

Evaluación hidrogeológica para localizar fuentes de abastecimiento en Concepción Buenavista, Estado de Oaxaca, México

Hydrogeological evaluation to locate sources of supply in Concepción Buenavista, State of Oaxaca, Mexico

Martín Carlos Vidal García¹

Martín Cárdenas Soto²

David Escobedo Zenil³

Andrés Tejero Andrade⁴

Alejandro García Serrano⁵

Recibido el 3 de agosto de 2020; aceptado el 17 de noviembre de 2021

Resumen

El municipio de Concepción Buenavista se localiza en la Mixteca alta del estado de Oaxaca, México. Su población sufre escasez de agua debido al clima semiseco y a la limitada escorrentía superficial en la región. A fin de proponer alternativas de solución al problema de desabasto de agua, se realizó un estudio geológico-geofísico para determinar el sitio más adecuado para la perforación de un pozo que proporcione un caudal de 2 l/s, cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades de la población. Los resultados permiten determinar un sitio que cumple las condiciones naturales favorables.

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México, correo electrónico: mvidal@unam.mx

² Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México, correo electrónico: martinc@unam.mx

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México, correo electrónico: dzenil@unam.mx

⁴ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México, correo electrónico: atejero16@gmail.com

⁵ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México, correo electrónico: agarcia@unam.mx

El sitio se caracteriza por la infiltración del agua superficial que proviene de un arroyo y de la recarga asociada al agua de lluvia.

Palabras clave: *unidades hidrogeológicas, acuífero libre, tomografía eléctrica, tomografía sísmica, prácticas de campo.*

Abstract

The municipality of Concepción Buenavista is located in the area known as "Mixteca Alta" in Oaxaca state, Mexico. Its population suffers from water scarcity due to the climate semi-dry and limited superficial sources in the region. In order to propose alternative solutions to the problem of such scarcity, we carried out a geological-geophysical study to determine the most suitable site for drilling a well that provides an estimated flow rate of 2 l/s, quantity of water requirements for this population. The results allow to determine a site that meets the natural conditions favorable. The site is characterized as well by surface water infiltration that comes from a stream and from the recharge associated with rainwater.

Key words: *hydrogeological units, free aquifer, electrical tomography, seismic tomography, field work practices.*

1. Introducción

La localización de sitios propicios para la extracción del agua subterránea es uno de los problemas al que se enfrentan diversas comunidades rurales. Tradicionalmente los asentamientos humanos recurren al uso del agua potable cuando ésta se encuentra disponible en la superficie (ríos, lagunas, manantiales, norias), o existen las condiciones para extraerla de los acuíferos. Cuando el recurso hídrico se agota, y las necesidades del asentamiento urbano (comunidad o pueblo) demanda su suministro, es necesario llevar a cabo estudios hidrogeológicos que provean expectativas para contar con el líquido.

Los estudios hidrogeológicos consisten en caracterizar y cuantificar las variables hidráulicas contenidas en los tipos de estructuras geológicas en superficie y profundidad. Estos estudios adicionalmente requieren de métodos geofísicos que determinen el comportamiento o estado de las propiedades físicas del subsuelo a fin de estimar la presencia de agua. Uno de los métodos geofísicos más utilizados para ello es el método geoelectrico (Rolia y Sutjiningsih, 2018), el cual se caracteriza la distribución de resistividad en profundidad; bajas resistividades se pueden asociar a la presencia de materiales saturados, y altas resistividades pueden describir rocas que limitan o confinan el recurso hídrico. Cuando se trata de realizar exploraciones más profundas, los métodos de transitorios electromagnéticos (TEM) resultan complementarios (Fitterman y Stewart, 1986). Un método auxiliar es el de refracción sísmica, el cual puede definir el basamento de la estructura que presenta buena porosidad para la presencia de agua (Lankston, 1989).

El cambio climático ha propiciado la escasez de agua. El problema se traduce en la falta del recurso hídrico para cubrir las necesidades sustanciales de la población. En el municipio de Concepción Buenavista, localizado en la Mixteca alta del estado de Oaxaca, sus habitantes sufren de escasez de agua debido al clima semiseco y a la limitada escorrentía superficial en la región. Aunque el municipio cuenta con dos norias y un manantial, éstos resultan insuficientes para abastecer a la población. En acuerdo con la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se realizaron estudios con métodos directos e indirectos (geológico-geofísicos) para realizar una evaluación. El objetivo fue identificar y caracterizar las diferentes unidades hidrogeológicas y definir el sistema hidrogeológico local, a fin de localizar un sitio para la perforación de un pozo de agua que proporcione un caudal de 2 l/s que satisfaga las necesidades de la población del municipio. Este caudal es el necesario de acuerdo al estudio realizado por académicos y estudiantes del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Esa cantidad de agua fue determinada mediante una encuesta casa por casa, lo cual permitió conocer la problemática sobre el consumo doméstico del agua, además de averiguar el impacto de la escasez del agua en la realización de las actividades económicas de la población.

