *et al.*, 2004).

La Cuenca Libres-Oriental constituye hidrológicamente una fuente de abastecimiento de agua subterránea muy importante, la elevada capacidad de almacenamiento del acuífero lo convierte en uno de los más importantes para el edo. de Puebla y lo hace atractivo para ser considerado como una alternativa para el suministro de agua potable para otras ciudades.

Existen en la cuenca seis lagos-cráter (maars) que, pese a que se han llevado a cabo investigaciones sobre ellos, no se ha comprendido la relación

que tienen éstos con el acuífero. Cabe señalar que el grado de salinidad y la composición química es diferente en cada lago-cráter (Vilaclara *et al.*, 1993).

Las Redes de Flujo constituyen una herramienta confiable para determinar las direcciones de flujo del agua subterránea y con ello proponer el esquema de funcionamiento del acuífero para posteriormente interpretar su interacción con las aguas superficiales.

Se revisaron estudios hidrogeológicos de la Cuenca elaborados por instituciones públicas como la Comisión Federal de Electricidad (CFE), Comisión Nacional del Agua (CNA), en donde esencialmente se encontraron configuraciones del nivel estático de años anteriores y balances hidrológicos del acuífero.

El Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) realizó un trabajo en donde hace una revisión geológica de la Cuenca, publica un mapa geológico y una descripción de los lagos cráter que ahí se encuentran pero no aborda los aspectos hidrológicos. Se revisaron además, tesis inéditas y artículos publicados en México y en el extranjero referentes a la formación de los lagos- cráter.

La información topográfica del área de estudio se obtuvo consultando la carta publicada por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) cuya clasificación es *E14B35 GuadalupeVictoria*.

El objetivo de este trabajo es elucidar sobre la interacción entre el acuífero y el lago-cráter de Alchichica y proponer un esquema de funcionamiento hidrogeológico.

1.1. Zona de estudio

La cuenca Libres-Oriental se encuentra ubicada entre los paralelos $18^{\circ}57'23''$ y $19^{\circ}42'28''$ de latitud Norte y entre los meridianos $97^{\circ}09'00''$ y $98^{\circ}02'17''$ de longitud Oeste. Tiene una extensión superficial de casi 5000 km^2 con la distribución geográfica siguiente: 3500 km^2 (70 %) en el Edo. de Puebla, 100 km^2 (20 %) en el Edo. de Tlaxcala, y 500 km^2 (10 %) en el Edo. de Veracruz.

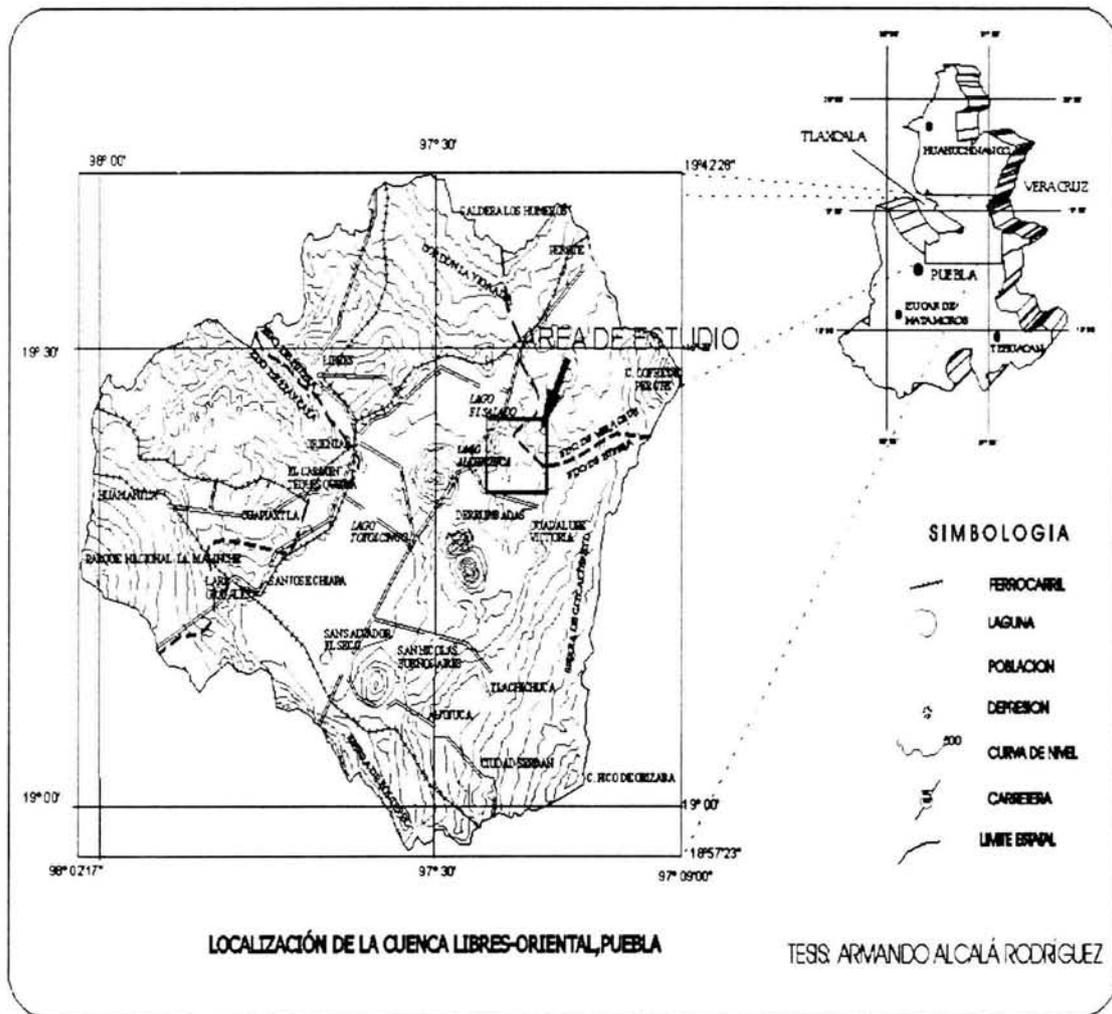


Figura 1: Localización Cuenca Libres-Oriental.

Las principales vías de comunicación de la cuenca son la carretera 140 D.F.-Puebla-Jalapa-Veracruz, la carretera 113 Texcoco-Huamantla-Veracruz; la carretera 125 D.F.-Puebla-Teziutlán- Nautla, que pasa por Lara Grajales y Oriental, en el Edo de Puebla. Además, la zona cuenta con una extensa red de terracerías que unen áreas agrícolas y son utilizables la mayor parte del año.

La Cuenca Libres-Oriental constituye hidrológicamente la principal fuente de abastecimiento de agua para los habitantes de la región. En ella se encuentran, entre otras estructuras volcánicas, seis maares llamados también conos de explosión o lagos-cráter cuyo fondo está cubierto por agua que presenta firmas químicas diferentes.

De acuerdo a la delimitación de las provincias geológicas, la cuenca Libres-Oriental se encuentra ubicada en la porción Oriental de la provincia geológica denominada "Faja Volcánica Mexicana (FVM)". Las emisiones volcánicas de carácter calcoalcalino emitidas a lo largo de toda la FVM han dado origen a conos de escoria y de cenizas, volcanes compuestos, volcanes en escudo, calderas y domos, además de sierras y cadenas montañosas, entre las cuales se han generado valles intermontanos, llanuras y cuencas.

En la FVM coexisten diferentes estructuras volcánicas de carácter calcoalcalino predominantemente (Demant & Robin, 1975) y de edad cuaternaria. Se acostumbra referirse a la FVM como una cadena montañosa de origen volcánico con orientación E-W, que atravieza el territorio mexicano desde el Océano Pacífico (costas de Jalisco y Nayarit) hasta el Golfo de México (región de los Tuxtlas, Veracruz.), *grosso modo* entre los paralelos 19° y 20° de longitud N con una longitud aproximada de 1000 km.

La FVM es uno de los arcos magmáticos continentales más complejos y variados de la región Circumpacífica que presenta rasgos peculiares como el no paralelismo con la Trinchera de Acapulco formando un ángulo aproximado de 15° con respecto a ésta (Molnar & Sykes, 1969). Se relaciona a la subducción de las Placas de Rivera y Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica (Demant, 1978; Urrutia-Fucugauchi y Del Castillo, 1977; Pardo y Suarez, 1995) y está compuesta de rocas andesíticas a dacíticas de tipo calcoalcalino.

Uno de los rasgos estructurales más visibles en la FVTM es la orientación de los volcanes monogenéticos alineados paralelamente, en una dirección

aproximada E-W y ENE-WSW. En cambio los estratovolcanes forman cadenas con rumbos N-S y NNW-SSE. La FVTM está deformada extensionalmente.

Un 10% de la cuenca se encuentra contenida en la Provincia "Sierra Madre del Sur (SMS)", que consiste en rocas metasedimentarias, cubiertas por rocas marinas mesozoicas y depósitos continentales terciarios. La Provincia SMS se caracteriza por presentar una serie de depresiones que son disecadas por un gran número de corrientes fluviales que han erosionado a rocas pre-terciarias, de poca coherencia, la Sierra de Soltepec resulta ser el único vestigio de esta provincia.

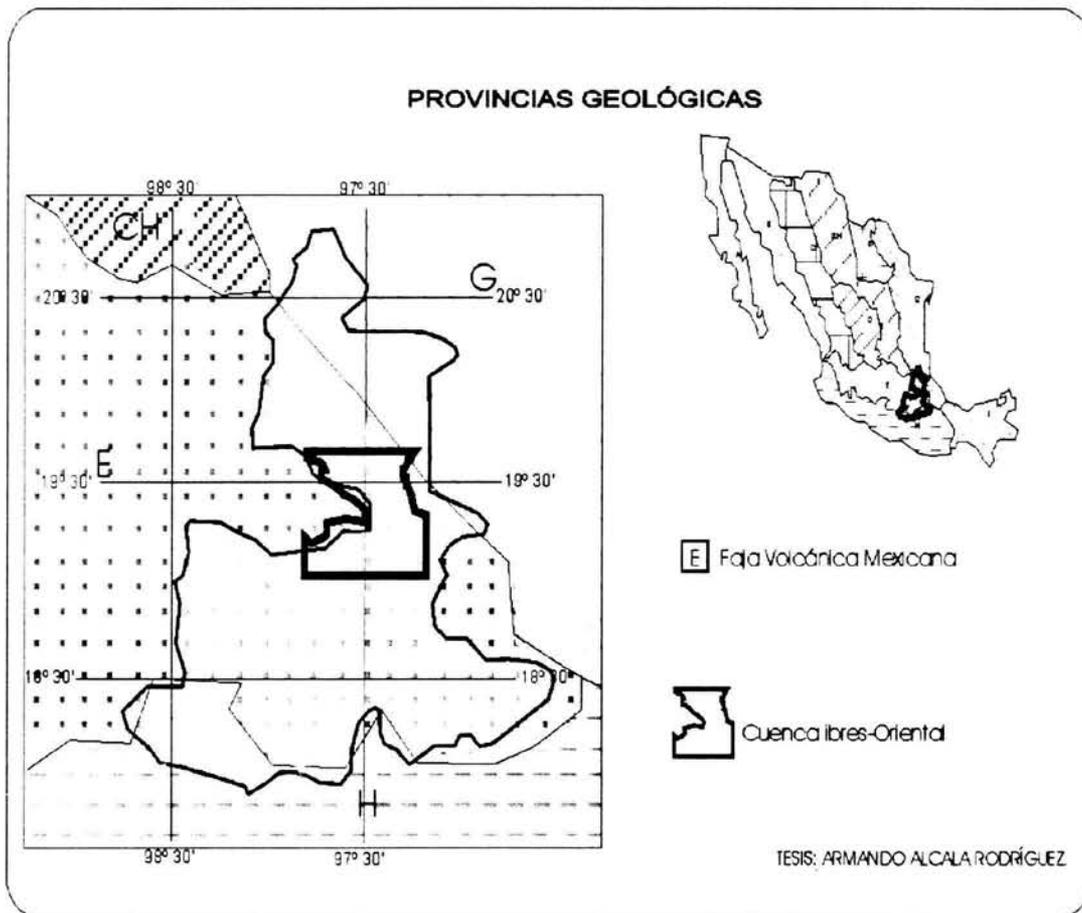


Figura 2: Provincias Geológicas

Geomorfológicamente se considera una cuenca cuyos límites naturales lo constituyen estructuras volcánicas y sierras tanto de composición volcánica como sedimentaria.

Al oriente, está delimitada por el Pico de Orizaba y el Cofre de Perote, los cuales presentan un patrón de drenaje radial, centrífugo y cuya densidad y profundidad de disección se intensifica en las laderas con pendientes abruptas, hasta desaparecer cuando la pendiente sea nula.

Al poniente, queda limitada por el Volcán La Malinche, cuyos continuos eventos generaron lavas y piroclastos de composición andesítica en su porción central y brechas volcánicas con piroclastos en las laderas. El patrón de drenaje es de tipo radial centrífugo con una densidad y profundidad de disección de drenaje moderada a alta en las zonas con fuerte pendiente y baja o nula a medida que se reduce la pendiente.

Al norte está limitada por la Caldera de los Humeros, compuesta por andesitas y tobas ignimbrizadas. El patrón de drenaje en las zonas altas esta pobremente desarrollado ya que la alta permeabilidad de los materiales piroclásticos favorece la infiltración.

Al noroeste, la Sierra de Tlaxco, se presenta como una alineación montañosa, compuesta por andesitas y tobas, cuyo drenaje es subdentrítico.

Al sur, la Sierra de Soltepec, estructura sedimentaria de composición calcárea, fuertemente plegada y afallada, que ha desarrollado cerros redondeados con drenaje moderado y cauces convexos, poco profundos.

Hacia el Centro de la Cuenca, se encuentra una planicie de origen lacustre, donde sobresalen algunos cerros y sierras aisladas de origen volcánico y sedimentario, así como vestigios de antiguas y extensas zonas lacustres. Asimismo se presentan cerros con pendientes abruptas y 6 lagos cráter (maars) amplios y extensos.

