



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

"CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE UNA NUEVA
FUENTE DE AGUA POTABLE LOCALIZADA POR LA FACULTAD
DE INGENIERIA EN UNA SUBCUENCA VECINA DEL VALLE
DEL MEZQUITAL"

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO

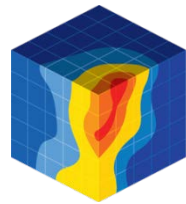
P R E S E N T A N

FÁTIMA FERNANDA ESPINOSA SÁNCHEZ
Y
ALEJANDRO GÓMEZ MONROY



DIRECTOR DE TESIS
DR. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIÚ

CIUDAD UNIVERSITARIA
CIUDAD DE MÉXICO, MARZO 2016



The
HYDRO
geology
Group
FACULTY OF ENGINEERING
U N A M



CONTRIBUCIÓN DEL GRUPO DE HIDROGEOLOGÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

Este documento representa la **tesis No. 17** tesis del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería (UNAM) como parte de su contribución científica y de formación de recursos humanos especializados en la evaluación cuantitativa de acuíferos.

This bachelor's dissertation represents the thesis # 17 of the Hydrogeology Group, Faculty of Engineering (UNAM, as part of our scientific contribution and human resources development in quantitative groundwater hydrology.

www.ingenieria.unam.mx/hydrogeology
@hydrogeologymx

Contenido

Resumen	4
Abstract	6
Capítulo 1. Introducción	8
1.1 Antecedentes	8
1.2 Objetivos	12
1.3 Localización del área de estudio	12
1.4 Justificación	14
Capítulo 2. Marco geológico-hidrogeológico y geofísica de exploración	16
2.1 Geología regional	16
2.2 Geología local	17
2.3 Hidrología e hidráulica de superficie	18
2.4 Hidrología subterránea	19
2.5 Geofísica de exploración	21
Capítulo 3. Métodos y Materiales	25
3.1 Recopilación de información	25
3.2 Trabajo de campo	26
3.3. Perforación exploratoria	28
3.4. Registro geofísico de pozo	30
3.5 Prueba de bombeo a caudal variable	33
3.5.1 Fundamento teórico	34
3.6 Muestreo hidrogeoquímico y calidad del agua	38
Capítulo 4. Resultados y Discusión	41
4.1 Perforación exploratoria	41
4.2 Hidroestratigrafía del subsuelo	42
4.3 Características petrofísicas de las hidrofacies.	47
4.3 Prueba de bombeo a caudal variable	52
4.5 Hidrogeoquímica	57
Capítulo 5. Conclusiones	63
Capítulo 6. Referencias Bibliográficas	65
Anexo 1	73

Resumen

La comunidad rural de San Agustín Tlalixticapa (SAT) perteneciente al municipio de Alfajayucan en el del estado de Hidalgo, se encuentra en una zona de clima que va de semiárido a árido, con una precipitación media anual de tan solo 550 mm. Dadas las circunstancias climatológicas en la zona, el acceso al agua potable para uso doméstico es limitado. Adicionalmente, la zona de estudio limita al sur-sureste con el Valle del Mezquital, región que recibe descargas directas de aguas residuales no tratadas, provenientes de la zona metropolitana de la Ciudad de México.

Dadas las características de pobreza y marginalidad en la zona, la Facultad de Ingeniería de la UNAM (FI-UNAM), por conducto del Grupo de Hidrogeología de la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (DICT), decidió realizar en 2009 un servicio no financiado al poblado de SAT, con objeto de estimar la factibilidad de extracción de agua subterránea y proponer, en su caso, la mejor localización para un pozo de abastecimiento de agua potable para dicha comunidad.

A finales de 2014, el poblado por conducto de la Junta de Agua y el Municipio de Alfajayucan, consiguió los recursos económicos y permisos legales para realizar la perforación exploratoria propuesta por el Grupo. Según nuestras sugerencias, la perforación de 200 m de profundidad total, se ubicó en las coordenadas 456 687 E y 2 254 842 N y se estimó que el nivel del agua subterráneo se encontraría a una profundidad máxima de 110 m (Facultad de Ingeniería UNAM, 2010).

El presente trabajo tiene por objeto caracterizar hidrogeológicamente la nueva fuente de agua subterránea localizada por nuestro Grupo. La integración de la hidroestratigrafía del subsuelo, el análisis de la respuesta

petrofísica de las hidrofacies, la evaluación de pruebas de aforo y la determinación de las características hidrogeoquímicas, permitieron establecer que las unidades acuíferas se correlacionan con un basalto fracturado entre los 98 m y 112 m de profundidad y una toba fracturada localizada en dos intervalos principales, de los 122 m a los 138 m y de los 150 m a los 163 m; dichas hidrofacies conforman las zonas más permeables y con mayor porosidad a lo largo de la columna del pozo. De acuerdo con el análisis de las curvas geofísicas de rayos gamma natural (GR), potencial espontáneo (SP), resistividad normal corta (16") y larga (64"), resistividad lateral (LR), resistividad puntual (PR), resistividad de fluido (MR), temperatura (T) y diferencial de temperatura (ΔT), se determinaron parámetros petrofísicos y estos datos se correlacionaron indirectamente con el modelo de Archie (1942) para estimar porosidades totales del orden de 5 % - 38 %.