En una primera etapa realizamos un reconocimiento geológico para determinar las unidades de roca expuestas en el municipio de Concepción Buenavista. Posteriormente, se visitaron las captaciones subterráneas con las cuales se abastecen los habitantes, determinando el marco hidrogeológico, el caudal y calidad del agua que proporcionan a la población. En una segunda etapa se seleccionaron dos sitios denominados El Sauce y Llano Grande para la realización de líneas de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y Tomografía de Refracción Sísmica (TRS). Estos métodos geofísicos fueron realizados a fin de conocer la distribución, lateral y a profundidad, de las propiedades físicas medibles para generar un modelo geológico/geohidrológico detallado de la zona de estudio.

2. Marco geológico

La geología en el estado de Oaxaca ha tenido una historia compleja debido a eventos tectónicos ocurridos en el Paleozoico y Mesozoico (Alaniz Álvarez *et al.*, 1994), y durante el Cenozoico se ha moldeado su estructura y morfología actual (Morán Zenteno *et al.*, 1996, Cerca *et al.*, 2004, Nieto Samaniego *et al.*, 2006). Concepción Buenavista se localiza en el Terreno Oaxaca, el cual se encuentra delimitado por fallas de basamento denominadas Caltepec y Oaxaca (Campa y Coney, 1983). La secuencia estratigráfica, llamada Complejo Oaxaqueño, está constituida por un basamento compuesto de rocas metasedimentarias y ortogneises en facies de granulita, cuya edad va de 990 a 1300 Ma (Solari *et al.*, 2003; Keppie *et al.*, 2003). En el Paleozoico se depositaron rocas sedimentarias marinas de las formaciones Tiñú, Santiago, Ixtaltepec y Yododeñe (Robinson y

Pantoja Alor, 1968; Navarro Santillán *et al.*, 2002) Sobre el Complejo Oaxaqueño y la secuencia paleozoica descansan en discordancia angular rocas sedimentarias del Cretácico inferior pertenecientes a la formación San Isidro constituidas por areniscas, conglomerados, lutitas y limolitas que se encuentran depositadas en abanicos aluviales, cuya edad asignada es del Berrisiano-Aptiano (López Ticha, 1970). También se encuentra la formación San Juan Teita, constituida por una secuencia de calizas, anhidritas, dolomías y horizontes de limolita intercalados con yeso. Esta formación aflora en la cercanía del arroyo Llano Grande en las poblaciones de Concepción Buenavista y Tepelmeme (Figura 1). La edad inferida para la formación San Juan Teita es Albiano debido a que subyace a la formación Teposcolula perteneciente al Cretácico superior (López Ticha, 1985).

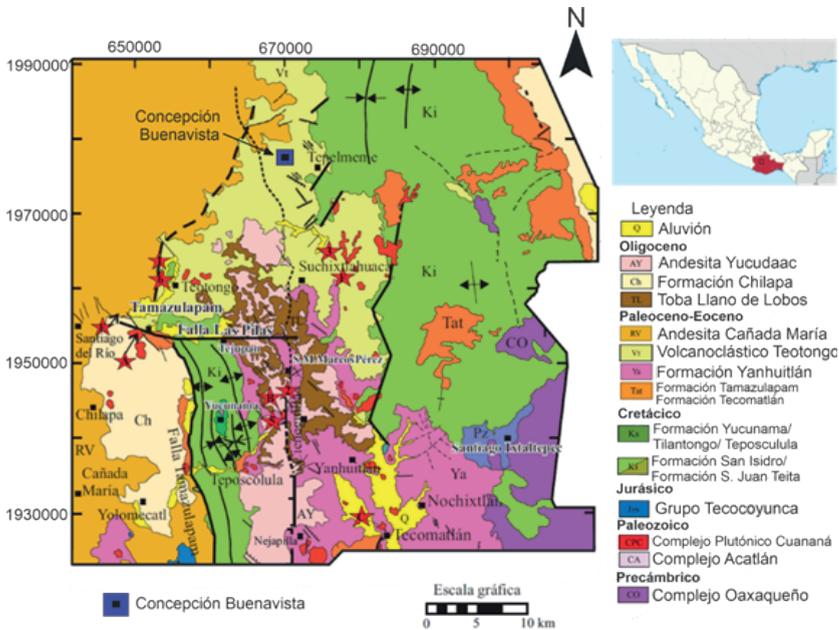


Figura 1. Mapa geológico del terreno Oaxaca en la porción norte (estrella de color azul) y localización del municipio de Concepción Buenavista. Modificado de Santamaría Díaz *et al.* (2008).