De acuerdo a la clasificación de Köpen-García, los climas predominantes en la Cuenca son el semiárido que se distribuye en la parte central y más baja de la misma a una altitud entre 2300 y 2400 msnm y el clima templado subhúmedo con lluvias en verano el cual rodea en forma concéntrica al clima semiárido. Hacia las partes altas el clima es de frío a muy frío.

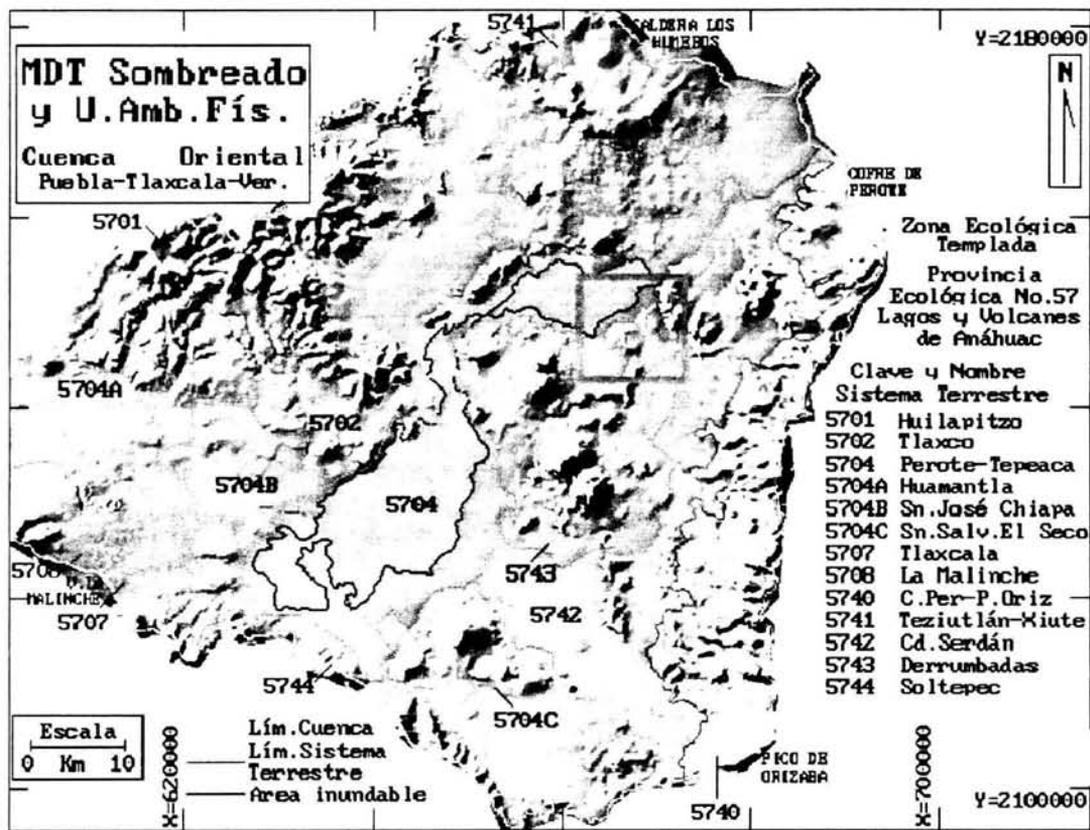


Figura 3: Modelo Digital del Terreno (tomada de: Referencia 2)

Libres-Oriental es considerada una cuenca endorreica por no tener salida al mar o hacia otras cuencas. La presencia de una litología impermeable que permite la infiltración de casi toda el agua que cae sobre ellas y la existencia de una topografía llana, que impide que las aguas circulen y definan cauces, favoreciendo el encharcamiento de los suelos son dos de las características que la califican como endorreica.

Pertenece a la Región Hidrológica Río Balsas RH-18, siendo el río Atoyac una de las corrientes principales y los ríos Alseseca, Huehuetlán, Laxamilpa y otros corrientes secundarias.

El sistema hidrológico superficial es prácticamente inexistente debido a que la mayor parte de la superficie de la cuenca presenta depósitos piroclásticos que favorecen una alta infiltración (Alcocer *et al*, 2004).

1.2. Hidromagmatismo.

El hidromagmatismo es un fenómeno natural producido por la interacción del magma como fuente de calor y una fuente externa de agua tal como un acuífero o una manifestación superficial (Mc. Donald 1972; Sheridan & Wholetz,1981).

Este fenómeno ocurre en magmas de cualquier composición produciendo eventos explosivos que varían desde eventos menores hasta secuencias eruptivas devastadoras. Hidromagmatismo, hidrovulcanismo o hidroexplosión son términos que se emplean para referirse al mismo fenómeno, interacción agua-magma.

El hidromagmatismo ocurre en cualquier ambiente sedimentario, ya sea marino somero, marino profundo, litoral, lacustre, freático, etc. En un ambiente freático, el hidromagmatismo ocurre cuando hay una interacción entre el magma y el agua subterránea produciendo explosiones y brechación de la roca encajonante.

1.2.1. Estructuras volcánicas asociadas al hidromagmatismo

Los maars, anillos de tobas y conos de tobas son cráteres volcánicos usualmente monogenéticos producidos por erupciones hidromagmáticas (Cas & Wright,1987).

Maar: El término Maar fue utilizado por primera vez en la región de Eifel, Alemania para denominar a las depresiones volcánicas o lagos-cráter de esa región. Se define como un cráter volcánico cortado dentro de la roca encajonante por debajo del nivel topográfico del relieve circundante que puede o no tener agua en su interior, posee bordes cuya altura es de algunos metros hasta cerca de 100 sobre el nivel topográfico anterior a la erupción, estos rodean al cráter y están formados por material piroclástico de diferentes tamaños El diámetro de estas estructuras varía de 100-3000 m y la profundidad oscila entre 10-200 m. Las paredes internas de los maars poseen pendientes muy pronunciadas que incluso alcanzan la vertical. Un maar se forma cuando el magma interactúa con el agua subterránea o superficial ocasionando eventos explosivos (Lorenz,1986).

Anillo de Tobas (Tuff Ring): Son cráteres volcánicos cortados en o sobre el nivel topográfico del relieve circundante. Están relacionados a la actividad hidromagnética somera ya que la energía de explosión que les dio origen no es lo suficientemente fuerte para penetrar la roca encajonante. Los clastos de roca encajonante eyectados no representan mas del 5 % del total del depósito. El diámetro de su cráter varía de 100 a 3000 m. y presenta pendientes suaves hacia afuera del cráter.

Cono de Tobas (Tuff Cone): Tienen bordes que llegan a alcanzar alturas de mas de 300 m. Difieren de los anillos de tobas por tener cráteres pequeños y paredes con pendientes muy pronunciadas hacia afuera. (Wolethz & Sheridan,1983).

1.2.2. Tipos de depósitos

Las explosiones volcánicas originadas por la interacción entre agua/magma forman depósitos característicos que pueden ser muy variados dependiendo del ambiente donde se llevan a cabo éstas y del grado de explosividad (Sheridan & Wolethz, 1983).

El movimiento del flujo piroclástico está controlado por la gravedad y, dependiendo de las variaciones en la topografía, genera estructuras diferentes en los depósitos.

Los depósitos de oleadas piroclásticas (*pyroclastic surge*) son flujos turbulentos con una baja concentración de partículas sólidas y una elevada concentración de gases y agua respecto a los sólidos. Las oleadas se mueven sobre la superficie del terreno a velocidades que van de los 100-200 m/s (Cas & Wright,1987) y pueden dividirse en oleadas piroclásticas basales (*base-surge*), oleadas tipo *ground-surge* y oleadas tipo *ash cloud-surge*.

Oleadas Piroclásticas Basales: Se originan en la base de la columna de erupción expandiéndose rápidamente en forma radial. Se distinguen dos tipos de oleadas piroclásticas dependiendo de la relación agua/magma (w/m): tipo húmedas (*wet surge*) ($w/m \geq 0,3$) y tipo secas (*dry surge*) ($w/m < 0,3$). Las estructuras más comunes son: estratificación cruzada, estratos deformados por caída de impactos balísticos, laminaciones, deformación por peso de estratos y relleno de canales (Fisher, 1987).

Oleadas tipo "ground surge": Están asociadas al movimiento de flujos piroclásticos y se forman por el colapso parcial de una columna eruptiva o proyectados desde el frente de avance de un flujo piroclástico. Usualmente no tienen más que algunos metros de espesor, están pobremente clasificados (Cas & Wright, 1987).

Oleadas tipo "ash-cloud surge": Se forman por encima de un flujo piroclástico a medida que el gas y ceniza fina son segregados del frente y la cima del flujo. Se presentan como láminas delgadas de ceniza y son difíciles de preservar en el registro geológico. La granulometría es principalmente de grano fino con lapilli. Están mejor clasificados que las oleadas basales y las oleadas tipo "ground surge" (Cas & Wright, 1987).

1.2.3. Estructuras primarias y su significado

Las estructuras típicas que se forman durante el depósito de oleadas piroclásticas son: laminaciones, gradación, "huellas de impacto, vesículas (Walker, 1971; Walker & Croasdale, 1971; Sparks et. al., 1973; Grove et. al., 1978; Rowley et. al., 1981; Fisher, 1979; Fisher et. al., 1981; Fisher, 1984).

Estratificación y laminación: Son estructuras muy comunes en este tipo de depósitos, presentan espesores de algunos milímetros hasta decenas de centímetros dispuestos de manera plano-paralela u ondulados; la mayoría tiene contactos bien definidos. La abundancia de capas delgadas aparentemente está relacionada al gran número de pulsos eruptivos emitidos en rápida sucesión (Fisher, 1984).

Laminación cruzada: Es una estratificación interna del depósito caracterizada por presentar laminaciones con ángulos diferentes respecto a la horizontal. Se forman por procesos de transporte turbulento, sujeto a cambios en la energía, duración y dirección de las oleadas. Estas estructuras pueden variar en longitud y amplitud (Fisher, 1984).

Lapilli acrecional: Es un componente característico de los depósitos piroclásticos constituido por agregados de ceniza que pueden o no tener en su núcleo un fragmento lítico. Son muy comunes en depósitos de caída de gran fino formando espesores de pocos centímetros. Cuando

los espesores son potentes (decenas de centímetros) puede indicar que la nube estaba enriquecida en agua y se trate de un depósito de oleada húmeda (*wet-surge*).

Gradación: Consiste en cambios verticales progresivos en el tamaño de grano o densidad de los fragmentos dentro del mismo estrato. Los tipos más comunes son la gradación normal e inversa, las cuales pueden interpretarse como parte de varios eventos deposicionales en un espacio muy corto de tiempo, o varios pulsos dentro de un mismo flujo.

"Huellas de impacto": Es un depósito deformado por la caída de balísticos arrojados desde la fuente de emisión. La deformación es comúnmente asimétrica en secciones estratigráficas paralelas a la trayectoria balística; en tanto que en secciones perpendiculares tiende a ser simétrica (Fisher, 1984). Los balísticos pueden ser de material juvenil o de roca encajonante.

Vesículas (burbujas de gas): Las vesículas son comunes en estratos de tobas hidroclásticas asociadas a maars (Lorenz, 1974). Se presentan como huecos subsféricos, generalmente menores de 1 mm. y rara vez exceden 1 cm. de diámetro.

1.3. Hidrogeología

Para poder comprender claramente el concepto de las redes de flujo partamos de la ecuación fundamental que define el movimiento de un fluido: La Ley de Darcy.

En 1856, un Ingeniero Hidráulico francés llamado Henry Darcy describe un experimento de laboratorio cuya finalidad era analizar el flujo de agua através de las arenas. El resultado de este experimento puede ser generalizado en la ley empírica que hoy lleva su nombre.

El dispositivo armado por Darcy era un cilindro de área A relleno de arena y provisto de dos tubos en los extremos que servían como entrada y salida del flujo y dos manómetros. Si consideramos un plano de referencia arbitrario ($z = 0$) la elevación de los manómetros está dada por z_1 y z_2 y la elevación de los niveles del fluido por h_1 y h_2 . La distancia que separa a los manómetros está dada por Δl , h_1 y h_2 representan la energía por unidad

de peso del fluido y, en el caso del agua, se llama *nivel piezométrico o carga hidráulica*.

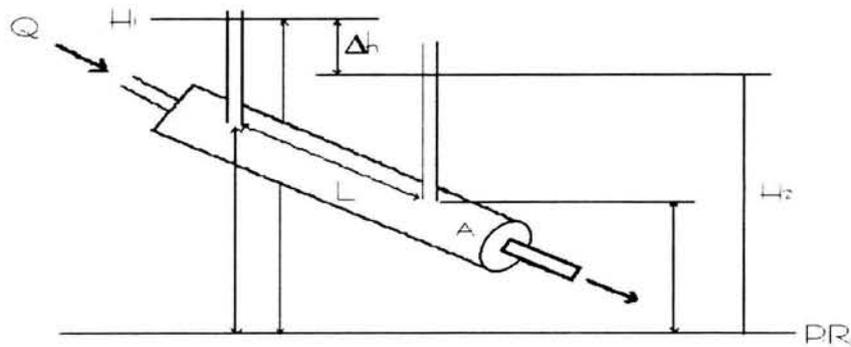


Figura 4: Experimento de Darcy

Podemos definir a la *descarga específica* (v) que pasa a través del cilindro como:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

Si las dimensiones de Q son $\left[\frac{L^3}{T}\right]$ y de A son $[L^2]$ las dimensiones de v son $\left[\frac{L}{T}\right]$, dimensiones de velocidad.

Darcy observó que el gasto Q que pasa por la sección transversal A es directamente proporcional a la *carga hidráulica* ($h_1 - h_2$) cuando Δl permanece constante e inversamente proporcional a la longitud del camino recorrido.