La interpretación de la prueba de aforo a caudal variable se llevó a cabo usando los modelos de Jacob-Rorabaugh (Cooper, 1950; Rorabaugh, 1953) y Eden-Hazel (Eden y Hazel, 1973). El análisis de 7 escalones de 6 a 22 L/s y 42 h de duración, permitió establecer un caudal óptimo de extracción del orden de 15 L/s, así como un coeficiente no lineal y exponente no lineal de pérdidas de carga en el pozo (C y n, respectivamente) de $4.82E-7$ d^2/m^5 y 1.5 respectivamente. Estos resultados permitieron estimar una eficiencia hidráulica que oscila entre 55% y 76% considerando tales caudales. Adicionalmente, la transmisividad del acuífero se estimó en 2225.3 m^2/d

Finalmente, la calidad del agua se llevó a cabo analizando parámetros relacionados con características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000). Los resultados hidrogeoquímicos muestran concentraciones de los

parámetros de pH, turbiedad, sodio, nitratos, coliformes fecales y totales, hierro y aluminio por arriba del límite máximo permisible para agua potable en México (NOM-127) y de estándares internacionales establecidos en la "*Guidelines for drinking-water quality*" (OMS, 2011) Particularmente el contenido de coliformes fecales y totales muestra valores por encima para la NOM-127 (y OMS, 2011), por ello el agua requerirá de un tratamiento de potabilización previo a su consumo.

Abstract

San Agustin Tlalixticapa (SAT) is a rural community located within the municipality of Alfajayucan, inside the state of Hidalgo. The climate in this area is from arid to semiarid and the annual precipitation rate is 550 mm. Due to the climate in the study area, the availability of drinking water is limited. Additionally, the area is in direct contact in the South and Southeast with an area known as the Mezquital Valley, a portion of the state of Hidalgo which receives all the untreated wastewater from Mexico City and its metropolitan area.

Given the poverty characteristics of the area, the Faculty of Engineering of UNAM (FI - UNAM), through its Hydrogeology Group of the Earth Sciences Division (DICT), decided to provide a non-funded service for the SAT community on 2009, with the main objective of estimating the feasibility of groundwater extraction and proposing an ideal site for locating a water well which can provide potable drinking water to the community.

By the end of 2014, the community (through the assistance of the Water Administration and the Alfajayucan Municipality) had accumulated the necessary economical resources and fulfilled the

legal requirements to develop the exploratory perforation proposed by the Group. According to our suggestions, a perforation of 200 m depth should be located by the E 456 687 and N 2 254 842 geographic coordinates; the groundwater level was estimated to be found at a maximum of 110 m (Facultad de Ingeniería UNAM, 2010).

The main objective of this document is to describe the hydrogeologic characterization of this new groundwater source located by our Group. This includes the integration of the underground hydrostratigraphy, the petrophysical response, the evaluation of the pumping and step tests, together with the determination of the hydrogeochemistry's main characteristics, which allowed to correlate the aquifer units with a fractured basalt located between 98 m and 112 m of depth and a fractured tuff located in two main intervals, from 122 m to 138 m and from 150 m to 163 m; these hydrofacies represent the most permeable zones with the highest mean porosity values along the well column.

According with the analysis of the natural gamma ray (GR), spontaneous potential (SP), short (16") and long (64") normal resistivity, lateral resistivity (LR), puntual resistivity (PR), mud resistivity (MR), temperature (T) and temperature differential (ΔT), petrophysical parameters were estimated and they were indirectly correlated with the Archie (1942) model for estimating mean porosities around 5% and 38%.

The interpretation of the step drawdown test was made according to the Jacob-Rorabaugh (Cooper, 1950; Rorabaugh, 1953) and Eden-Hazel (Eden y Hazel, 1973) models. The 7 step analysis of 22 L/s and 42 h long let us establish an optimal extraction discharge rate of 15 L/s, alongside with a non-linear coefficient and a non-linear exponent of discharge loss on the well (C and n, respectively) of $4.82E-7 \text{ d}^2/\text{m}^5$ y 1.5

respectively. These results allowed to estimate an hydraulic efficiency that oscillates between 55% and 76%, assuming those discharge rates. In addition, the aquifer transmissivity was estimated to be 2225.3 m²/d.

Finally, the water quality was estimated analyzing parameters related with bacteriological, physical, organoleptic, chemical and radioactive parameters established by the Mexican Official Normative NOM-127-SSA1-1994(SSA, 2000). The hydrochemical results show concentrations above the maximum permissible limits according to both the NOM-127-SSA1-1994(SSA, 2000) and the WHO Guidelines for drinking-water quality(OMS, 2011); this includes measurements for pH, turbid, sodium, nitrates, fecal and total coliforms, iron, and aluminum. This is why the water will require a purifying treatment before its consumption.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

La caracterización de agua subterránea en la actualidad, se lleva a cabo combinando técnicas de reconocimiento hidrogeológico y de exploración geofísica.

En resumen, la hidrogeofísica trata de proveer datos con los siguientes objetivos principales: caracterización estructural,

dinámica de fluidos y la presencia/movimiento de contaminantes (Binley *et al.*, 2010)

En la actualidad, con el uso de avanzados programas computarizados y los importantes avances en tecnología espacial, se han desarrollado eficientes técnicas para el mejoramiento del manejo de agua subterránea, entre los cuales destacan la PR (percepción remota) y los SIG (sistemas de información geográfica). Estas técnicas han cambiado las formas e ideas en las que se basaba el manejo de recursos naturales y particularmente el de agua subterránea.

Las técnicas de PR se han convertido en una herramienta muy útil en la exploración, evaluación y manejo de agua subterránea hoy en día gracias a las ventajas que representan en cuanto a la disponibilidad temporal, espectral y espacial de datos de grandes e inaccesibles áreas en poco tiempo (Chowdhury *et al.*, 2003).

Se ha comprobado que la interpretación hidrogeológica de imágenes satelitales es una gran herramienta de búsqueda y análisis para zonas del mundo donde la información geológica y cartográfica es escasa o poco certera (Engman y Gurney, 1991). Rhind (1989) define los SIG como sistemas compuestos por hardware, software y distintos procedimientos diseñados para apoyar la captura, manejo, manipulación, análisis, modelado y disposición de datos espaciales referenciados para resolver problemas de planeación y manejo de dichos datos.