La estratigrafía en el municipio de Concepción Buenavista está representada por las siguientes unidades de roca (Figura 2):

1. Formación San Juan Teita (Cretácico inferior). Sobre el Complejo Oaxaqueño y la secuencia Paleozoica descansan en discordia rocas sedimentarias pertenecientes a las formaciones San Juan Teita y San Isidro del Cretácico Inferior (Ki). La formación San Juan Teita es una secuencia compuesta de yeso, anhidrita, calizas, dolomía y horizontes de limolita intercalados con yeso.

2. Volcanoclástico Teotongo (Paleógeno). Se encuentra sobreyaciendo en forma discordante a las rocas del Mesozoico. Las rocas afloran en el valle en donde se asienta la población de Concepción Buenavista, y éstas se observan en una serie de mesetas, cerros y lomeríos de origen volcánico de composición andesítica-dacítica pertenecientes al Oligoceno.
3. Aluvión (Cuaternario). Constituido por sedimentos del tamaño de arena, grava y conglomerado de color gris y blanco de edad reciente, los cuales se depositan en el arroyo Llano Grande, en escorrentías secundarias, y en la planicie en los alrededores de la población de Concepción Buenavista.

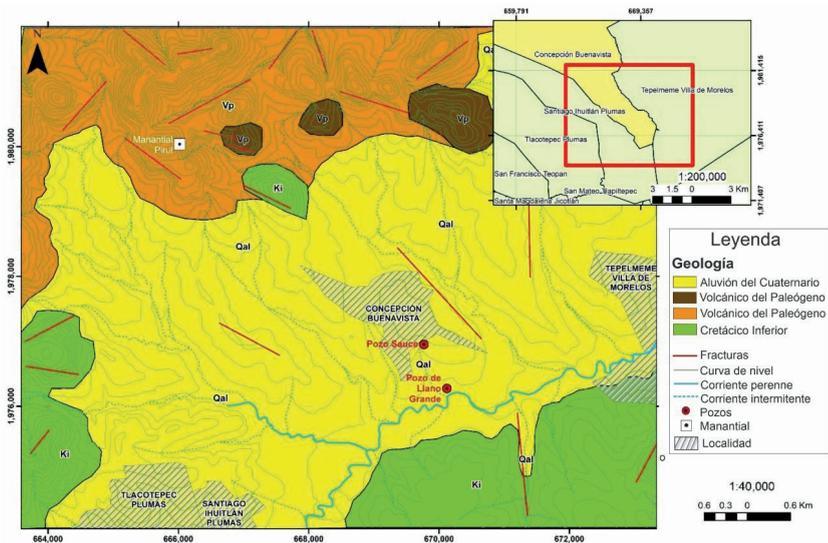


Figura 2. Mapa geológico del municipio de Concepción Buenavista, estado de Oaxaca. Modificado de Santamaría Díaz *et al.* (2008).

3. Marco hidrogeológico

La hidrogeología del área es parte de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur que se encuentra dentro de la subprovincia de la Mixteca alta (Figura 1). El municipio de Concepción Buenavista se localiza en el acuífero Cuicatlán de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2007), donde refiere que la información hidrogeológica es escasa. Por tal motivo, se realizó una visita a las captaciones de aguas subterráneas (un manantial y dos pozos someros) que abastecen de agua al municipio de Concepción Buenavista. En la Tabla 1, se muestran las características de los aprovechamientos subterráneos. Los valores fueron obtenidos en febrero de 2018 por académicos y estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Tabla 1. Aprovechamientos subterráneos en el municipio de Concepción Buenavista

Sitio	Coordenas UTM		MSNM	Caudal l/s	N i v e l estático m	Observaciones
	X	Y				
Manantial El Pirul	665,073	1,980,537	2,263	0.2		El agua se conduce a una cisterna
Pozo El Sauce	669,138	1,976,777	2,076	1.3	3.09	La calidad del agua no es apta para consumo
Pozo Llano Grande	669,376	1,985,891	2,074	1	2.90	La calidad del agua no es apta para consumo

Una evaluación hidrogeológica considera las diferentes rocas y su interacción con el agua subterránea, permitiendo diferenciarlas y clasificarlas de acuerdo con su capacidad de admitir, almacenar y transmitir el agua subterránea. Para el caso de la zona de estudio, se pueden definir las unidades hidrogeológicas siguientes, de acuerdo con litología, distribución en el subsuelo y la estratigrafía.

Unidad Hidrogeológica 1. Acuífero Granular

Constituida por sedimentos aluviales de arenas, gravas, limos de origen volcánico y fragmentos de calizas producto de la erosión y transporte de sedimentos provenientes de las sierras y lomeríos que circundan a la población de Concepción Buenavista. Los espesores varían de 3 a 8 m y la unidad funciona como un acuífero de tipo libre en explotación mediante los pozos Llano Grande y el Sauce. El acuífero es heterogéneo debido a su granulometría variable y se considera limitado.