Si definimos a $\Delta h = h_2 - h_1$, tenemos que:

$$v \propto \Delta h \quad y \quad v \propto \frac{1}{\Delta l}$$

La Ley de Darcy puede escribirse como:

$$v = K \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

O en su forma diferencial:

$$v = K \frac{dh}{dl} \quad (2)$$

h es la carga hidráulica, $\frac{dh}{dl}$ es el gradiente hidráulico y K es una constante de proporcionalidad llamada *conductividad hidráulica* o *coeficiente de permeabilidad* y su valor depende del tipo de fluido y del medio poroso que se maneje, con valores altos para arenas y gravas y valores bajos para arcillas y otros tipos de rocas. Haciendo un análisis dimensional, K tiene dimensiones de $\left[\frac{L}{T}\right]$.

Otra alternativa de la Ley de Darcy se puede obtener sustituyendo la descarga específica y tenemos:

$$Q = -K \frac{dh}{dl} A \quad (3)$$

Y se puede reducir a:

$$Q = -KiA \quad (4)$$

donde i es el gradiente hidráulico.

Definición 1 *La Ley de Darcy establece que la velocidad o descarga específica (v) con que se mueve el agua en un medio poroso es el producto de la conductividad hidráulica por el gradiente hidráulico.*

1.3.1. Red de Flujo

El conocimiento de la distribución de la carga hidráulica en un acuífero, aporta la información necesaria para determinar las direcciones preferenciales de movimiento del agua subterránea.

Una red de flujo es un gráfico bidimensional compuesto por dos familias de curvas ortogonales entre sí: *las líneas de corriente o líneas de flujo*, las cuales indican la trayectoria del movimiento del agua, y *las líneas equipotenciales*, que unen los puntos de igual potencial o carga hidráulica (Davis & de Wiest, 1971).

El empleo de las redes de flujo está limitado a la investigación de secciones bidimensionales que sean representativas del movimiento en el medio poroso y al análisis de problemas tridimensionales que presenten simetría axial o radial. La primera aplicación de una red de flujo la hizo Forchheimer en 1914 para estudiar las fugas de agua por debajo de una presa de hormigón (Davis & de Wiest, 1971).

Si consideramos un volumen unitario de un medio poroso como el que se muestra en la figura, llamado también *volumen de control elemental (VCE)*. La ley de la conservación de la masa para un flujo estable que circula a través de un medio poroso saturado enuncia que el total del fluido que entra al *VCE* es igual al que sale de él.

La *Ecuación de Continuidad* transforma la *Ley de la Conservación de la masa* en lenguaje matemático:

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

ρv representa la cantidad de masa del fluido que pasa a través de una sección transversal del *VCE*.

Si el fluido es incompresible:

$$\rho(x, y, z) = cte$$

y pueden ser removidos de la ecuación:

$$-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

Si sustituimos la ecuación de Darcy, obtenemos la ecuación de flujo en régimen estacionario através de un medio poroso anisotrópico saturado:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial h}{\partial z}) = 0 \quad (7)$$

Para un medio isotrópico:

$$K_x = K_y = K_z$$

Y si es un medio homogéneo, entonces:

$$K(x, y, z) = cte$$

Por lo que la ecuación se reduce a:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

Esta ecuación es una de las ecuaciones diferenciales parciales básicas llamada *Ecuación de Laplace*; su solución es una función de la forma $h(x, y, z)$ que describe el valor de la *carga hidráulica* h de cualquier punto en un flujo tridimensional.

La solución de la *Ecuación de Laplace* nos permite generar un mapa de curvas equipotenciales o de igual *carga hidráulica* (h) y sor consiguiente las líneas de flujo.

Si consideramos un flujo en estado estacionario en un campo bidimensional descrito en un plano xz la solución será una función de la forma:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (9)$$

Esta es la ecuación base para la construcción de las Redes de Flujo.

2. METODOLOGÍA

Se programaron cuatro salidas a campo del mes de Febrero a Mayo de 2004 con la finalidad de obtener los datos necesarios para la construcción de la red de flujo y la columna estratigráfica. La metodología adoptada para este trabajo se detalla a continuación:

2.1. Hidrología Subterránea

Se hizo un reconocimiento de la zona abarcando una área de 130 km² cubriendo los lagos-cráter de Alchichica, Quechulac, La Preciosa o Las Minas (clasificados por Gasca, 1981 como los axalapascos del sector Norte de la Cuenca) y las poblaciones de San José Alchichica, Zalayeta, Ex-Hacienda San Antonio, Techachalco, Itzoteno, Chichicautla y San Antonio Buenavista con el propósito de ubicar los aprovechamientos que se encuentran en el área.

Se levantó el censo de los aprovechamientos localizados en el área de estudio incluyendo ubicación de los mismos con coordenadas geográficas, medición del nivel estático, medición de conductividad eléctrica en algunos casos y datos históricos de los pozos (fecha de perforación, temporada de operación al año, horas de operación por día, tipo de bomba, uso, etc.).

Se localizaron tres bancos de nivel ubicados en las poblaciones de San José Alchichica, Zalayeta e Itzoteno para correr las nivelaciones hacia los brocales de pozos y norias que están rodeando al lago-cráter Alchichica.

El primer método utilizado para correr las nivelaciones fue el de Doble Nivelación Diferencial. Este método consiste en determinar la diferencia de nivel entre dos puntos empleando en este caso un nivel marca Luft modelo B-2, un tripié y un par de estadales.

Para distancias largas entre el banco de nivel y los brocales de los pozos, se eligieron puntos intermedios A_2, A_3, A_4 , tales que colocando el instrumento en I_1, I_2, I_3 , a la mitad de las distancias entre A_1 y A_2 , entre A_2 y A_3 y entre A_3 y A_4 , se podían visualizar los dos estadales para realizar las lecturas hasta llegar al punto de interés (Ver figura 1).

La nivelación se llevó a cabo tomando lecturas al milímetro y siguiendo el método de doble altura del aparato para comprobar las lecturas. La tolerancia para el error de cierre se calcula con la siguiente expresión:

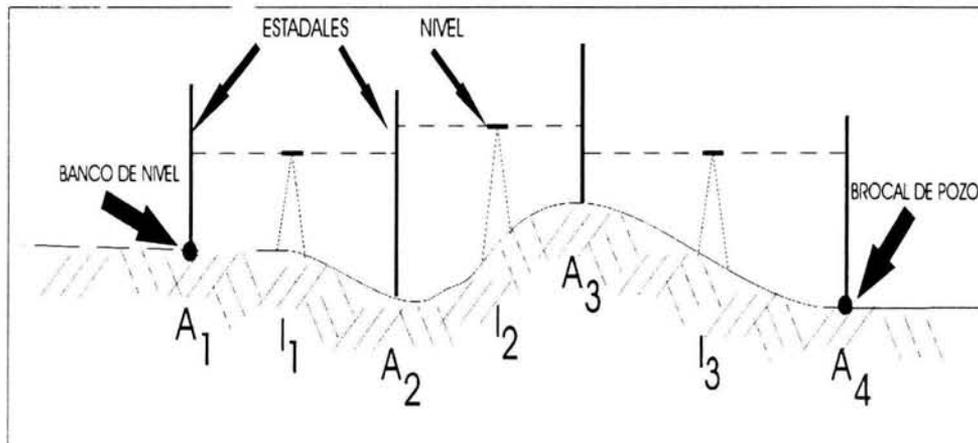


Figura 5: Nivelación diferencial con tres puntos de liga

$$T = \pm 10N^{0,5}$$

en donde T es la Tolerancia en mm y N el número de km nivelados.

Se continuó la nivelación de brocales con una Estación Total marca Luft con el propósito de ampliar más la red y contar con un mayor número de datos. También, se obtuvieron las elevaciones de cuatro puntos localizados a la orilla del lago-cráter Alchichica que en un futuro servirán como estaciones de monitoreo del nivel del agua del lago.

Se realizó un levantamiento con GPS Diferencial, con el objeto de georeferenciar los lagos de Quechulac y La Preciosa. Se utilizó la técnica de fast static obteniendo las coordenadas geográficas de cada uno.

Esta técnica se implementó colocando un receptor fijo (base) en el muelle del Lago-Cráter Alchichica con el cual se tomaron datos durante todo el día mientras un segundo instrumento móvil (rover) se colocó a la orilla de cada lago y se esperó un lapso de una hora para cada lugar para tratar de minimizar el error. Para obtener las coordenadas es necesario que los dos instrumentos (la base y el rover) capten al menos cuatro satélites al mismo tiempo. Posteriormente los datos captados por los instrumentos son procesados . Este proceso permite evaluar la calidad de los datos.

2.2. Geología

Se hizo una descripción estratigráfica a detalle de la pared S-SE del cráter donde se observa una secuencia de oleadas piroclásticas que ayudarán a reconstruir los eventos que dieron origen al *maar* de Alchichica.

El municipio de Salayeta, Ver. solicitó a la CNA un permiso para la perforación de un pozo profundo como reposición de otro perforado ya hace más de 10 años que está actualmente clausurado. El sitio de perforación se encuentra a aproximadamente 500 m adelante de la desviación del camino de terracería que conecta a la ranchería El Riego y de acuerdo al censo de aprovechamientos, el sitio corresponde al marcado como TA-17

El método de perforación utilizado fue tipo Percusión usando una perforadora marca SPEED STAR. Las condiciones litológicas del subsuelo y la profundidad del nivel estático favorecieron la aplicación de éste método ya que el material piroclástico poco consolidado que abunda en esa zona no opone mucha resistencia para ser triturado, además de que el nivel estático se encuentra aproximadamente a los 14 m.

Se consiguieron las muestras de roca triturada (recorte) que la Cía. Perforadora recuperó cada dos metros perforados y que sirve como testigo del material que se ha encontrado para establecer una clasificación del mismo y determinar los cambios litológicos significativos. Este material se analizó microscópicamente y macroscópicamente para determinar cambios litológicos importantes y construir la columna estratigráfica. Cabe mencionar que el objetivo de este análisis es conocer el espesor de los depósitos piroclásticos e identificar la profundidad del basamento.

Se correlacionará la descripción de la secuencia piroclástica con las muestras correspondientes obtenidas de la perforación y se armará la columna estratigráfica a 100 m de profundidad.

Se inspeccionaron norias profundas para tratar de estimar el paquete de depósitos piroclásticos y encontrar el basamento. Tal es el caso de la noria TA-50 ubicada al NE del cráter, excavada a 20 m. de profundidad con una abertura de 1.5 m. x 1.5 m.

Se propondrá el esquema de funcionamiento del acuífero con base en a la secuencia estratigráfica construida y en la distribución de salinidades en la zona.

3. RESULTADOS

3.1. Hidrogeología

Se censaron 51 aprovechamientos cuyos datos obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

REGISTRO No.	POZO No.	Coordenadas UTM		NIVEL ESTÁTICO (m)	LOCALIDAD	MUNICIPIO	FECHA DEL CENSO
		LONG. OESTE	LAT. NORTE				
TA-38	S/R	669227	2139912	8.29	Quechulac	Gpe Victoria Pue.	24-Ene-04
TA-39	S/R	668131	2141267	N.D.	Quechulac	Gpe Victoria Pue.	24-Ene-04
TA-40	PAP: S/R	672107	2142924	17.37	El Tecolote	Perote, Ver.	24-Ene-04
TA-41	PAP: #38 CNA?	672227	2143120	N.D.	El Tecolote	Perote, Ver.	24-Ene-04
TA-42	S/R	662426	2143265	23.14	Techachalco	Tepeyahualco, Pue.	24-Ene-04
TA-43	N S/R	663182	2145746	3.5	Izoteno	Tepeyahualco, Pue.	24-Ene-04
TA-44	N S/R	663554	2145746	Sin Dato	Izoteno	Tepeyahualco, Pue.	24-Ene-04
TA-45	#7 SRH/CFE-157	668103	2151283	Sin Dato	San José Alchichica	Puebla	24-Ene-04
TA-46	#12 SARH/ SIMA 29	669296	2151655	Sin Dato	San José Alchichica	Puebla	25-Ene-04
TA-47	S/R	669021	2149921	Sin Dato	San José Alchichica	Puebla	25-Ene-04
TA-48	N S/R	668813	2151897	5.9	San José Alchichica	Puebla	25-Ene-04
TA-49	N S/R	667797	2151069	4.28	San José Alchichica	Puebla	25-Ene-04
TA-50	N S/R	667293	2149154	12.04	San José Alchichica	Puebla	25-Ene-04
TA-51	N S/R	669140	2150205	8.82	San José Alchichica	Puebla	25-Ene-04

Figura 6: Censo de aprovechamientos de agua subterránea

CUENCA LIBRES-ORIENTAL, ESTADO DE PUEBLA.
Censo de los pozos visitados.