Existen seis principales áreas en donde las aplicaciones de la PR y los SIG son de gran utilidad en la exploración hidrogeológica: (i) exploración y caracterización de agua subterránea, (ii) selección de sitios de recarga artificial, (iii) modelado de flujo subterráneo y de flujo de contaminantes basado en SIG, (iv) caracterización de riesgos por contaminantes de agua subterránea, (v) estimación de la distribución de

recarga natural, y (vi) análisis de datos y monitoreo hidrogeológico (Jha *et al.*, 2007).

Por otro lado dentro de las técnicas geofísicas, destacan la prospección geoeléctrica y el método electromagnético de inducción transitorio en el tiempo (TEM). La aplicación de estas técnicas de medición de datos permite obtener un modelo pseudobidimensional de la propiedades físicas asociadas a cualquier acuífero.

La hidrogeofísica, como cualquier método de ingeniería tiene limitaciones que es necesario identificar. Day-Lewis *et al.* (2005) reportan que los datos obtenidos mediante métodos geofísicos tienen una resolución limitada, incluso en ensayos tipo *crosshole*. La principal consecuencia de esto es que no todas las "imágenes" geofísicas obtenidas cuentan con el mismo grado de exactitud y prácticamente todos los métodos de inversión requieren de información geológica previa para asegurar aproximaciones confiables. La interpretación de las imágenes geofísicas resultantes sin considerar dichas limitaciones pueden acarrear serios problemas que en ocasiones desencadenan errores considerables (Giustiniani *et al.*, 2008)

Otra herramienta importante son los registros geofísicos de pozos, que en estudios hidrogeológicos tienen una gran historia (Kobr *el al.*, 2005) aunque nunca han alcanzado la popularidad que esta herramienta petrofísica muestra en la industria petrolera. Sin embargo, los desarrollos actuales en la hidrogeofísica buscan proveer importante información cuantitativa de las características hidrogeológicas e hidráulicas del suelo y el subsuelo, así como datos cuantitativos referentes al movimiento de fluidos y solutos en el subsuelo (Cassiani *et al.*, 2006)

La comunidad de SAT se encuentra colindante con la zona conocida como el Valle del Mezquital (Fig. 2), esta ha sido

objeto de importantes estudios relacionados con el agua subterránea, su disponibilidad y la posible recarga de los acuíferos, debido a las fuertes influencias de las aguas residuales vertidas (Tabla 1) en las zonas de los distritos de riego 03 (Tula), 100 (Alfajayucan) y 25 (Ixmiquilpan), provenientes de la Ciudad de México (Jimenez y Chávez, 2004).

Tabla 1 Agua proveniente de la Ciudad de México (Jimenez y Chávez, 2004).

Agua	Volumen (m ³ /s)
Generada	60
80% residual	
20% lluvia	
Descargada tratada	10
Descargada sin tratar	50

Las aguas residuales son expulsadas por tres salidas artificiales: Emisor Central, Gran Canal y Emisor Poniente; de estos el 81% de los canales principales y el 52% de los laterales, no se encuentran revestidos, permitiendo la infiltración y recarga del agua residual directamente al acuífero (Lesser-Carrillo et al., 2011)

Estos factores, aunados a las condiciones climatológicas semiáridas de la región, hacen de la localización de nuevas fuentes de agua potable una importante tarea a realizar.

Adicionalmente a estos estudios, el Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería, UNAM, realizó con anterioridad un estudio exploratorio en la zona de SAT para la ubicación de un pozo de agua potable. De esta forma se obtuvo la geología de la zona y una estimación de la hidrogeología apoyado con geofísica y sondeo de pozos cercanos. Los resultados son reportados por Facultad de Ingeniería UNAM (2010) y como producto también se

generó la tesis de Miguel Cortés y Rochín García (2010) y Ruiz Aguilar (2010) .

1.2 Objetivos

El objetivo general es caracterizar una nueva fuente de agua subterránea (presumiblemente potable) para consumo humano en el poblado SAT (localizada previamente por la FI-UNAM) integrando métodos convencionales y modernos.

De manera particular, se establecieron los siguientes objetivos:

- Caracterizar la hidroestratigrafía del sitio.
- Estudiar las características petrofísicas de las hidrofacies con potencial acuífero.
- Evaluar la eficiencia hidráulica del pozo y los parámetros hidrogeológicos del acuífero.
- Evaluar la calidad del agua para consumo humano, comparando los resultados obtenidos con estándares nacionales e internacionales.

1.3 Localización del área de estudio

El área de estudio se encuentra localizada en el poblado de San Agustín Tlaxiaticapa, perteneciente al municipio de Alfajayucan, Hidalgo (coordenadas: 20° 24' latitud N y 99° 21' longitud W), a una altitud promedio de 1,880 msnm (Fig. 1). Pertenece a la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, también conocida como Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), la cual cuenta con aproximadamente 1000 km de longitud y una amplitud irregular entre los 80 y 230 km (Gómez-Tuena *et al.*, 2005), dicha región se caracteriza por planicies o valles fluviales,

aluviales y lacustres; representada ésta por la subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo, la cual se extiende desde la porción oeste del estado de Querétaro hasta la ciudad de Pachuca, presentando un corredor de lomeríos de material volcánico. Dicha subprovincia representa el 37.4% del territorio total del estado de Hidalgo ocupando una superficie de 7,821.33 km² (INEGI, 2011; Zamudio *et al.*, 1992).

En la actualidad se ha vuelto costumbre dividir la FVTM en tres sectores con base en su geología y tectónica, una porción occidental, una porción central y una porción oriental. El área de estudio se encuentra localizada en el límite entre el sector central y el sector oriental. (Gómez-Tuena *et al.*, 2005)(Fig. 2)

Según datos reportados en el anuario estadístico del estado de Hidalgo (INEGI, 2011), el municipio cuenta con una extensión territorial de 468 km², que representan el 2.23% de la superficie estatal.