Unidad Hidrogeológica 2. Rocas carbonatadas

Constituida por calizas y dolomías compactas con espesores mayores de 90 m. La porosidad es de tipo secundario originada por el fracturamiento, siendo una roca carbonatada de baja permeabilidad y funciona como un acuífero libre.

4. Estudios geofísicos

Una vez definido el sistema hidrogeológico en la superficie, se realizaron los estudios geofísicos de TRE y TRS para determinar la distribución de la estratigrafía en el subsuelo y las zonas saturadas. Estos métodos fueron aplicados en los sitios El Sauce y Llano Grande, muy cerca de los pozos que se indican en la Figura 2. El equipo utilizado para TRE fue un Resistivímetro Syscal-Pro de 48 canales con cables inteligentes y separación de electrodos de 10 m. Para el caso de TRS se emplearon seis sismógrafos Seistronix de 12 canales modelo EX-12 con geófonos verticales de 4.5 Hz separados 5 m. Como fuente sísmica se utilizó un marro de 14 libras.

Los datos de TRE fueron procesados e interpretados mediante el software EarthImager (Advanced Geophysical Instruments). Este software resuelve el problema inverso para un modelo de distribución de resistividades del subsuelo. El proceso parte de un modelo inicial del subsuelo (2D o 3D) en el cual se ha definido una malla dividida en un número determinado de celdas. En cada celda se define un valor de resistividad después de reducir la diferencia entre las resistividades aparentes experimentales y las resistividades aparentes generadas por el modelo inicial. Para el caso de TRS, a partir de las secciones sísmicas se seleccionaron los primeros arribos de los registros sísmicos para construir curvas de tiempo de viaje o domocrónicas. Estos arribos fueron procesados por el método de tomografía de refracción mediante el software ZondST2D (Kaminsky, 2015). En este método se construye un modelo de estructura del subsuelo con las variaciones de velocidad producidas por el mejor ajuste de los tiempos de viaje observados con aquellos derivados del trazado de rayos (Sheehan et al., 2005; Zelt et al., 2013).

4.1. Sitio Llano Grande

Este sitio se localiza a 1.5 km al sur de la población de Concepción Buenavista cerca al río Llano Grande. Se realizaron dos líneas de TRE (Figura 3); la primera (TRE 1) con una longitud de 470 m con una orientación SE-NW, y la segunda línea (TRE 2)

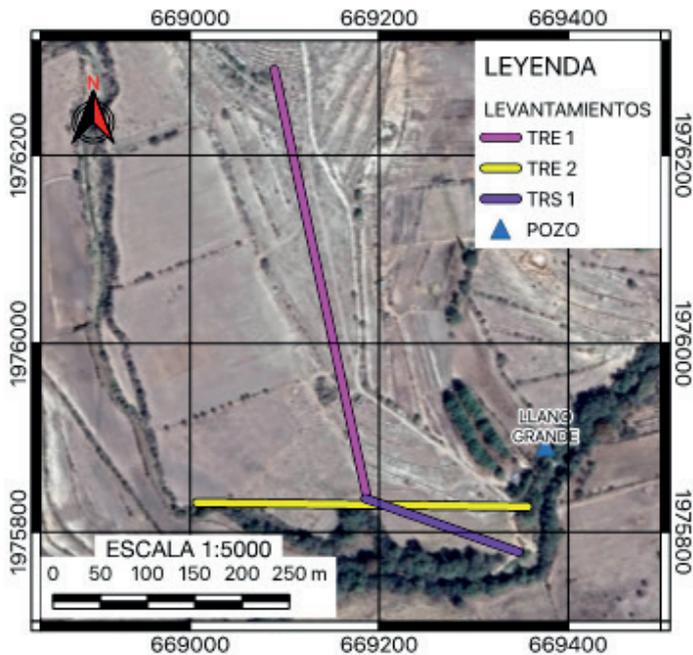


Figura 3. Mapa de localización de las líneas de Tomografía de Resistividad Eléctrica y el Tendidos de Refracción Sísmica en el sitio Llano Grande.

de 320 m de longitud con una orientación E-W. Ambas líneas con una separación de electrodos de 10 m para un objetivo de exploración de 80 m de profundidad. El tendido de TRS (TRS 1) tuvo una longitud de 175 con una orientación SE-NW (Figura 3).

Los resultados de TRE-2D se muestran en la Figura 4. De acuerdo con la distribución de resistividades se pueden definir tres horizontes geoelectrónicos:

- Horizonte A. Con un rango de resistividades altas de 30-80 (Ohm-m), asociado al suelo y sedimentos aluviales en los primeros 8 m.
- Horizonte B. Con un rango de resistividades de 10-20 (Ohm-m), asociado a roca carbonatada consolidada de los 8 m con espesores de 20 m.
- Horizonte C. Con un rango de resistividades bajos de 3-9 (Ohm-m), asociado a un medio totalmente saturado en el acuífero granular y en el acuífero de rocas carbonatadas.