REGISTRO No.	POZO No.	Coordenadas UTM		NIVEL ESTÁTICO (m)	LOCALIDAD	MUNICIPIO	FECHA DEL CENSO
		LONG. OESTE	LAT. NORTE				
TA-3 N	N-193/GI-024/ZA-263	665366	2149206	Sin Date	El Salado		21-Ene-04
TA-4 N	S/N	664379	2149141	5.8	El Salado		21-Ene-04
TA-5	SIMAN 34	669540	2150654	8.49	San José Alcichica	Puebla	21-Ene-04
TA-5	# (verbal)	669982	2149256	12.44	San José Alcichica	Puebla	21-Ene-04
TA-7 PA3	Pozo #26	671378	2147156	N.D.	San José Alcichica	Puebla	21-Ene-04
TA-3	#21 CNA/GZA-BACFE 150	671246	2147537	22.9	San José Alcichica	Puebla	21-Ene-04
TA-3	#24 CNA/GZA-39/Ver-1039	669708	2146858	Sin Date	San José Alcichica	Puebla	22-Ene-04
TA-10	#20 CNA/GZA-22	670362	2146921	12.01	Zalaya	Perote, Ver.	22-Ene-04
TA-11	#19 CNA/CFE 149/GZA 2C	670508	2147226	15.7	Zalaya	Perote, Ver.	22-Ene-04
TA-12	3H33	670302	2146230	11.17	Zalaya	Perote, Ver.	22-Ene-04
TA-13	#29 CNA/CFE 1E2	672761	2146635	16.53	Xaltepec	Perote, Ver.	22-Ene-04
TA-14	#1 (local)	672312	2146371	9.82	Xaltepec	Perote, Ver.	22-Ene-04
TA-15	#80 CNA	670289	2146378	11.74	Xaltepec	Perote, Ver.	22-Ene-04
TA-16	#28 CNA	669493	2146522	N.D.	Zalaya	Perote, Ver.	22-Ene-04
TA-17	Pozo nuevo	668934	214619	14.15	Zalaya	Perote, Ver.	22-Ene-04
TA-18	#3 (local)	665548	2146428	Sin Date	Izobleno	Tepeyahualco	22-Ene-04
TA-19	#2 (local)	666355	2146054	Sin Date	Izobleno	Tepeyahualco	22-Ene-04
TA-20	#4 (local)	665316	2145026	Sin Date	Izobleno	Tepeyahualco	22-Ene-04
TA-21	#1 (local)	666511	2145578	26.45	Izobleno	Tepeyahualco	22-Ene-04
TA-22	#3 CNA/GI-807	669427	2144122	26.45	Chichicuailla	Tepeyahualco	23-Ene-04
TA-23	#2 CNA?	670433	2143939	7.8	Chichicuailla	Tepeyahualco	23-Ene-04
TA-24	3H05	670360	2144010	N.D.	Chichicuailla	Tepeyahualco	23-Ene-04
TA-25	#8 CNA/CFE 130	670304	2144356	10.04	Chichicuailla	Tepeyahualco	23-Ene-04
TA-26	#4 CNA?GI-811/SMA 48/CFE-131	670553	2144742	Sin Date	Chichicuailla	Tepeyahualco	23-Ene-04
TA-27	#5 CNA/CFE-132	669396	2144939	9.82	Chichicuailla	Tepeyahualco	23-Ene-04
TA-28	#6 CNA/CFE-133	669313	2145036	Sin Date	Chichicuailla	Tepeyahualco	23-Ene-04
TA-29	#9 CNA/CFE-134/GI-806	669437	2144511	9.72	Chichicuailla	Tepeyahualco	23-Ene-04
TA-30 N	S/R	669228	2150532	8.65	Zalaya	Perote, Ver.	23-Ene-04
TA-31	S/R	672301	2141134	14.14	Quecualac	Spe Victoria Pue	23-Ene-04
TA-32	S/R	672243	2141611	10.63	Quecualac	Spe Victoria Pue.	23-Ene-04
TA-33	S/R	673348	2142631	19.57	Quecualac	Spe Victoria Pue.	23-Ene-04
TA-34	S/R	673586	2142739	31.2	Quecualac	Spe Victoria Pue	23-Ene-04
TA-35	S/R	675336	2141934	61.77	Quecualac	Spe Victoria Pue.	23-Ene-04
TA-36	S/R	671543	2159530	N.D.	Quecualac	Spe Victoria Pue	24-Ene-04
TA-37	GI829/SARF-10	669355	2140278	Sin Date	Quecualac	Spe Victoria Pue.	24-Ene-04

Figura 7: continuación censo de aprovechamientos.

CUENCA LIBRES-ORIENTAL. ESTADO DE PUEBLA.
Censo de los pozos visitados.

REGISTRO No.		NIVEL ESTÁTICO (m)	OBSERVACIONES
TA-3	N		Noria excavada, aprox. 8 m. de prof, le colocaron una bomba de 4 hp Se observa un corte de tobas arenosas en capas delgadas
TA-4	N	5.8	Noria excavada, aprox. 6 m. de prof, le colocaron una bomba. El agua se bombea hacia el NE. Fotos 11,12,13.
TA-5		8.49	Inactivo desde hace 2 años, transformador inoperante. Foto 14.
TA-6		12.44	Pozo que aparentemente esta en condiciones de funcionar. Foto 15
TA-7	PAP	N.D.	Estaba trabajando al momento de sondear,, trabaje 6 hs en la mañana y 2 en la tarde, caudal aproximado 80 lps., mucha grasa, bomba tipo vertical. Foto 16,17.
TA-8		22.9	Inactivo por el momento, solo opera en época de sequía. Foto 18. Bomba tipo vertical.
TA-9		Sin Dato	No se pudo sondear porque el acceso tiene candado y no se pudo entrar. La ubicación se marcó en el mapa.
TA-10		12.01	Bomba tipo vertical, el cabezal está limpio. Pozo inactivo. Se tomaron fotos del pozo, horizonte arenoso en el corte de la noria y una vista gral de la noria (F- 19,20,21)
TA-11		15.7	Pozo inactivo, bomba tipo vertical, Existe una placa que dice Unidad de bombeo: "Zalayeta 4 y 5" 1976, CHECAR SI ES POZO PILOTO. Foto 22.
TA-12		11.17	Pozo inactivo, bomba sumergible. Foto 23
TA-13		16.53	Bomba tipo vertical, pozo inactivo, el cabezal esta libre de grasa. Foto 26.
TA-14		9.82	"Perros" Delfino Mata es el Pocero, el pozo trabaja todo el año 20 horas diarias. A la descarga arroja tubo lleno, aprox 36 lps. APTO PARA PB. Foto 27.
TA-15		11.74	Pozo inactivo, bomba tipo vertical. Cabezal en buen edo, libre de grasa. Foto 29
TA-16		N.D.	Bomba tipo vertical, el cabezal esta libre de grasa, existe una placa: SRH 1968. APTO PARA PB. Foto 30.
TA-17		14.16	EL pozo esta en construcción, Cia Perf. Grupo LARRA, Resp: Ing. Antonio Glez. Perforista Eustacio Aguilar. Llevan 55 m perforados por el momento. Foto 31
TA-18		Sin Dato	No se pudo sondear, mucho aceite en el interior del pozo, está entubado y no tiene bomba. Foto 32.
TA-19		Sin Dato	No se pudo sondear, se metió la sonda de 90 m. y no se detectó agua. Se sondeo por 2a vez y a los 40-60 m se atora. Bomba muy potente (150 hp). Foto 33.
TA-20		Sin Dato	Muy reducido el espacio entre el brocal y el cabezal, no se pudo meter la sonda. Foto 34.
TA-21		26.45	Pozo de riego, bomba tipo vertical. Foto 35.
TA-22		26.45	Construido desde 1975, trabaja 8-9 horas diarias, APTO PARA PB, Comisariado lejidal de Chichicauautla Antonio Lopez. Foto 36.
TA-23		7.8	Construido en 1975, sin bomba, la columna de bombeo la están cambiando. Foto 37.
TA-24	PAP	N.D.	Pozo de agua potable que surte a Itzoteno, Tepeyahualco, Chichicauautla. Bomba tipo sumergible, APTO PARA PB. Pozo de muy buen caudal.
TA-25		10.04	Pozo inactivo, bomba tipo vertical, cabezal en buen edo y limpio. Foto 0 (2° rollo). Perforado en el 75-80, bombean 8-9 hs. Diarias de marzo a sep.
TA-26		Sin Dato	No se pudo sondear porque tiene una gran cantidad de aceite Foto 1. Perforado en el 75-80, bombean 8-9 hs. Diarias de marzo a sep.
TA-27		9.82	Pozo inactivo, bomba tipo vertical, cabezal en buen edo y limpio. Foto 2. Perforado en el 75-80, bombean 8-9 hs. Diarias de marzo a sep.

Figura 8: Censo de aprovechamientos de agua subterránea.

TA-28		Sin Dato	No se pudo sondear porque no tiene orificio de entrada el cabezal. Foto 3. Perforado en el 75-80, bombean 8-9 hs. Diarias de marzo a sep.
TA-29		9.72	Pozo inactivo, bomba tipo vertical, cabezal en buen edo y limpio. Foto 4, Perforado en el 75-80, bombean 8-9 hs. Diarias de marzo a sep.
TA-30		8.65	pozo de agua salobre, noria excavada a mano, existe un banco de nivel que está a un lado de la caseta de Carrocerías 3 Hnos. (#14823 fecha 07-94) Dueño: Sergio Moreno. Fotos: 5 (Caseta B.N.) 6 (Placa del B.N.) 7 (Noria)
TA-31		14.14	Pozo pequeño cercano a quechulac, Bomba tipo vertical Foto 8 y 9 (vista del corte) Foto 10 Acercamiento de los eventos de caída (escala: mercador)
TA-32		10.68	Bomba Sumergible. Foto 11 (de lejos), Evelio González pocero de Quechulac.
TA-33		19.57	Bomba sumergible, APTO PARA PB. La primera visita no se sondeó porque estaba trabajando. Se sondeó 20 min. Después de haber sido parado el pozo. Presidente ejidal: Octavio Domínguez Domínguez. Foto 12.
TA-34		31.2	Pozo parado desde hace 2-3 años por falta de arrancador. Foto 13.
TA-35		61.77	Pozo inactivo, bomba tipo vertical, cabezal en buen edo y limpio. Sin foto.
TA-36		N.D.	Bomba tipo sumergible, APTO PARA PB. el sondeo se inició 3 hrs. después de arrancar el pozo. Foto 14.
TA-37		Sin Dato	No se pudo sondear, no hay orificio para meter la sonda. Bomba tipo vertical. Foto 16 (Vista de la Preciosa--)
TA-38		8.29	Pozo de agua salada, bomba tipo vertical. Foto 17
TA-39		N.D.	Funcionando desde Oct del 99, APTO PARA PB. bomba tipo vertical, Enc. Del Pozo: Manuel García y Juan Flores, Foto 18.
TA-40	PAP	17.37	Pozo de AP del Aytto de Gpe Victoria, bomba tipo sumergible. Foto 19
TA-41	PAP	N.D.	Pozo de AP del Aytto de Gpe Victoria, bomba tipo sumergible. Foto 20. Este pozo surte al Tecolote y Xaltepec.
TA-42		23.14	Pozo abandonado ubicado en los linderos de las tierras de Pascual, el pozo está entubado y sin bomba, el pozo salió improductivo?, se tomó muestra de agua para análisis de agua. Hay otro pozo abandonado como a 700 m. de éste. Foto 21
TA-43	N	3.5	Noria con bomba sumergible con columna compuesta por 2 tramos de 2 m. APTO PARA PB. Trabajando el pozo baja 1.70 m el nivel (verbal) Se tomó muestra de agua para análisis. Propietario Roberto Martínez. Foto 22
TA-44	N	5.55 (verbal)	Noria con una profundidad hasta la boca de la noria de 2.95 y de la boca al espejo 2.6 m (verbal). Se obs. Manchas blancas salinosas entre los horizontes. Está entubado. Fotos 23 y 24.
TA-45		Sin Dato	No se pudo sondear orque a los 10 m aprox. se encontró aceite. Foto 25.
TA-46		Sin Dato	No se pudo sondear porque el orificio está muy pequeño y se puede atorar la sonda. Foto 26.
TA-47		Sin Dato	Pozo ubicado en el Rancho La Victoria de Alchichica Calle San Antonio s/n esq. J.O. De Domínguez. El pozo estaba cerrado y no se tuvo acceso. Llamarle al dueño a Puebla. Juan Monterrosas Chávez 01 (222) 2-35-59-67. Sin Foto.
TA-48	N	5.9	Antiguo invernadero, de agua salobre (verbal). Existe un corte litológico de tobas arenosas. Foto 27.
TA-49	N	4.28	Pozo noria junto a un camper de redilas en buen edo en la propiedad de Eladio Moreno Agua salobre. La noria está cubierta con láminas y candado. Foto 28
TA-50	N	12.04	Noria de agua salada junto a una carrocería en mal edo. cerca del rancho la Concordia No tiene bomba. Se tomaron muestras del corte litológico de la noria. Foto 29.
TA-51	N	8.82	Noria ubicada atrás de la marmolera de Alchichica, en la propiedad de Adalberto Mtz. Tiene Bomba. Foto 30.

Figura 9: Continuación censo de aprovechamientos.

Se seleccionaron 11 aprovechamientos que estuvieran distribuidos alrededor del lago para correr la nivelación hacia cada uno de ellos y obtener la elevación del nivel estático referenciado al nivel medio del mar. La nivelación se corrió usando los métodos de doble nivelación diferencial y estación total.

La siguiente tabla muestra los datos de elevación de nivel estático obtenidos y para cada caso se especifica el tipo de aprovechamiento nivelado.

N:Noria	P:Pozo	ELEVACIÓN [msnm]
TA-3	N	2316.93
TA-4	N	2316.74
TA-50	P	2317.08
TA-9	P	2320.54
TA-10	P	2320.08
TA-11a	P	2319.94
TA-12	P	2322.07
TA-16	P	2321.03
TA-17	P	2320.98
TA-21	P	2319.01
TA-52	P	2321.80

De igual manera, se corrió la nivelación hacia cuatro puntos ubicados en la orilla del lago, cuyas elevaciones se muestran a continuación. Cabe señalar que estos puntos sirvan como estaciones de monitoreo permanente del nivel de agua del lago Alchichica.