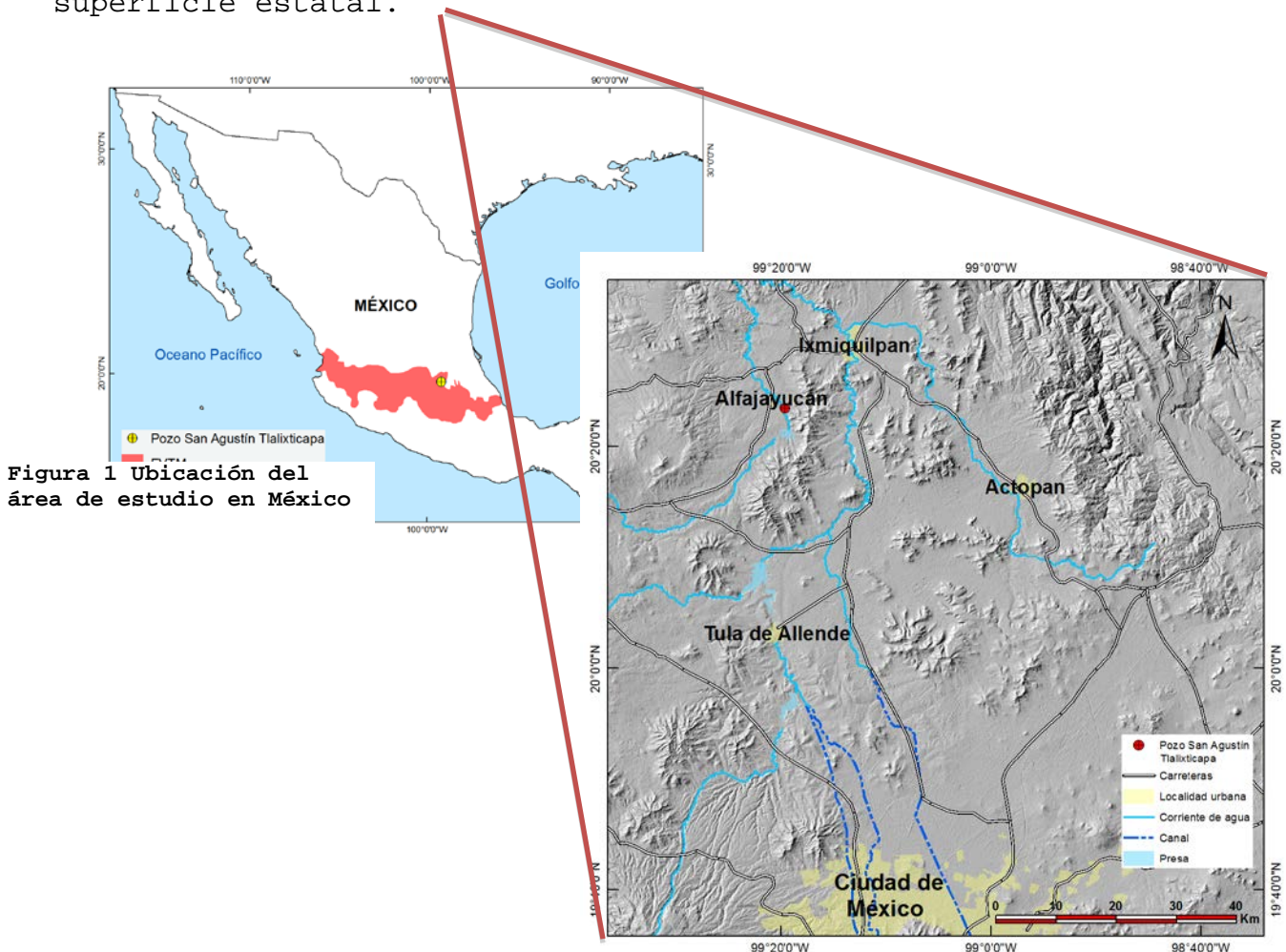


Figura 2 Localización del área de estudio, vías de acceso y colindancia del poblado San Agustín Tlaxiaticapa

INEGI en el censo de población y vivienda de 2010 (INEGI, 2010) reporta un total de 18,879 habitantes en el municipio, 393 de estos habitantes conforman el poblado de SAT, de los cuales 195 son mujeres y 198 son hombres (el expediente técnico realizado para la construcción del pozo reporta una población fluctuante de 825 habitantes). Dicho poblado cuenta con un total de 149 viviendas y tan sólo 100 de éstas se encuentran habitadas.

1.4 Justificación

El área de estudio fue elegida como resultado de la continuación del trabajo previo realizado en conjunto por el personal del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería y el Instituto de Geofísica de la UNAM, en donde se ubicó el sitio para la perforación exploratoria.

Dadas las circunstancias de escasez de agua potable en la región, las condiciones climatológicas semiáridas y la descarga constante de aguas residuales en la subcuenca vecina del Valle del Mezquital, se consideró adecuado beneficiar a una comunidad marginada como SAT.

Así mismo, se considera importante realizar una completa caracterización hidrogeológica de la zona, para tener la certeza

del óptimo funcionamiento del pozo y consecuentemente un mayor aprovechamiento del vital recurso.

Capítulo 2. Marco geológico-hidrogeológico y geofísica de exploración

2.1 Geología regional

La geología regional en el área de estudio está constituida por diversas unidades litoestratigráficas, tanto sedimentarias de origen marino y continental de edad Mesozoica, pertenecientes a la provincia del cinturón de pliegues y cabalgaduras de la Sierra Madre Oriental en su porción sur (Ortega *et al.*, 1992); y por lo menos cuatro unidades de origen volcánico relacionadas con la evolución de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) de edades variables entre el Mioceno medio y tardío (Gómez-Tuena *et al.*, 2005), siendo éstas las rocas que constituyen los acuíferos de importancia en la región.