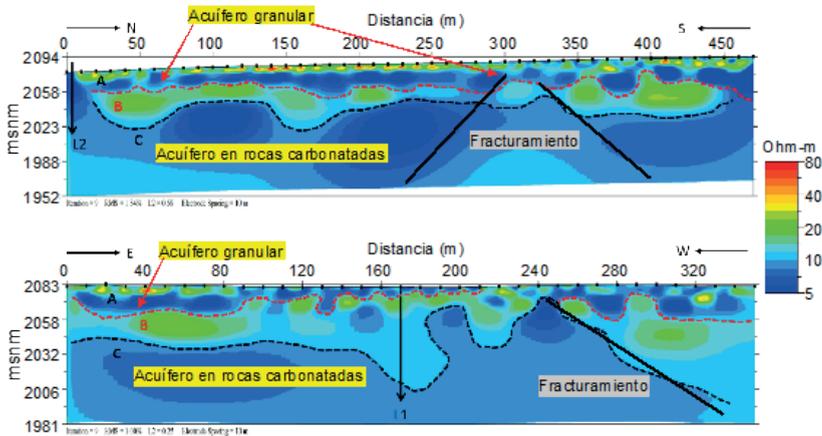


Figura 4. Secciones de Tomografía de Resistividad Eléctrica: de las líneas TRE 1 (panel superior) y TRE 2 (panel inferior) En el sitio Llano Grande.

El resultado del procesamiento de datos de refracción de la línea TRS 1 en este sitio muestra tres capas con velocidades diferentes (Figura 5):

- Capa 1. Capa somera de baja velocidad, la cual presenta un rango de velocidad 300 a 450 m/s con un espesor de aproximadamente 3 m asociado al acuífero granular.
- Capa 2. Una capa intermedia entre la zona de baja y alta velocidad con velocidades del orden de 500 a 1,800 m/s y un espesor no mayor a 6 m.
- Capa 3. Capa profunda posterior a los 6 m de profundidad; se observa una zona de mayor velocidad cuyo rango se encuentra entre los 2,000 a 2,800 m/s que se asocian al acuífero de las rocas carbonatadas.

Los resultados de la Figura 5 muestran que la unidad estratigráfica asociada a la capa 3 puede presentar zonas de fractura debido a la discontinuidad lateral de velocidad, como se observa en las secciones geoelectricas del sitio.

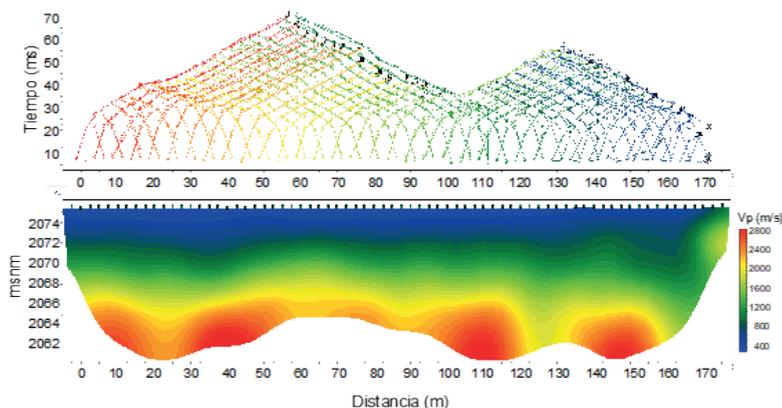


Figura 5. Domocronica (panel superior) y tomografía sísmica (panel inferior) de la línea TRS 1 en el sitio de Llano grande.

4.2 Sitio El Sauce

El sitio se localiza a 800 m al sur de la población de Concepción Buenavista. Ahí se realizaron dos líneas de TRE perpendiculares entre sí, con una longitud de 470 m cada una. La línea TRE 3 presenta una orientación NW-SE y la línea TRE 4 presenta una orientación SW-NE (véase Figura 6). La relación que guardan entre ellas es casi ortogonal, teniendo su punto de intersección en el cadenamamiento 240 m en ambas líneas. La profundidad de investigación es aproximadamente de 90 m. En cuanto al método de refracción, en el sitio se realizó el tendido TRS 2 con una longitud de 350 m.

En las líneas de TRE (Figura 7) se observa una distribución similar de resistividades asociada con los tres horizontes geoelectricos del sitio en Llano Grande, con incrementos menores en las resistividades en el horizonte A de 30 - 80 (Ohm-m). Esto se debe a que en el subsuelo se tiene el mismo acuífero en una distancia no mayor a 1 km entre ambas zonas de estudio.