ESTACIÓN	ELEVACIÓN (msnm)
R-1	2317.59
R-2	2317.52
R-3	2317.56
R-4	2317.53

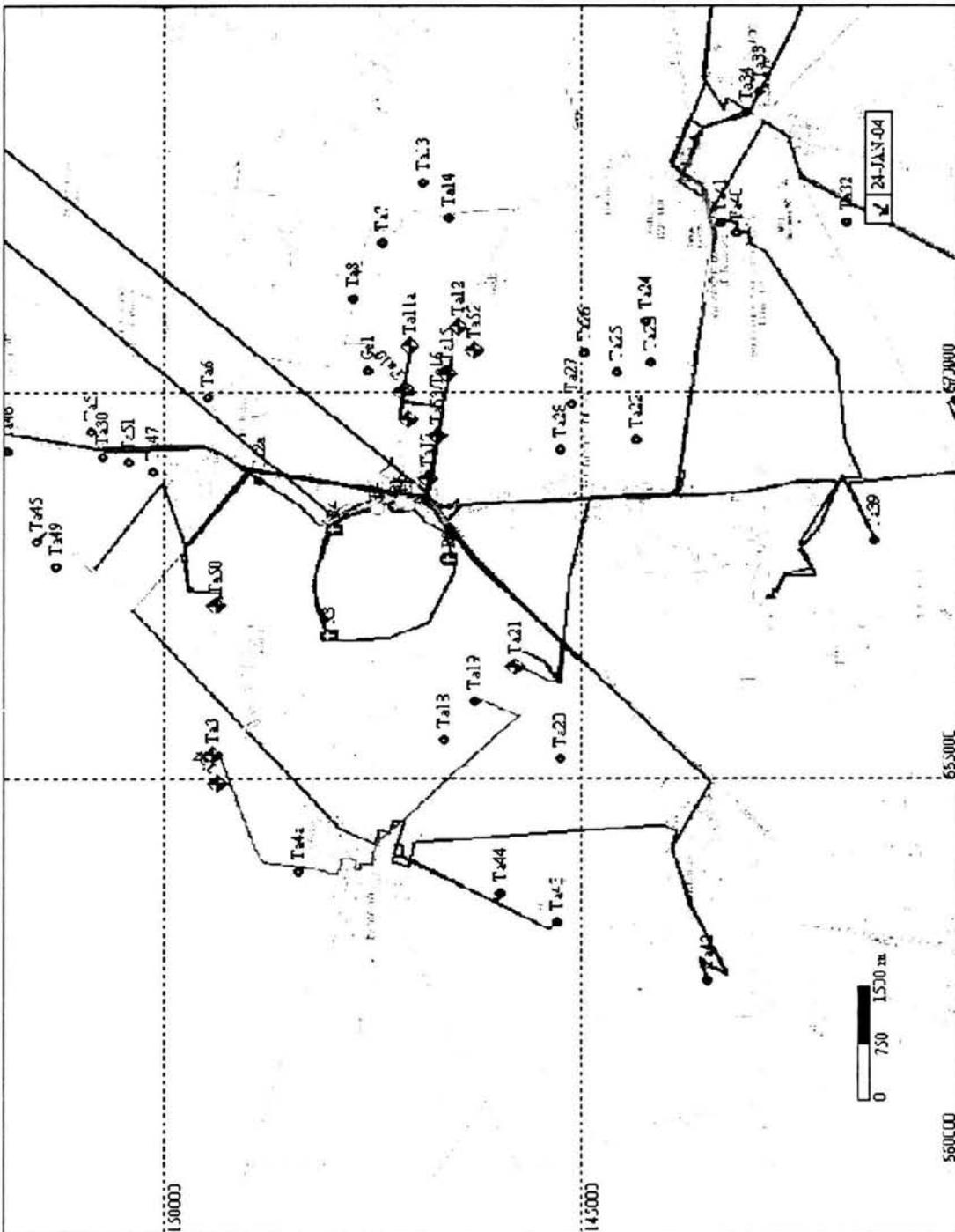


Figura 10: Ubicación de los pozos censados.

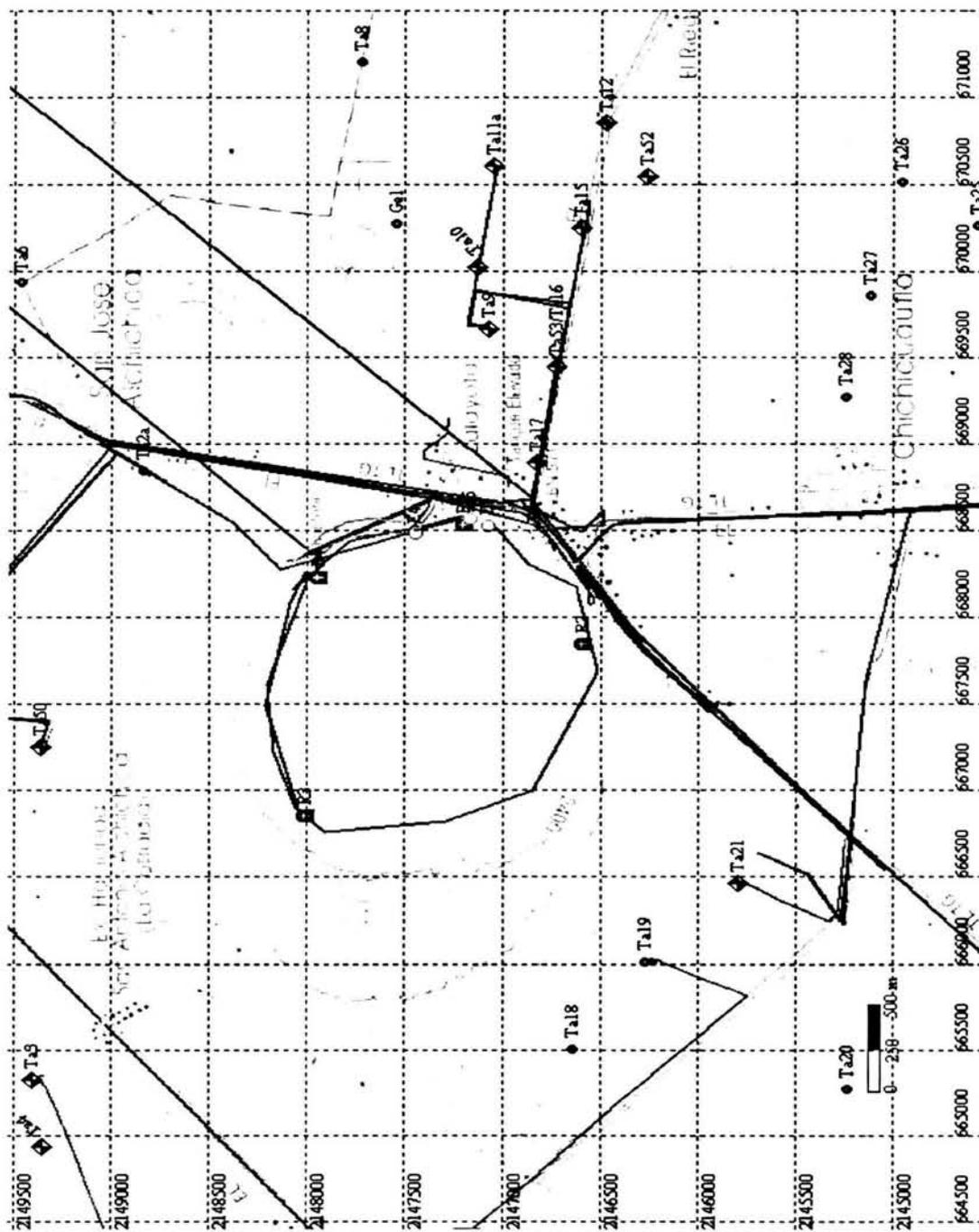


Figura 11: Los brocales de pozos nivelados y norias se muestran con rombos y las 4 estaciones de monitoreo del lago con cruces.

Los datos de elevación del nivel estático y coordenadas UTM obtenidos para cada aprovechamiento se vaciaron en una base de datos que posteriormente fue procesada en el paquete SURFER versión 7.0, generando la configuración de la Red de Flujo siguiente:

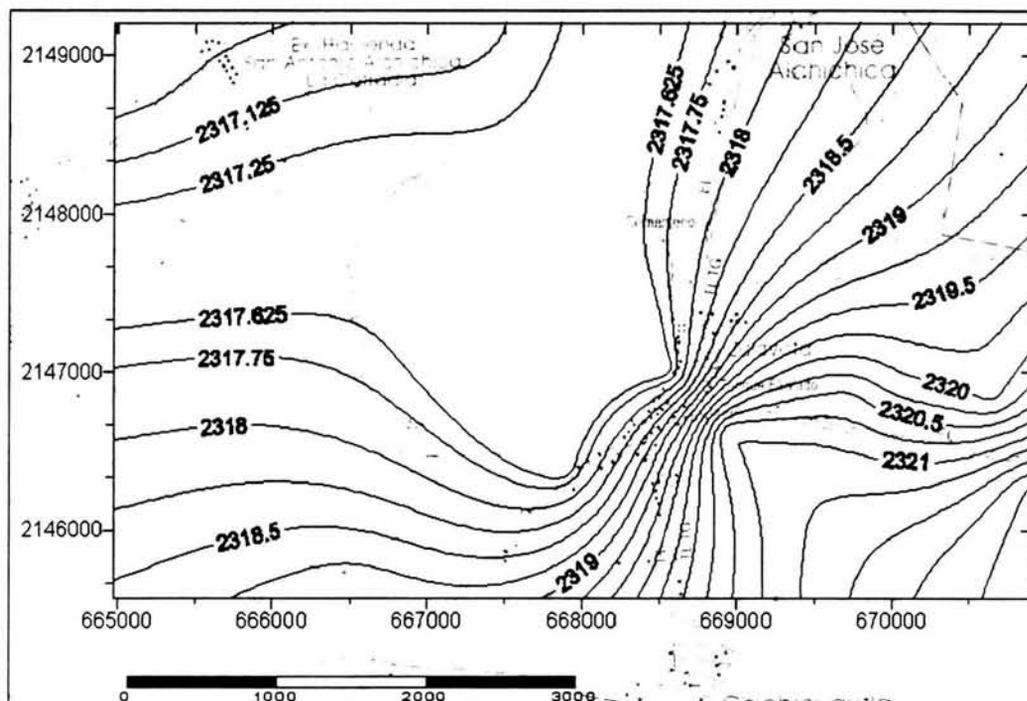


Figura 12: Red de Flujo

Se calculó el balance hidrológico en la zona del lago cráter Alchichica, definida por la ecuación:

$$E - S = \Delta V \quad (10)$$

donde E y S son las entradas y salidas del sistema, respectivamente, y ΔV representa el cambio en el almacenamiento.

Para calcular el volumen de agua subterránea que entra y sale del lago se definió un canal de flujo para cada caso, ambos limitados por dos líneas de corriente y dos líneas de flujo.

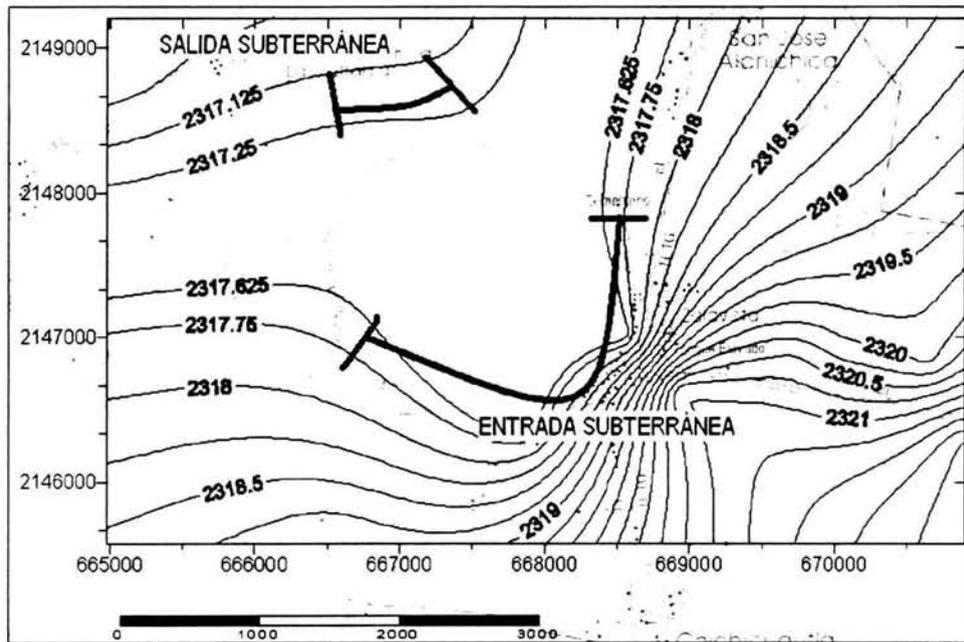


Figura 13: Canales de flujo de entrada y salida de agua subterránea

Partiendo de la ecuación (4) y siendo Q el caudal [$m^3/año$], K la conductividad hidráulica en [m/s], i el gradiente hidráulico [adimensional] y A el área en [m^2], tenemos que:

$$i = \frac{h_2 - h_1}{\Delta l}$$

De la Red de Flujo obtenemos los valores de:

$$h_2 = 2317.625m$$

$$h_1 = 2317.75m$$

$$\Delta l_{prom} = 140m$$

Por tanto:

$$i = 8.923 * 10^{-4} \tag{11}$$

Para calcular el área:

$$A = B * M \quad (12)$$

Donde B es el espesor y M el ancho del canal de flujo.

Considerando que el espesor de la zona captada por el cuerpo del lago es igual a la profundidad máxima del mismo, tenemos que:

$$B = 65m$$

y

$$M = 3300m$$

Por tanto:

$$A = 214500m^2 \quad (13)$$

Si consideramos el valor de la conductividad hidráulica como el valor promedio para las arena media tenemos que:

$$K = 1.65 * 10^{-2} \frac{m}{s} \quad (14)$$

Sustituyendo los valores de 11, 13 y 14 en 4 tenemos que:

$$Q_{Entrada\ sub.} = 993,384 \frac{m^3}{año}$$
$$Q_{Entrada\ sub.} \approx 1 * 10^6 \frac{m^3}{año} \quad (15)$$

De igual forma se calcula el caudal de salida subterránea Q_{salida} con los siguientes datos:

$$h_2 = 2317.125m$$

$$h_1 = 2317.25m$$

$$\Delta l_{prom} = 375m$$

Por tanto:

$$i = 3.333 * 10^{-4} \quad (16)$$

Si

$B = 65m$ y $M = 1062.5m$ entonces :

$$A = 69062.5m^2 \quad (17)$$

y

$$K = 1.65 * 10^{-4} \frac{m}{s} \quad (18)$$

Por tanto:

$$Q_{Salida\ sub.} = 119,667.737 \frac{m^3}{a\tilde{n}o}$$
$$Q_{Salida\ sub.} \approx 0.1 * 10^6 \frac{m^3}{a\tilde{n}o} \quad (19)$$

Para calcular la tasa de precipitación de la zona de estudio, se consultaron los registros históricos de precipitación pluvial anual de las estaciones meteorológicas de Zalayeta y Alchichica pertenecientes a la CNA, del año 1966 hasta el 1997 y se trabajó con el valor promedio resultante. De acuerdo al trabajo de Meneses (2002) el área del lago Alchichica es de $2,296 * 10^6 m^2$.