De forma sintetizada, la evolución geológica de la FVTM se puede dividir en cuatro episodios principales (Gómez-Tuena *et al.*, 2005): (1) la instauración de un arco de composición intermedia en el Mioceno medio y tardío, (2) un episodio máfico del Mioceno tardío, (3) un episodio silícico de finales del Mioceno que llega a ser bimodal en el Plioceno temprano, y (4) la instauración de un arco con gran variabilidad composicional a partir del Plioceno tardío.

Las rocas de la zona de estudio se generaron durante el episodio de vulcanismo silícico (~7.5 - 5.5 Ma) del final del Mioceno y vulcanismo bimodal (5-3 Ma) del Plioceno temprano. Este episodio se desarrolla después del magmatismo máfico.

Es en la porción central de la FVTM dominan grandes calderas que produjeron tobas pumicíticas e ignimbritas de volúmenes importantes, siendo las de mayor interés, la caldera de Huichapan y de Amealco, dada su cercanía con la zona de estudio.

En esta zona, las lavas máficas a intermedias de finales del Mioceno se encuentran generalmente interestratificadas con las ignimbritas más recientes descritas anteriormente. (Gómez-Tuena *et al.*, 2005)

Cerca de la comunidad de San Agustín se encuentran las calderas de Huichapan, Donguinyo, Xithi y el volcán de Taxbath. Dichas estructuras se generaron durante el episodio silícico del Mioceno tardío (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2009)

Por la localización del poblado, se infiere que las rocas ígneas de la zona son el resultado de la actividad volcánica, principalmente del complejo calderico Donguinyó-Huichapan.

Las rocas en la zona de estudio con el mayor potencial acuífero son los basaltos, andesitas y riolitas fracturadas del Mioceno y los materiales piroclásticos constituidos por las tobas miocénicas Donguinyó y Huichapan.

2.2 Geología local

En Facultad de Ingeniería UNAM (2010) y Miguel Cortés y Rochín García (2010) se reportan afloramientos de depósitos volcánicos y piroclásticos del Cenozoico y algunos flujos de lava de composición andesítica a basáltica de edades que van del Mioceno al Plioceno. También se aprecian diversos depósitos lacustres que descansan sobre los depósitos ígneos extrusivos del Cenozoico. La Fig. 3 muestra el mapa geológico de la zona de estudio.

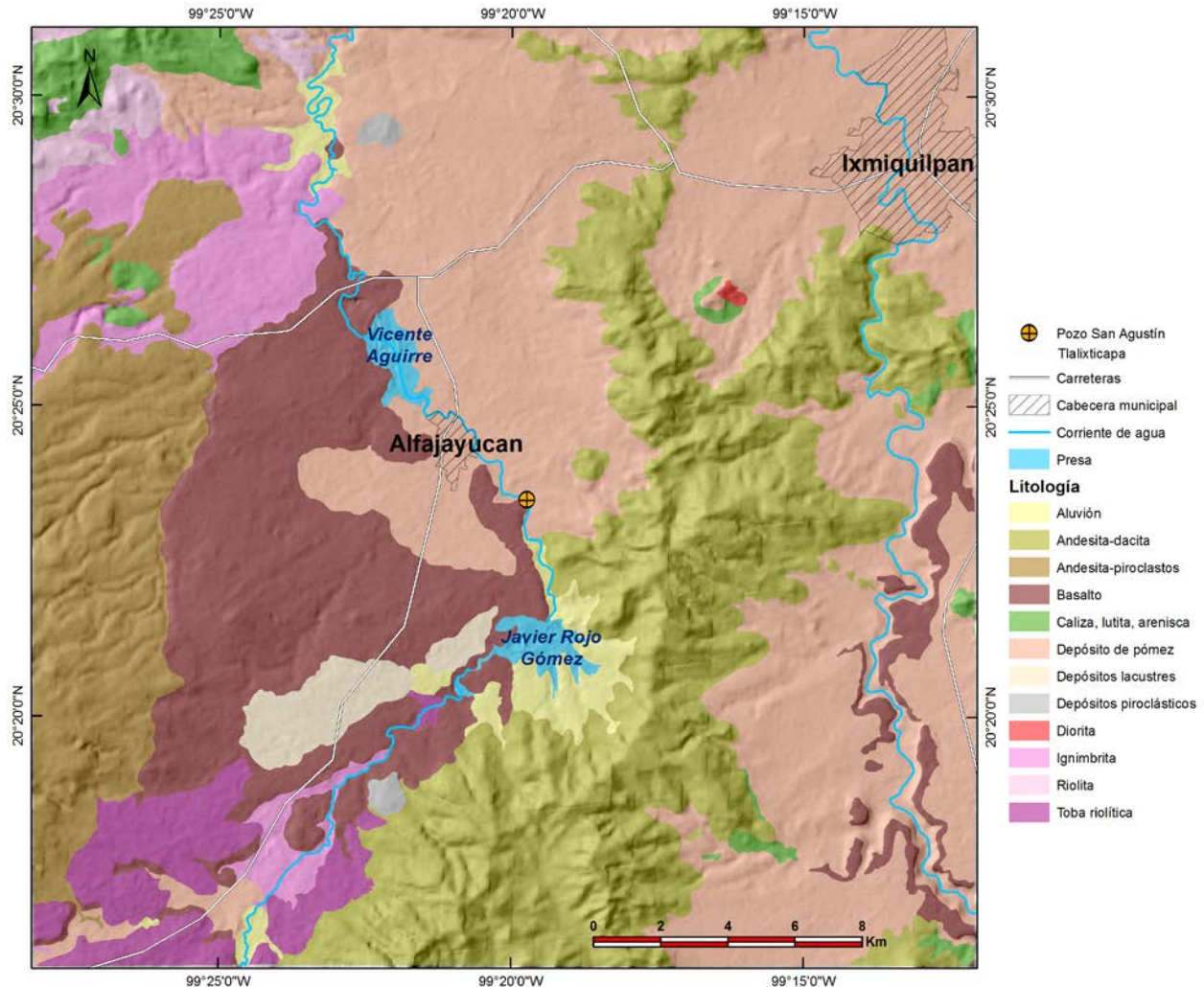


Figura 3 Geología del área de estudio, modificada de Facultad de Ingeniería UNAM (2010) y Miguel Cortés y Rochín García (2010)