Las líneas de TRE 3 y TRE 4 (Figura 7) muestran una excelente correlación en sus valores de resistividad. En el horizonte A existe un espesor promedio de 7 m y se asocia con el acuífero granular; con los valores resistivos más altos en la zona sureste del estudio. También se observa la presencia del horizonte B con espesores variables con máximos de 40 m y un adelgazamiento de hasta 25 m en la intersección de ambas líneas. Este resultado indica un incremento en el horizonte C en el cadenamamiento 240 m de ambas líneas (Figura 7). La línea TRE 3

denota una discontinuidad en el horizonte A a partir del cadenamamiento 0 al 180 m y en el 420 m. En el horizonte B se observan discontinuidades (fracturamientos) en los cadenamamientos 100 m y 360 m, respectivamente, como se observa en la Figura 7. Con respecto a la línea TRE 4, en el horizonte A se observa una mejor distribución a lo largo del todo el perfil, a diferencia del horizonte B que muestra el adelgazamiento. Esta discontinuidad es congruente con la observado en la parte central, donde hemos indicado una gran discontinuidad (o fracturamiento) comprendida entre el cadenamamiento 290 y 380 m.

La Figura 8 muestra los resultados de TRS 2 en El Sauce. En esa figura se puede observar una capa de baja velocidad, la cual tiene un espesor entre 2 a 4 m que se asocia al acuífero granular; con velocidades del orden de 400 m/s. Posteriormente, entre 4 y 12 m de profundidad se observan velocidades altas cuyo rango esta comprendido entre 1,000 a 2,000 m/s. Los resultados permiten identificar zonas de muy alta velocidad a profundidades mayores de 12 m que se asocia a rocas sedimentarias compactas de origen carbonatado.

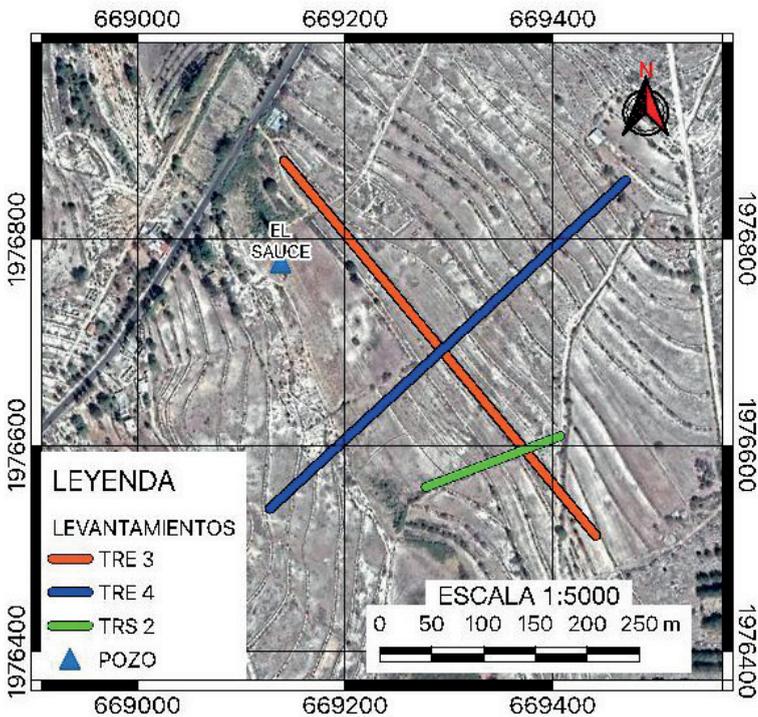


Figura 6. Mapa de localización de las dos líneas de Tomografía de Resistividad Eléctrica y el Tendido de Refracción Sísmica en el sitio el Sauce.

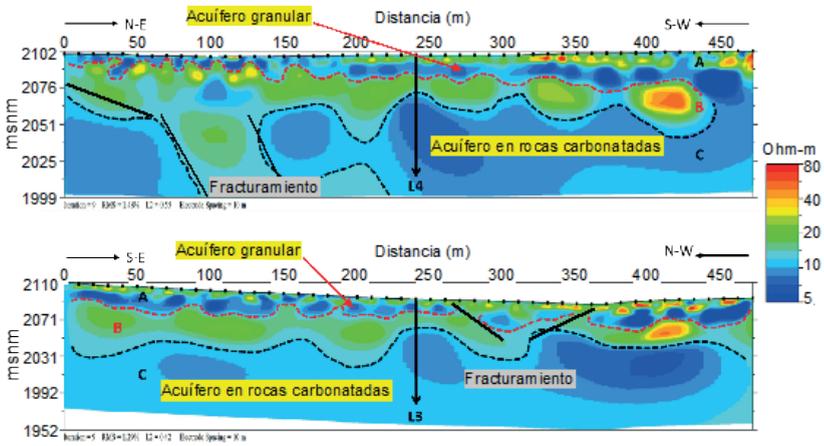


Figura 7. Secciones de Resistividad Eléctrica de las líneas TRE 3 (panel superior) y TRE 4 (panel inferior), en el sitio El Sauce .