El volumen de agua que precipita en el lago esta dado por:

$$V_{Precip.\ pluvial} = Precip.\ promedio * Area$$

Si

$$Precip.\ promedio = 0.844 \frac{m}{a\tilde{n}o}$$

$$Area = 2.296 * 10^6 m^2$$

Entonces

$$V_{Precip.\ pluvial} = 1,937,824 \frac{m^3}{a\tilde{n}o}$$
$$V_{Precip.\ pluvial} \approx 1.9 * 10^6 \frac{m^3}{a\tilde{n}o} \quad (20)$$

De igual manera se calcula el volumen de agua que se evapora en el lago consultando datos históricos de evaporación registrados en las estaciones meteorológicas citadas anteriormente del año 1966 a 1999, obteniendo el siguiente valor promedio:

$$Evaporación_{Prom} = 1.510 \frac{m}{año}$$

Si

$$V_{Evap.} = Evaporación_{Prom} * Area$$

Entonces

$$V_{Evap.} = 3.46 * 10^6 \frac{m^3}{año} \quad (21)$$

Si sustituimos los valores de 15,19, 20 y 21 en la ecuación 10 obtenemos que el valor de ΔV es:

$$\Delta V = -656,407.01 \frac{m^3}{año}$$

$$\Delta V = -0.6 \times 10^6 \frac{m^3}{año} \quad (22)$$

3.2. Geología

En la siguiente fotografía se observa el corte de aproximadamente 25 m de la pared interna S-SE del cráter donde se aprecia parte de la secuencia piroclástica que dio origen a la formación del maar de Alchichica.

Se describió cada horizonte de la secuencia piroclástica con el fin de conocer más sobre la ocurrencia de estas estructuras volcánicas e identificar las estructuras sedimentarias primarias asociadas a erupciones hidromagmáticas.

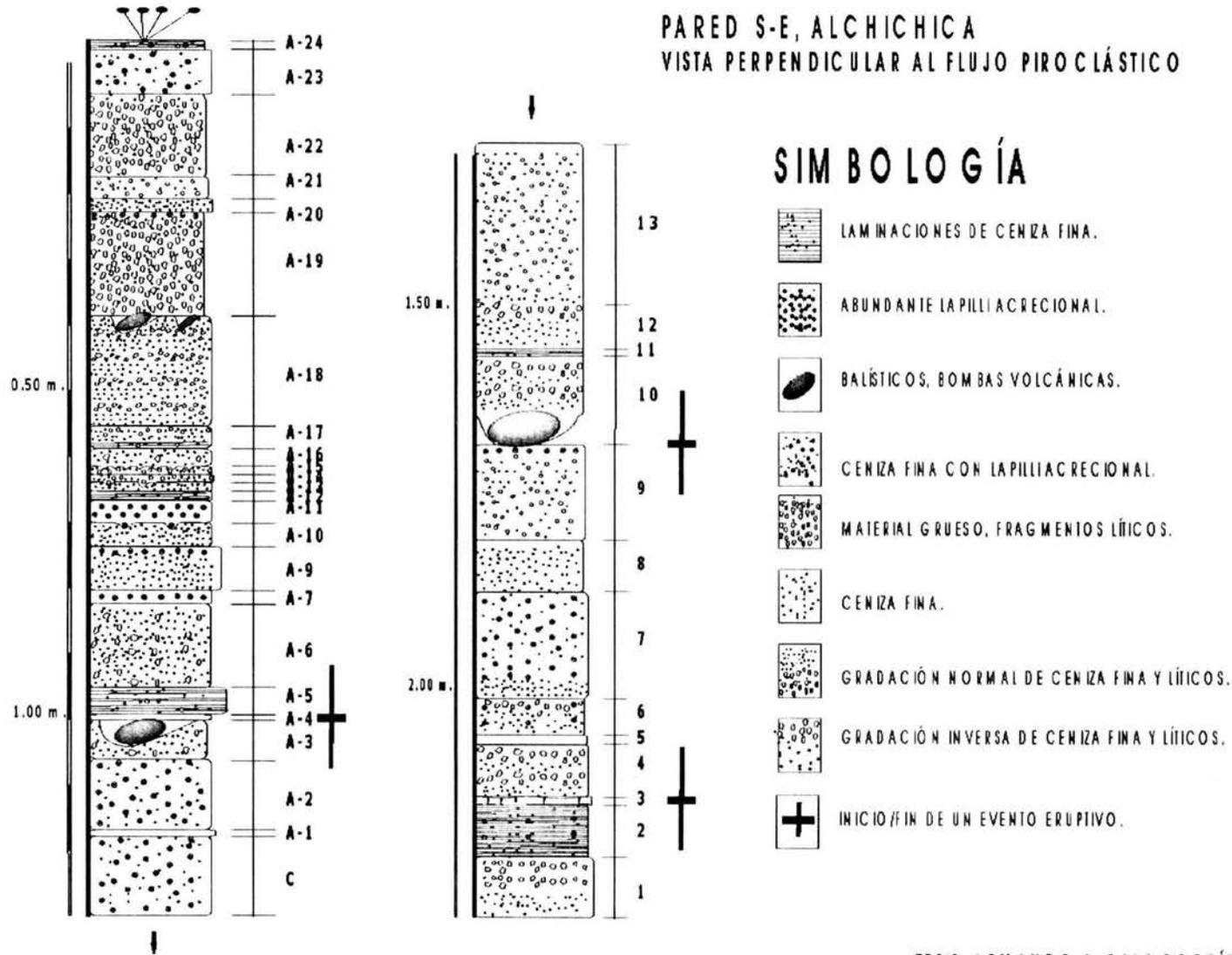
Se construyó la columna estratigráfica en el pozo TA-17 a partir de la descripción litológica de las muestras de roca triturada obtenidas durante la perforación y de la correlación de la secuencia piroclástica del corte SE del cráter con los primeros 25 m. de la perforación. El pozo TA-17 se ubica aproximadamente a 500 m alejado del borde del cráter, justo atrás de la secuencia piroclástica antes descrita.

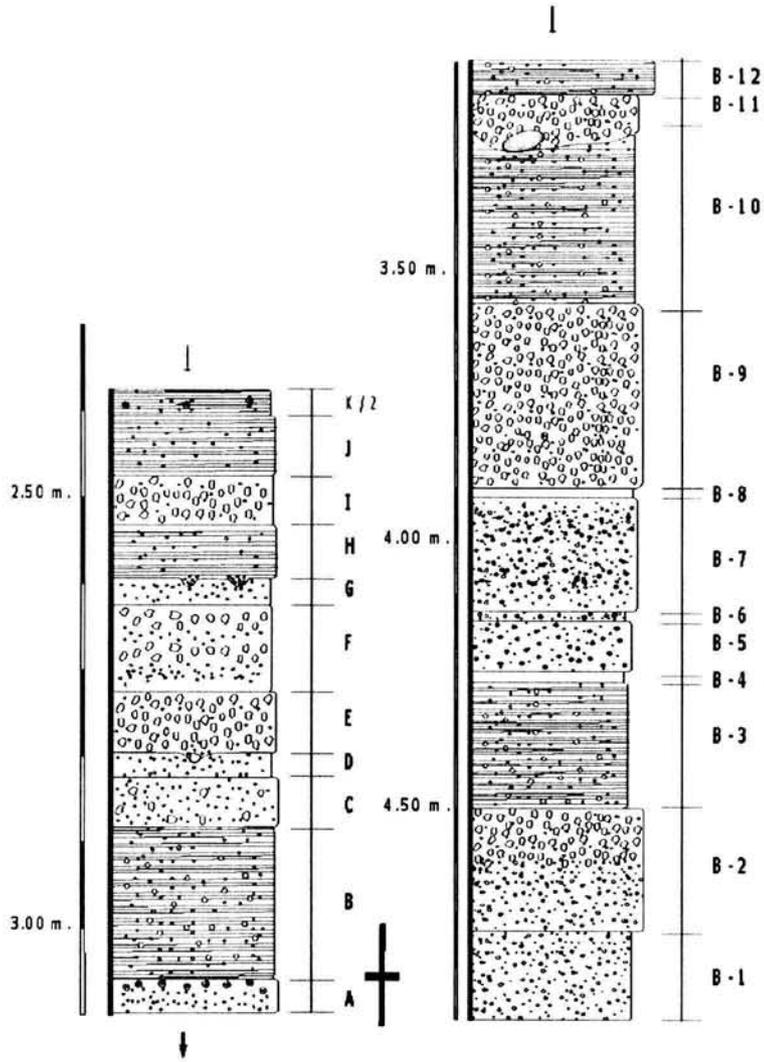


Figura 14: Corte SE. Cráter Alchichica



Figura 15: Perforación de pozo TA-17. Uso: Agua potable





CONTINUACIÓN SECUENCIA PARED S-E, ALCHICHICA
VISTA PERPENDICULAR AL FLUJO PIROCLÁSTICO

SIMBOLOGÍA

-  LAMINACIONES DE CENIZA FINA.
-  ABUNDANTE LAPILLIACREACIONAL.
-  BALÍSTICOS, BOMBAS VOLCÁNICAS.
-  CENIZA FINA CON LAPILLIACREACIONAL.
-  MATERIAL GRUESO. FRAGMENTOS LÍTICOS.
-  CENIZA FINA.
-  GRADACIÓN NORMAL DE CENIZA FINA Y LÍTICOS.
-  GRADACIÓN INVERSA DE CENIZA FINA Y LÍTICOS.
-  INICIO/FIN DE UN EVENTO ERUPTIVO.

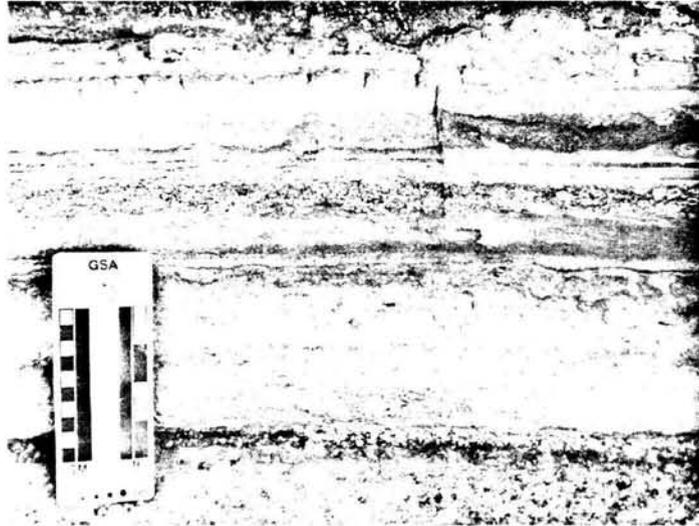
HORIZ.	DESCRIPCIÓN
A-1	Horizonte competente de ceniza fina bien consolidada.
A-2	Lapilli acrecional escaso en matriz de ceniza.
A-3	Clastos angulosos en matriz de ceniza. Se observa laminaciones y gradación inversa
A-4	Balísticos de basalto
A-5	Intercalaciones de ceniza color claro y oscuro
A-6	Flujo en condiciones concentradas con líticos (5 mm) escasos embebidos en matriz arenosa.
A-7	Lapilli acrecional abundante.
A-8	Horizonte masivo de ceniza fina, no se observan clastos, contactos claros
A-10	Ceniza fina color pardo claro.
A-11	Lapilli acrecional en ceniza fina, se observa que penetran en el estrato subyacente.
A-12	Estructuras planoparalelas que indican varios flujos independientes.
A-13	Ceniza fina clara, en la cima se observan líticos sumergidos.
A-14	Ceniza media, no hay gradación
A-15	Ceniza media con grietas verticales (marcas de carga).
A-16	Líticos (2-6 mm) en matriz de ceniza, no hay gradación.
A-17	Ceniza fina-media con líticos (2-3 mm) dispersos. Hacia la base hay laminaciones.
A-18	Laminaciones de ceniza media intercaladas con líticos (3-4 mm) embebidos. Balísticos en la cima.
A-19	Flujo en condiciones concentradas de líticos (3-4 mm) en matriz de ceniza. Líticos soportados por granos con unas ligeras laminaciones. Hacia la cima hay lapilli acrecional y material mas fino. No es claro el contacto entre ellos
A-20	Horizonte masivo de ceniza fina.
A-21	Horizonte masivo de ceniza media.
A-22	Flujo en condiciones concentradas, material lítico de 1-2 mm.
A-23	Lapilli acrecional abundante (5 mm) Depósito de caída, fin del flujo.
A-24	Estructuras tipo duna con lapilli acrecional escaso (inicio de otro flujo).
1	Horizonte de fragmentos líticos (0.5 cm) con gradación inversa provocada por el reacomodo y choque de partículas en tracción de la nube eruptiva, l que hace que las partículas finas pasen por las gruesas y caigan al fondo
2	Laminaciones que van de 1 a 2 cm. Ceniza tamaño lapillo con lapilli acrecional escaso. Los contactos están bien definidos.
3	Horizonte bien consolidado de material fino, presenta continuidad lateral. En algunas partes se fragmenta el horizonte. Es indicador del fin e inicio de un evento eruptivo ya que estuvo sujeto a los procesos erosionales.