2.3 Hidrología e hidráulica de superficie

El área de interés se encuentra ubicada dentro la región Hidrológico-Administrativa XIII (RHA XIII), Aguas del Valle de México (CONAGUA, 2009) en la región hidrológica 26 Pánuco, subregión hidrológica río Tula, en la Cuenca del río Moctezuma. La mayor parte del flujo hidrográfico drena desde la porción suroeste hacia el norte siendo la corriente principal el río Tula. Dentro de la RHA XIII se encuentran cinco distritos de riego (DR), siendo el de nuestro interés el DR 100

Alfajayucan(CONAGUA, 2014).El sistema local de agua que abastece de agua potable a la comunidad de San Agustín Tlalixticapa es el sistema de aguas Chapantongo.

Como parte de la infraestructura hidráulica, existen varios canales de agua superficial de los cuales 673 km están revestidos, 829 sin revestir y 25.4 son drenes (CONAGUA, 2009), para abastecer el distrito de riego, acueductos e importantes presas como la Vicente Aguirre al noroeste, y la Javier Rojo Gómez al sureste. El colector más importante es el río Tula, que en su origen es conocido como río Tepeji, que recibe los aportes de los ríos Oro, Sabinos y San Jerónimo.

Aguas abajo, el río Tepeji es interceptado por la presa Requena para contener y controlar sus descargas; a la salida de esta presa inicia el río Tula que descarga más adelante en la presa Endhó. Aguas abajo de la presa Requena se suman las aguas negras del río El Salto y del Emisor Central que conducen las aguas residuales provenientes de la zona metropolitana de la Ciudad de México. El río El Salto es la continuación del Tajo de Nochistongo, obra que es utilizada para la descarga de aguas negras del sector poniente de la Ciudad de México.

2.4 Hidrología subterránea

Trabajos previos integrados por la CONAGUA (2013), permiten definir en la zona de estudio el acuífero Chapantongo-Alfajayucan (1309), limitado al norte y noreste con el acuífero Ixmiquilpan, al sur y sureste con el acuífero Valle del Mezquital, al noroeste y oeste con el acuífero Huichapan-Tecozautla y al oeste con el acuífero El Astillero (Fig.4), todos pertenecientes al Estado de Hidalgo. Se describe como un acuífero libre a semiconfinado, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por una alternancia de

materiales granulares aluviales, rocas volcánicas y piroclastos retrabajados que en su totalidad presentan permeabilidad media y un espesor promedio de 400 m. En su parte inferior está constituido por rocas volcánicas que presentan porosidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras del acuífero, incluyendo el basamento hidrogeológico, están representados por las mismas rocas volcánicas cuando a profundidad dejan de estar fracturadas, en especial la riolita Don Guinyó.

El flujo subterráneo tiene una dirección preferencial de sur a norte en sentido hacia el río Tula. De acuerdo a los resultados de mediciones piezométricas realizadas en el 2012, se registraron profundidades del nivel estático que varían de 50 a poco más de 200 m (CONAGUA, 2013).

Los valores de los parámetros hidráulicos reportados por la CONAGUA (2013) para el acuífero Chapantongo-Alfajayucan, fueron obtenidos mediante estudios realizados en 2012-2013 por medio de 17 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y de recuperación. Se incluyeron además, 70 pruebas realizadas en estudios previos. Se definió una transmisividad que varía de $3.46E-02$ a $1.58E+04$ m²/d, en tanto que la conductividad hidráulica oscila entre $3.46E-02$ y $1.04E+02$ m/d (CONAGUA, 2013).

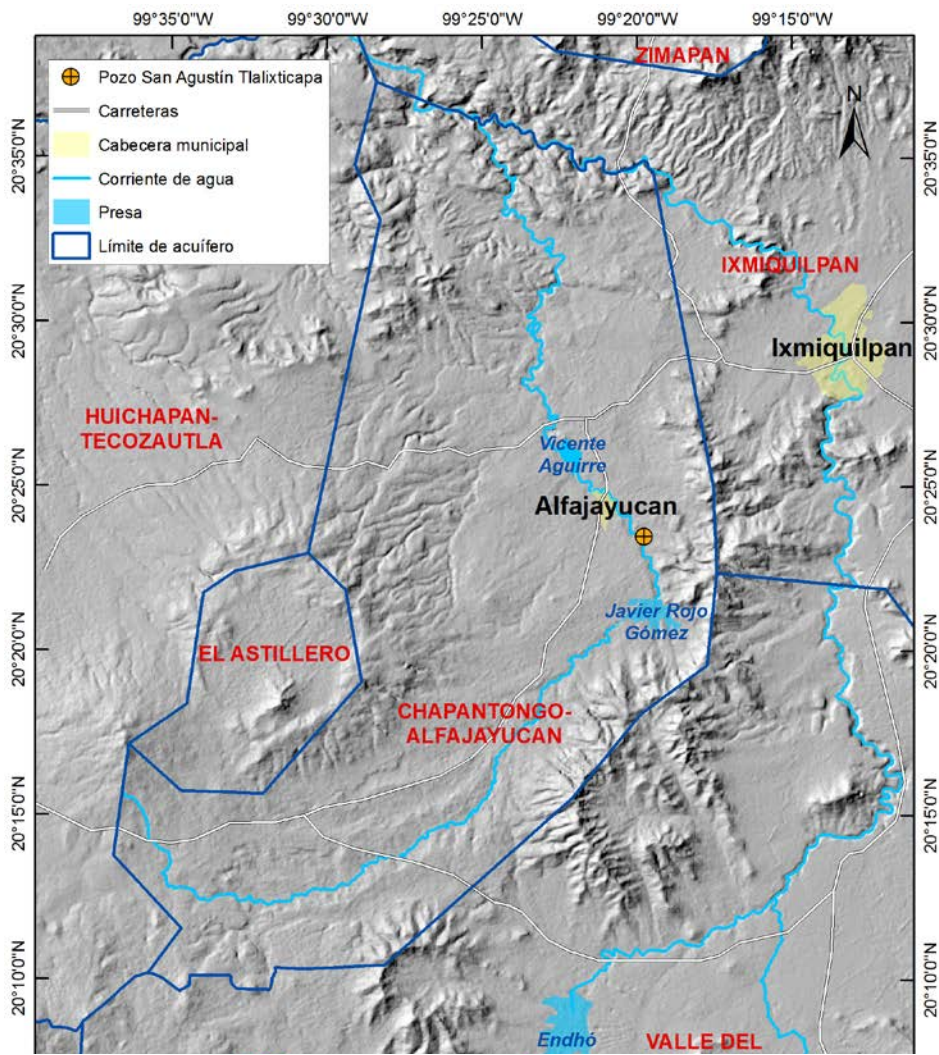
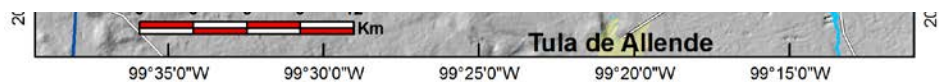