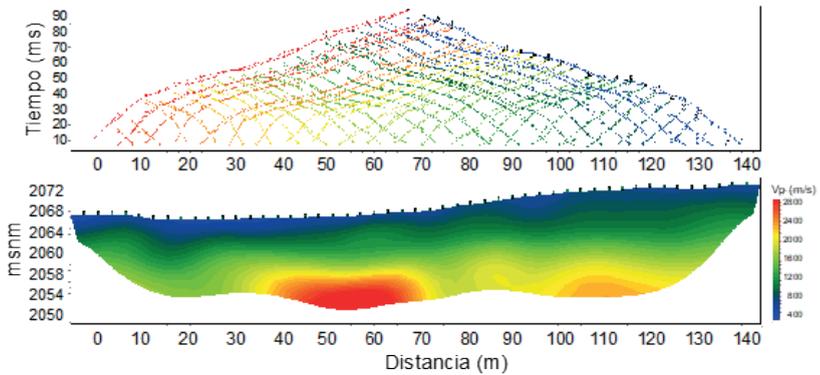


Figura 8. Domocronica (panel superior) y tomografía sísmica (panel inferior) de la línea TRS 2 en el sitio del Sauce.

5. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos con las dos metodologías geofísicas tanto en la zona de Llano Grande como en El Sauce, indican que existe una correlación en la respuesta entre 3 y 6 m de profundidad. Se observan altos resistivos (30 a 80 Ohm-m) que se asocian a velocidades de V_p bajas del orden de 200 a 400 m/s. Estos resultados se relacionan con la Unidad Geohidrológica 1 (acuifero granular constituido por gravas, arenas y limo de diverso origen). Posteriormente se encuentra una zona de transición, observada en los perfiles sísmicos con velocidades del orden de 1,000 a 1,800 m/s, que corresponde a la transición de la Unidad Geohidrológica 1 y la Unidad Geohidrológica 2; siendo el contacto entre el sedimento y las rocas

carbonatadas. Los resultados de TRE permiten inferir que las rocas carbonatadas se encuentran con un grado de intemperismo y fracturamiento alto debido a sus bajas resistividades. En ambos sitios estos resultados muestran la existencia de tres horizontes geoelectrónicos; A, B y C, siendo el horizonte C el más profundo con mayor saturación.

La TRS define unidades de roca en la parte somera hasta 15 m de profundidad, donde se encuentra el contacto entre el acuífero granular con el acuífero en rocas carbonatadas. Por otra parte, se aprecia que la roca carbonatada a profundidad muestra más competitividad por sus velocidades del orden de 2,200 a 3,400 m/s a partir de los 15 metros de profundidad.

Así, los resultados obtenidos mediante la geología del subsuelo con apoyo de las técnicas de TRE y TRS, indican que el sitio de Llano Grande, cumple con las condiciones de presentar saturación de agua en el subsuelo en la Unidad Geohidrológica 2 en las rocas carbonatadas de baja permeabilidad. Además, este sitio presenta la condición de una recarga permanente del arroyo Llano Grande y del agua precipitada en la temporada de lluvias; recargando al acuífero somero granular y el de rocas carbonatadas.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos por las dos técnicas geofísicas realizadas en los dos sitios, aunado al análisis de la correlación de la geología del subsuelo, y de las unidades geohidrológicas definidas, permiten concluir que existen las condiciones en dos sitios para la localización de un pozo de agua.

El primer sitio es en Llano Grande; pues se considera una recarga de agua periódica proveniente de la precipitación que se infiltra y almacena en el subsuelo. Además, del aporte de la corriente superficial del arroyo Llano Grande. En el subsuelo el agua subterránea se encuentra almacenada en el acuífero granular, constituido por sedimentos aluviales de granulometría variada y un espesor reducido y parcialmente saturado en una roca carbonatada fracturada con porosidad secundaria entre profundidades de 8 a 50 m.

El segundo sitio se localiza en el Sauce; el agua subterránea se presenta en una roca carbonatada fracturada a una profundidad entre los 40 a 50 m. Sin embargo, el agua está condicionada a que exista una recarga permanente proveniente del agua de lluvia, condición desfavorable debido a que el sitio se localiza en una región árida.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por el proyecto UNAM-DGAPA-PAPIME PE105520. Gracias a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por las facilidades para llevar a cabo los experimentos de campo. Agradecemos la participación de Valeria Gaspar Peña y Pablo Aguirre Díaz por su apoyo en la adquisición de datos geofísicos.