HORIZ.	DESCRIPCIÓN
4	Horizonte con doble gradación inversa.
5	Horizonte de ceniza fina bien consolidada, similar a (3), no se observa fragmentada por lo que no es indicador del fin de un evento.
6	Ceniza fina color café con laminaciones intercaladas con lapilli acrecional escaso.
7	Lapilli acrecional (5 mm) embebidos en ceniza fina. Hacia la base se observan 1.5 cm de ceniza fina.
8	Pulso de ceniza fina color gris. Presenta continuidad lateral.
9	Lapilli acrecional en el techo y no entre el estrato, indica un depósito de caída que indica en fin de la explosión freatomagmática. Sobre éste hay fragmentos balísticos de basalto.
10	Gradación inversa.
11	Sucesiones plano paralelas de ceniza y lapilli
12	Intercalación de horizontes de ceniza fina y material grueso. El espesor del material grueso no rebasan los 7 mm y los horizontes finos son de hasta 10 cm. Los estratos más competentes son los más finos
14	Sucesiones planoparalelas de ceniza media con material grueso intercalado
16	Estructuras de tracción, no se observa una clara gradación, se observan estructuras de impacto frecuentes.
A	Nivel de lapilli acrecional con gradación inversa tipo wet surge (flujo en condiciones concentradas)
B	Ceniza de media a fina color gris con laminaciones de 2 mm Se observan estructuras de tracción. Granulometría muy fina. (Flujo en condiciones diluidas).
C	Líticos tamaño lapilli en ceniza.
D	Fin de un evento hidromagmático , hay balísticos introducidos en el techo del estrato.
E	Material grueso, base de un pulso.
F	Ceniza media-fina con líticos embebidos, puede ser el cuerpo del flujo, se observan dos niveles de gradación inversa.
G	Ceniza fina, en la cima se observan huellas de material suprayacente que se hundió en este por su consistencia suave.
H	Laminaciones de ceniza fina que indican que el transporte fue mayor que la depositación. Hay fragmentos líticos pequeños.
I	Líticos de 5-10 mm. Flujo en condiciones concentradas.
J	Ceniza gris clara, fina, no hay gradación, con laminaciones y líticos pequeños.
K	Lapilli acrecional escaso. Se observan laminaciones de 1-2 mm de espesor. Líticos pequeños.

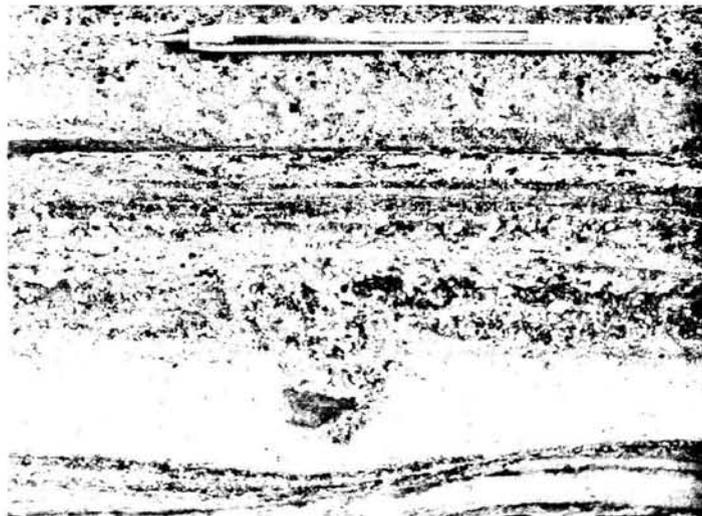
HORIZ.	DESCRIPCIÓN
B-1	Se obs. estructuras de tracción en la base tipo duna.
B-2	La base del flujo s de 17 cm. Material grueso gradado inversamente.
B-3	Ceniza fina. No se observan cambios bruscos en granulometría.
B-4	Horizonte de ceniza fina bien litificada.
B-5	Hzte. masivo de arena media con lapilli acrecional. Contactos bien definidos
B-6	Lapilli acrecional escaso en matiz de ceniza.
B-7	Horizonte masivo de ceniza con lapilli acrecional.
B-8	Costra de arena fina consolidada.
B-9	Base de otro evento hidromagmático, material grueso.
B-10	Ceniza fina en láminas. Se observan algunos impactos en el techo.
B-11	Tracción de material fino y medio intercalado. No se observan laminaciones.



"Huellas de impacto" de fragmentos balísticos eyectados desde el centro de emisión y que impacta y deforma los diferentes pulsos del flujo piroclástico al no estar bien consolidados al momento del impacto, pueden ser indicadores de la profundidad a la cual se llevó a cabo la explosión hidromagmática si se trataran de bloques de roca preexistente (basamento).

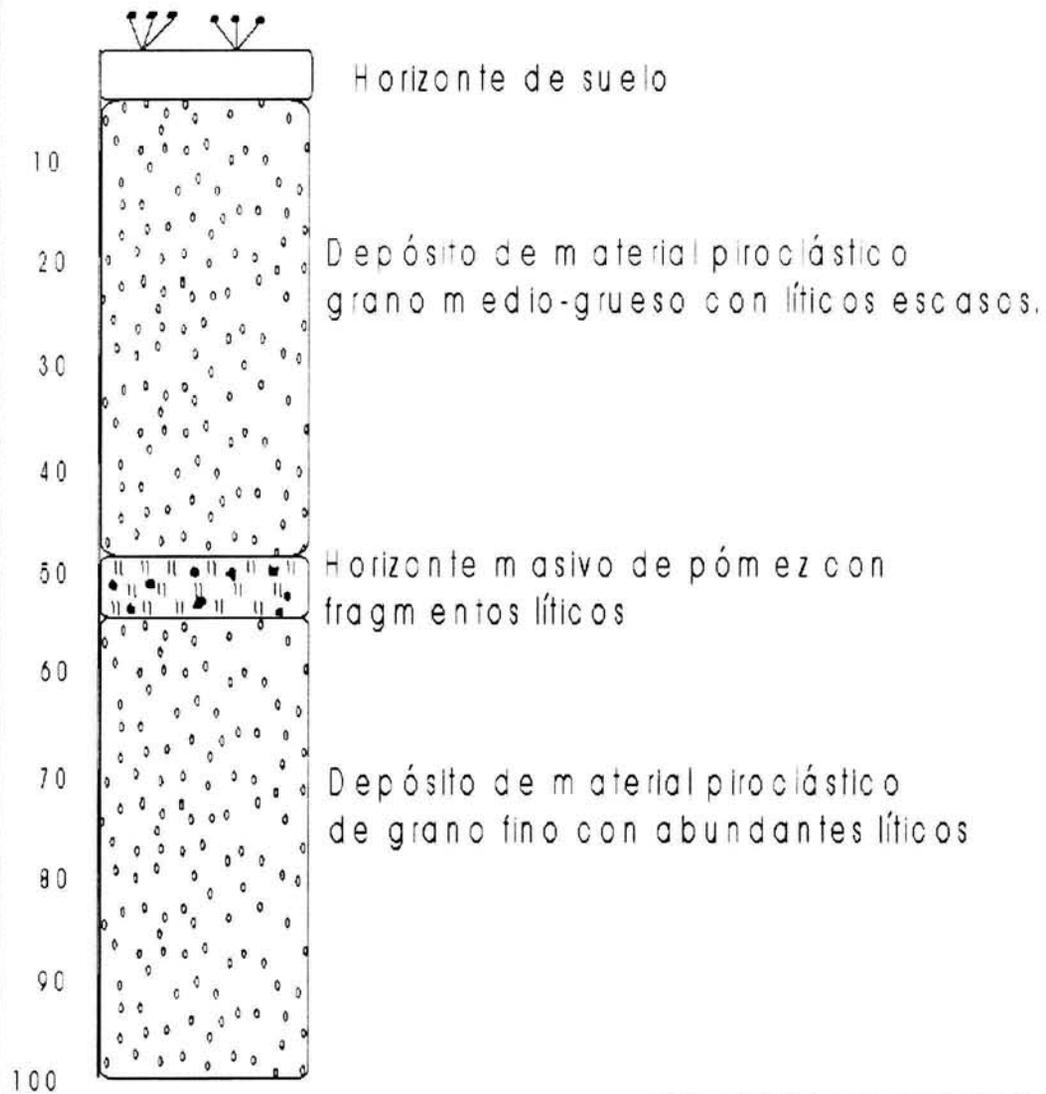


Estructuras plano-paralelas típicas de los depósitos de oleadas piroclásticas. Cada horizonte representa el material que se depositó cuando la energía del flujo piroclástico no era la suficiente para seguirlo transportando. La diferencia de granulometría indica las condiciones bajo las cuales ocurrió el flujo



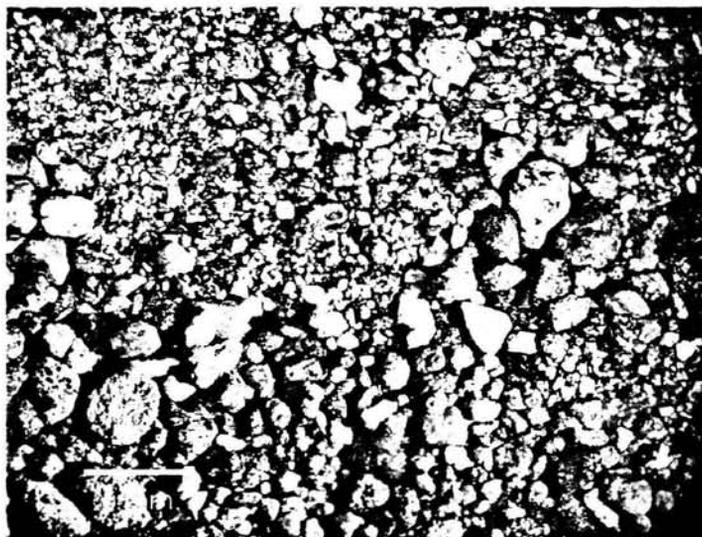
Se observa el contraste entre dos horizontes de un flujo piroclástico. El horizonte superior es un flujo en condiciones concentradas (material grueso) y el inferior un flujo en condiciones diluidas (material fino). Los fragmentos gruesos tienden a depositarse cuando la energía del flujo no es la suficiente para poder ser transportados.

COLUMNA LITOLÓGICA POZO TA-17

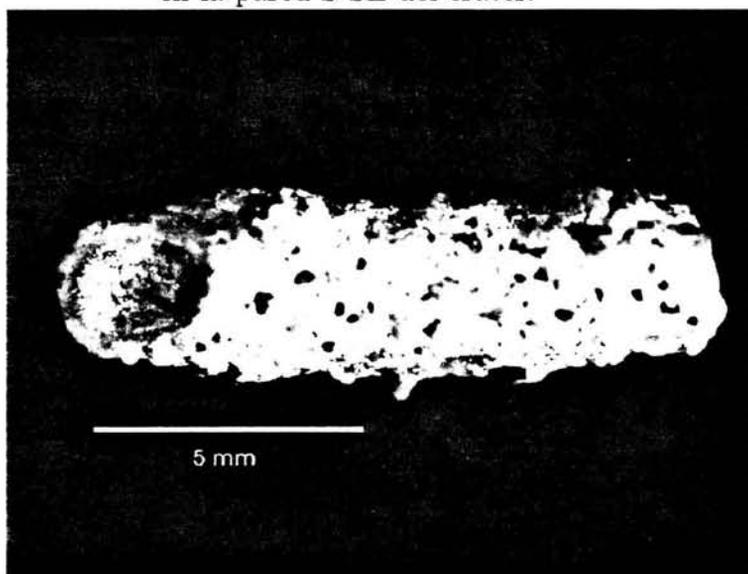


TESIS: ARMANDO ALCALA RODRIGUEZ.

Figura 16: Columna litológica Pozo TA-17



Vista al microscopio de una muestra de material triturado a una profundidad de 10-12 m. Nótese la variedad en el tamaño de los fragmentos. Litológicamente es similar a los depósitos de oleadas piroclásticas descritos en la pared S-SE del cráter.



Agregado de cristales de forma cilíndrica. Se encontraron en muestras de 0-20 m de profundidad. Su posible origen es que estas estructuras se forman al haber un choque térmico durante una explosión hidromagmática que hace que los cristales se adhieran alrededor de materia orgánica, como por ejemplo un fragmento de un tallo.

4. DISCUSIÓN

La configuración de líneas equipotenciales o de igual carga hidráulica para la zona de estudio indican un flujo preferencial de SUR a NORTE. Parte de este flujo subterráneo es captado por el lago y el resto sigue su trayectoria hacia la laguna El Salado, zona de descarga regional de la cuenca situada al NW del lago Alchichica.

La configuración de las líneas de corriente, marcada con flechas, es un arreglo perpendicular a las líneas de igual carga hidráulica que representan la dirección del flujo preferencial. La magnitud de estas flechas indican la dominancia del mismo.

La configuración de líneas de corriente muestra un flujo dominante en la parte SE del lago representado en la red de flujo por las flechas de mayor magnitud

Aproximadamente a 1.8 m de la orilla del lago se encontraron seis excavaciones de 1 a 2 m. de profundidad que los habitantes asentados dentro del cráter excavaron para abastecerse de agua, agua que presenta una firma química muy diferente a la del lago. Estas excavaciones son manantiales o "veneros" que presentan diferencias muy significativas en cuanto a conductividad respecto al agua del lago. La siguiente tabla muestra los valores de conductividad obtenidos en las cuatro estaciones de monitoreo del lago y en las seis excavaciones. Nótese el contraste en los valores de conductividad:

ESTACIÓN	CONDUCTIVIDAD $\frac{m\Omega}{cm}$
R-1	9.60
R-2	9.55
R-3	9.34
R-4	9.57
E-1	1.30
E-2	2.78
E-3	1.72
E-4	0.90
E-5	1.35
E-6	0.85

El valor promedio del agua del lago es del orden de $9.515 \frac{m\Omega}{cm}$ mientras que para el agua de los manantiales es de $1.48 \frac{m\Omega}{cm}$. Esta es una evidencia de que si hay aporte de agua dulce que pasa a través del material granular hacia el lago y que el proceso de salinización del agua ocurre en el lago.