Referencias

- Alaníz Álvarez, S., Nieto Samaniego, A., Ortega Gutiérrez, F. (1994). Structural evolution of the Sierra of Juárez mylonitic complex, state of Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11 (2), 147-156.
- Campa, M. F., Coney, P. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico: Canadian. *Journal Earth Science*, (20), 1040-1051.
- Carrera Aguilar, A., Sepúlveda Hirose, R., Vidal García, M., Escobedo Zenil, D., Alfonso Romero, M. (2019). Diagnóstico multidisciplinario de la situación actual del servicio de agua en Concepción Buenavista, Oaxaca. Coloquio académico por la Equidad de Género en la FI-2018. Docencia, Investigación y Desarrollo Tecnológico realizado del 28 al 31 de enero de 2019. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cerca M. (2004). *Deformación y magmatismo Cretácico tardío-Terciario temprano en la zona de la Plataforma Guerrero, Morelos, Querétaro* [Tesis de Doctorado, Centro de Geociencias, UNAM], México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2007). *Determinación de la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero Tehuacán, estado de Puebla* (p. 39). México.
- Coney P. Jones, & Monger, J. W. H. (1980). Cordilleran suspect terranes. *Nature*, (288), pp. 329-333.
- Fitterman, D. V., & Stewart, M. T. (1986). Transient electromagnetic sounding for groundwater. *Geophysics*, 51 (4), 995-1005.
- García E. (1970). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2001). *Sistema de clasificación y levantamiento fisiográfico, escala 1: 1,000,000*. Aguascalientes, México, p. 21.
- Kaminsky, A. (2015). ZondST2D [Software]. Retrieved from <http://zond-geo.com/english/>
- Keppie, J. D., Dostal J., Cameron, K. L., Solari, L. A., Ortega Gutiérrez, F. (2003). Geochronology and geochemistry of Grenvillian igneous suites in the northern Oaxca Complex, southern Mexico. Tectonic implication. *Precambrian Research*, 120, pp. 365-389.
- Lankston, R. W. (1989). The seismic refraction method: A viable tool for mapping shallow targets into the 1990s. *Geophysics*, 54 (12), 1535-1542.
- López Ticha, D. (1969). Evaluación petrolífera de la cuenca de Tlaxiaco, estado de Oaxaca. Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, mesa redonda.
- López Ticha, D. (1985). Revisión estratigráfica y potencial petrolero de la cuenca de Tlaxiaco. *Boletín Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 37, 49-92.
- Morán Zenteno, D., Corona Chávez, P., Tolson, G. (1996). Uplift and subduction erosion in southwestern Mexico since the Oligocene: Pluton geobarometry constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, (141) 51-56.
- Navarro Santillán, D., Sour Tovar, F., Centeno García, E. 2002. Lower Missisipian (Osagean) brachiopodos from Santiago formation, Oaxaca, Mexico: Stratigraphic and tectonic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 15, 327-336.

- Nieto Samaniego, A., Alaniz Álvarez, S., Silva Romo, G., Eguiza Castro, M., Mendoza Rosales, C. (2006). Latest Cretaceous to Miocene deformation events in the Eastern Sierra Madre del Sur, México, inferred from the geometry and age of the major structures. *Geological Society of American Bulletin*, (118), 238-252.
- Robinson, R., Pantoja, Alor J. (1968). Tremadocian trilobites from Nochixtlán region Oaxaca, Mexico. *Journal Paleontology*, 42, 767-800.
- Rolia, E., & Sutjningsih, D. (2018). Application of geoelectric method for groundwater exploration from surface (A literature study). *In AIP Conference Proceedings*, 1977 (1), 020018
- Santamaría Díaz et al. (2008). Deformaciones cenozoicas en la cobertura de la falla Caltepec en la región de Tamazulapam, sur de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25 (3), 494-516.
- Solari, L. A., Keppie, D. J., Ortega Gutiérrez, F., Cameron, K. L., Lopez R., Hames, W. E. (2003). 990 and 1,100 Ma. Grenvillian tectonothermal events in the northern Oaxacan Complex, southern Mexico: roots and orogen. *Tectonophysics*, 365, 257-282.
- Sheehan, J. R., Doll, W. E., & Mandell, W. A. (2005). An Evaluation of Methods and Available Software for Seismic Refraction Tomography Analysis. *J. Environ. Eng. Geophys.*, 10 (1), 21-34.
- Zelt, C. A., Haines, S., Powers, M. H., Sheehan, J., Rohdewald, S., Link, C., Hayashi, K., Zhao, D., Zhou, H.-w. H.-w., Burton, B. L., Petersen, U. K., Bonal, N. D., & Doll, W. E. (2013). Blind Test of Methods for Obtaining 2-D Near-Surface Seismic Velocity Models from First-Arrival TraveItimes. *J. Environ. Eng. Geophys.*, 18 (3), 183-194.