Por otra parte, el balance hidrológico obtenido indica un déficit de $0.6 \cdot 10^6 m^3/año$, es decir, el agua que sale del sistema es superior al agua que le entra al mismo. Analizando la contribución de cada una de las entradas de agua al lago, subterránea y por precipitación, respecto a las salidas subterránea y por evaporación tenemos lo siguiente:

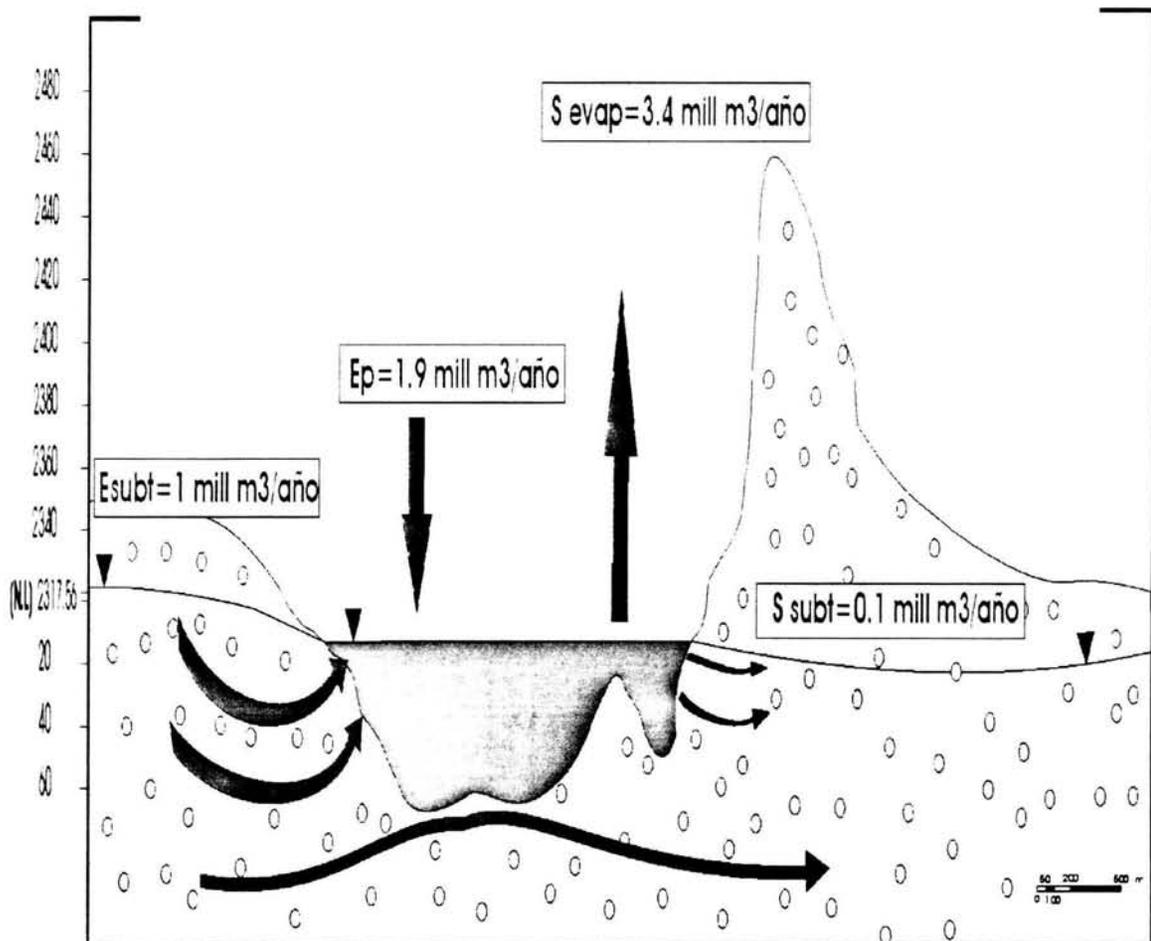


Figura 17: Esquema que ilustra el balance hidrológico en el lago Alchichica

En el esquema anterior se observa que la evaporación es el factor dominante en la salida del sistema ya que contribuye mayormente en el desajuste del balance hidrológico. La contribución de la salida subterránea respecto a la evaporación es muy baja.

Todo valor negativo en el cambio de almacenamiento (ΔS) de un balance hidrológico se ve reflejado en un abatimiento del nivel del agua. El caso del lago alchichica no puede ser la excepción y se ha estimado que el nivel del lago ha descendido 4.5 m durante los últimos 40 años. En la siguiente fotografía se puede observar un cambio muy marcado en la vegetación, el cual define justamente el nivel del lago hace aproximadamente 40 años.

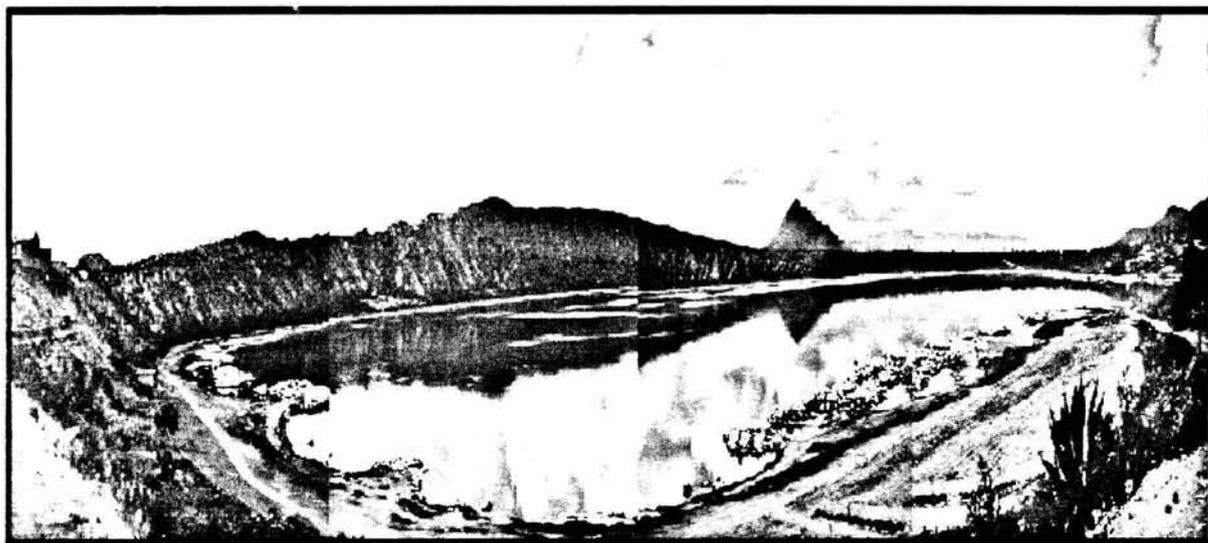


Figura 18: Nivel de agua actual del lago. El cambio de vegetación indica el nivel de agua hace 40 años.

Si calculamos la relación en $\frac{m}{año}$ del abatimiento del nivel del lago tenemos que:

$$Abatimiento = \frac{4,5}{40} = 0,11 \frac{m}{año}$$

La desecación del lago es congruente con el valor obtenido de la tasa de evaporación. La siguiente gráfica muestra la tasa de evaporación del 1966 a

la fecha registrada en el observatorio meteorológico de Alchichica en donde se observa una tendencia ascendente en la evaporación.



Datos registrados en la estación Alchichica #21052 CNA

Se linealizaron los datos y a partir de la ecuación de la línea de tendencia se calculó la variación en la evaporación de 1966 a la fecha, resultando lo siguiente:

$$Evap = 3.399(año) + 5230.6$$

De esta ecuación se desprende que para 1966 la evaporación era de $1453.4 \frac{m}{año}$ mientras que para el 2003 aumentó a $1575.79 \frac{m}{año}$, por tanto, la variación es de:

$$\Delta Evap = 0,12 \frac{m}{año}$$

Lo cual comprueba que el abatimiento del nivel del lago es congruente con la tendencia creciente en la evaporación.

5. CONCLUSIONES

El cráter de Alchichica se forma por procesos hidromagmáticos al interactuar el agua subterránea y el magma provocando un choque térmico que genera explosiones violentas. Estas explosiones no se llevan a cabo a gran profundidad ya que no hay evidencias de roca preexistente en la superficie. La secuencia descrita de oleadas piroclásticas de la pared S-SE del cráter muestra una predominancia de oleadas húmedas (*wet surge*) que indica un enriquecimiento de agua de la nube eruptiva.

El esquema de funcionamiento entre el acuífero de la Cuenca Libres-Oriental y el lago-cráter de Alchichica indica una conexión entre ambos sistemas. El lago-cráter recibe un aporte de agua subterránea en la parte S-SE que se puede comprobar físicamente con la existencia de 6 manantiales o "veneros" localizados dentro del cráter y a un 1.5 m de la orilla del lago que presentan características hidroquímicas diferentes a las del agua del lago.

En esta zona de la cuenca el acuífero se comporta como libre al no encontrarse una capa impermeable que esté por encima del material granular. El espesor del paquete de material piroclástico va más allá de 100 m según lo observado en la columna estratigráfica del pozo TA-17 motivo por el cual la infiltración de agua de lluvia es prácticamente inmediata con un desarrollo hidrológico superficial muy escaso.

El agua del lago presenta una conductividad eléctrica de $9.53 \frac{m\Omega}{cm}$, valor muy contrastante con los medidos en los aprovechamientos de agua subterránea que se ubican al NW y al SE del lago. De acuerdo a la configuración de la red de flujo, se registran valores promedio de $1.5 \frac{m\Omega}{cm}$ en la zona correspondiente a la entrada de agua subterránea hacia el lago y valores promedio de $3.5 \frac{m\Omega}{cm}$ en la zona de salida. Este hecho refleja que el agua que entra al lago presenta una composición inicial que cambia por la elevada evaporación aumentando la concentración en STD. El agua que sale del lago mezclada con el flujo de agua subterránea que no interactuó con el mismo presenta una firma química diferente a las dos anteriores.

La contribución de la tasa de precipitación y entrada de agua subterránea al lago respecto a la tasa evaporación y salida subterránea del mismo arrojan un déficit en el almacenamiento de $-0.6 \frac{m^3}{año}$. Este valor se ve reflejado en el descenso del nivel de agua del lago durante los últimos 40 años el cual

el cual ha descendido 4.5 m. La elevada tasa de evaporación es el proceso natural dominante que origina la concentración de sólidos totales disueltos (STD) en el agua del lago.

Se recomienda realizar pruebas de bombeo para ajustar mejor el valor de conductividad hidráulica, llevar a cabo un muestreo de agua en el acuífero y en el lago para elaborar un modelo geoquímico del área y abundar sobre la interacción agua-roca.

Referencias

- [1] Abrams M., and Siebe C., 1994. *Cerro Xalapasco: an unusual tuff cone with multiple explosion craters, in central Mexico (Puebla)*: Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 63, p. 183-189.
- [2] Alcocer, D.J., Escolero, F.O., Marín, L.E., 2004. *Problemática del Agua de la Cuenca Oriental, Estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala*, Academia Mexicana de Ciencias.
- [3] Alley, M.W., 1993. *Regional Groundwater Quality*. Van Nostrand Reinhold, N.Y.
- [4] Aranda-Gómez, J.J., and Luhr J.F., 1996. *Origin of the Joya Honda maar, San Luis Potosí, México*: Journal of Volcanology and Geothermal Research v. 74, p. 1-2.
- [5] Comisión Nacional del Agua, 1982. *Informe Geohidrológico del Valle de Perote, Estado de Veracruz*. Realizado por la Jefatura del Programa Hidráulico.
- [6] Comisión Nacional del Agua, 1992. *Sinopsis Geohidrológica del Estado de Puebla*. Subdirección General de Administración del Agua.
- [7] Comisión Nacional del Agua, 1982. *Manual para Evaluar Recursos Hidráulicos Subterráneos*. Subdirección General de Administración del Agua.
- [8] Cruickshank V.C., 1989. *Revisión de Estudios Geohidrológicos y Modelación del Acuífero de la Cuenca del Valle de Oriental en los Estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz*. Instituto de Ingeniería, UNAM, 70 p.
- [9] Davis, S.N., and De Wiest, R., 1971. *Hidrogeología*. Ed. Ariel, Barcelona, España, pp. 244-253
- [10] Freeze, R. Allan & Cherry John A., 1971. *Groundwater*, Englewood cliffs, New Jersey, ed Prentice Hall, pp. 167-189.
- [11] Gasca Durán, Abel, 1981. *Algunas notas de la Génesis de los lagos-cráter de la Cuenca de Oriental*, INAH, Depto de Prehistoria, Colección Científica, num. 98, 55 p

- [12] Höskuldson, A. and Cantagrel, J.M., 1994. *Volcanic hazards in the surroundings of Pico de Orizaba, Eastern Mexico*: Natural Hazards, v. 10, p. 197-219.
- [13] Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1979, Guadalupe Victoria E14B35, Carta Topográfica y Geológica, escala 1:50,000; México D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, INEGI.
- [14] Knoblich Klaus, 1972. *Las condiciones de las aguas subterráneas en la Cuanca de El Seco-Oriental (Puebla-Tlaxcala/México)*. Comunicaciones Fund. Alemana para la inv. científica, 4, Puebla.
- [15] Lorenz V., 1974. *On the formation of maars*: Bulletin of Volcanology, v.37, p. 183-204
- [16] Lorenz V., 1986. *On the growth of maars and diatremas and its relevance to the formations of tuff rings*: Bulletin of Volcanology, v.48, p. 265-274
- [17] Meneses, L.L., 2002. Tesis de Licenciatura. *Exploración Geofísica e Hidrogeológica en la laguna de Alchichica, Cuenca de Libres-Oriental, Edo. de Puebla*.
- [18] Ollier C.D., 1967. *Maars; their characteristics, varieties and definition*: Bulletin of Volcanology, v.31, p. 45-73
- [19] Reyes, C., M. 1979. *Geología de la Cuenca de Oriental (Estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz)*: México D.F., Instituto Nacional de Antropología, Departamento de Prehistoria, Colección Científica, num. 71, 62 p.
- [20] Siebe, C., 1986. *On the possible use of cinder cones and maars as paleoclimatic indicators in the closed basin of Serdan-Oriental*: Journal of Volcanology and Geothermal Research v. 28, num. 3-4, p. 397-400.
- [21] Sheridan, Michael F., and Wohletz, Kenneth H., 1983. *Hidrovolcanism; basic considerations and review*: Journal of Volcanology and Geothermal Research v. 17, num. 1-4, p. 1-29.

- [22] Shon, Y.K., 1996. *Hidrovolcanic processes forming basaltic tuff rings and cones on Cheju Island, Korea*: GSA Bull., v. 108, num. 10, p. 1199-1211
- [23] Wohletz, K.H., 1986. *Explosive magma-water interactions: thermodynamics, explosions mechanisms and field studies*: Bulletin of Volcanology, v.48, p. 245-264