Figura 4 Límites del acuífero Chapantongo-Alfajayucan, principales presas y ríos (CONAGUA, 2013)



2.5 Geofísica de exploración

Con el fin de conocer las características hidrogeológicas de las distintas formaciones en la zona de estudio, durante etapas anteriores del proyecto, se decidió emplear Transitorios Electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM) como método de exploración.

El método geofísico permite conocer la distribución de resistividades eléctricas en el subsuelo. Para conocer a fondo el principio físico del método se recomienda consultar trabajos

especializados fuera del alcance de este trabajo (McNeill, 1990, 1994).

En Facultad de Ingeniería UNAM (2010), se reportan un total de 41 TEM analizados, procesados e invertidos. Con los datos obtenidos se elaboraron 4 distintas secciones geoelectricas (Fig.5), de las cuales únicamente se tomó en cuenta la sección geofísica No.1, por ser la que atraviesa el poblado de SAT. Tiene una orientación 18° NW-SE y está compuesta por los TEM con las siguientes claves ALF1, ALF2, ALF3, ALF4, ALF5, SA-9 y SA-12 (Fig. 6). Con base en los resultados de los estudios de prospección geofísica superficial fueron definidas cuatro principales unidades hidrogeológicas en la zona de estudio como se muestra a continuación:

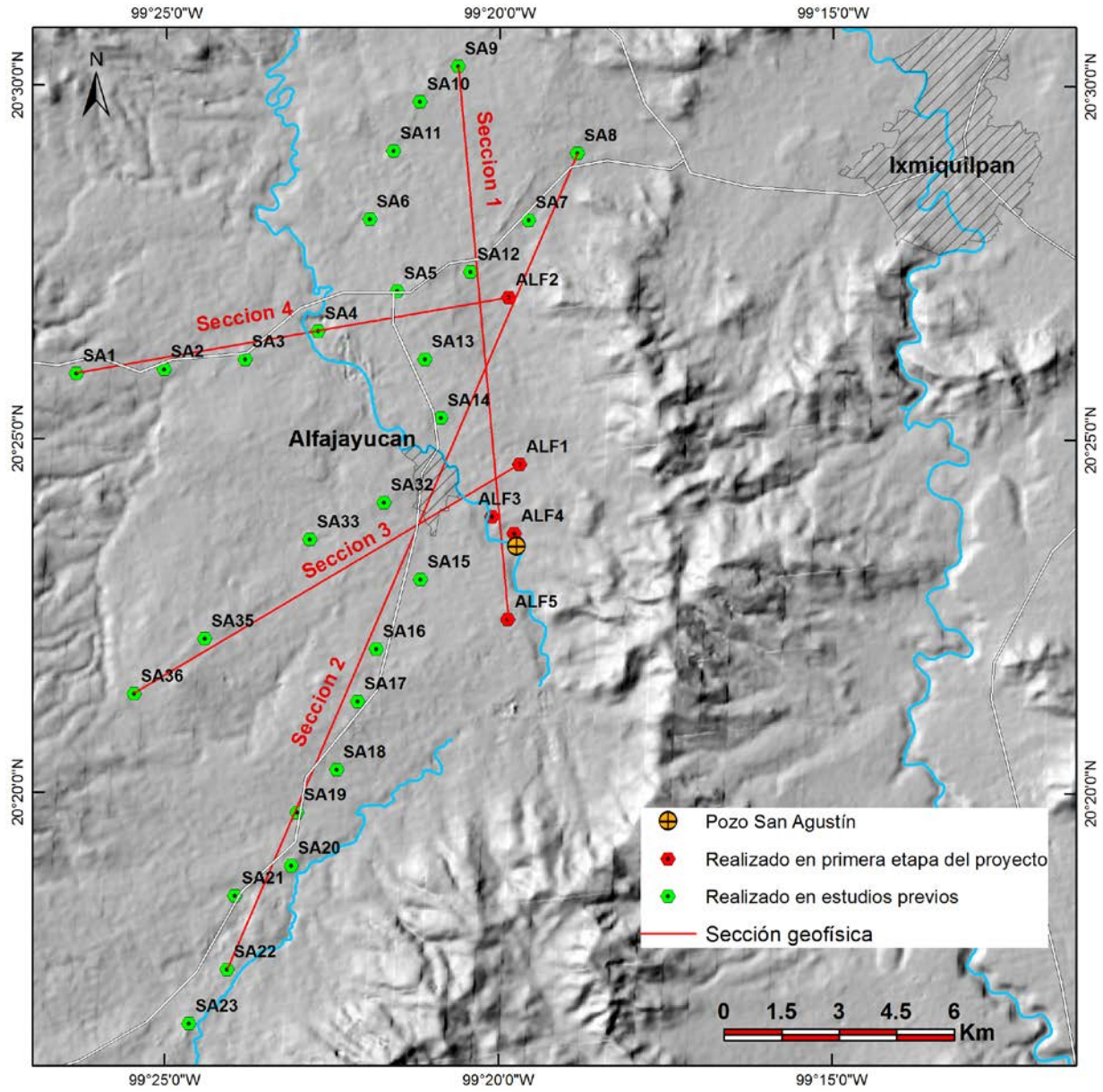


Figura 5 Secciones geofísicas utilizadas para la caracterización hidrogeológica.

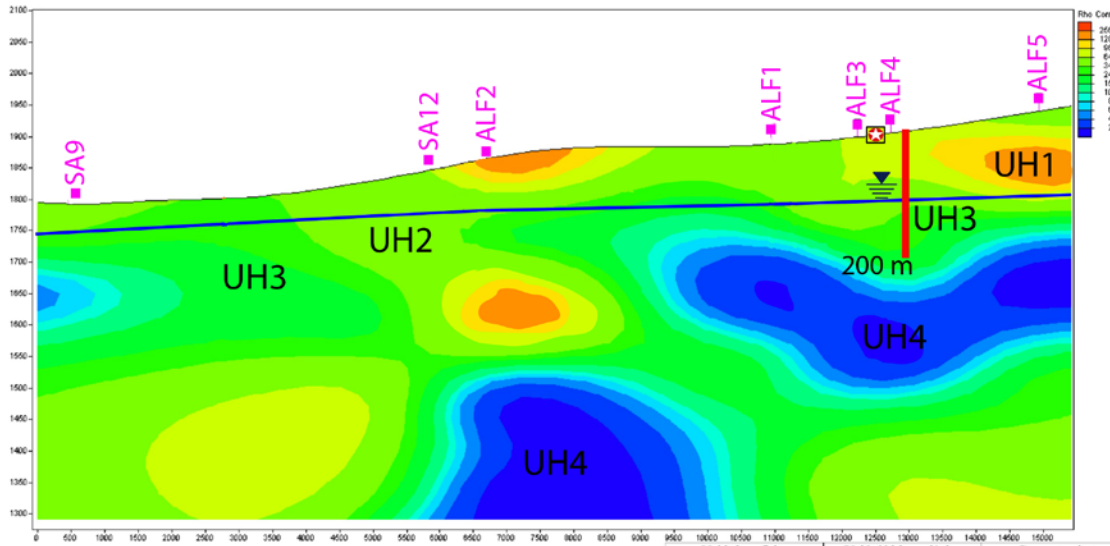


Figura 6 Sección Geofísica 1(Ruiz Aguilar, 2010)

Hidrogeológicamente, la unidad UH3 representa el acuífero de mayor potencial en el subsuelo de la zona de estudio, de acuerdo con los valores de resistividad medidos en dicha unidad. Se correlaciona con tobas arenosas e ignimbritas fracturadas con un espesor aproximado de 40 m a 200 m, a una profundidad de 150 m para la zona donde se perforó el pozo San Agustín.

Capítulo 3. Métodos y Materiales

3.1 Recopilación de información

La información utilizada para la elaboración del presente trabajo consta de la recopilada en distintas instancias, que incluyen dependencias académicas, gubernamentales estatales y federales, como el INEGI, el SGM o la CONAGUA y dependencias privadas, utilizando principalmente estudios topográficos, geológicos, hidrogeológicos y geofísicos que se han llevado a cabo en la zona de estudio con anterioridad.

La información recopilada se conforma por distintas áreas de interés para, las cuales son: Hidráulica, hidrogeología, geología y geofísica principalmente.

Una vez recopilados todos estos trabajos, se elaboró una base de datos con ayuda del programa MENDELEY, el cual permitió organizar los artículos consultados y referenciar de forma simple y automática las citas consultadas.

Además de los trabajos previos con relación directa a este estudio los cuales son Facultad de Ingeniería UNAM (2010), Miguel Cortés y Rochín García (2010) y Ruiz Aguilar (2010) se evaluaron los efectuados por la CONAGUA relacionados con la disponibilidad del acuífero en cuestión y la cuenca a donde pertenece el poblado de SAT.

En cuanto a los temas de geología regional y local, los principales trabajos consultados fueron los elaborados por Gómez-Tuena *et al.* (2005), Aguirre-Díaz y López-Martínez (2009), entre otros que enriquecieron la visión, estos trabajos describen a detalle los distintos eventos volcánicos ocurridos en la región y la evolución geológica de la misma.

Así mismo, por la cercanía del poblado de SAT con la zona conocida como el Valle del Mezquital, se revisaron una serie de publicaciones referentes al tema importantísimo que es la disponibilidad y contaminación de agua subterránea en la región, el impacto y los riesgos que implican el uso de agua contaminada (Cajuste *et al.*, 1991; Carrera-Hernández y Gaskin, 2009; Chávez *et al.*, 2011; Jimenez y Chavez, 2005, 2004; Jimenez *et al.*, 2000; Lesser-Carrillo *et al.* 2011).

3.2 Trabajo de campo

Con el objetivo de llevar a cabo el reconocimiento del área de estudio y dar seguimiento al proyecto, se realizaron una serie de actividades que han contribuido a la obtención de datos y su análisis (Tabla 2).

Tabla 2 Trabajo de campo

			Lugar Fecha	Pozo SAT 15 ene 2014	Pozo SAT 10 mar 2014	Pozo SAT 15 oct- 19 nov 2014	Pozo SAT 5-8 mar 2015
Actividades realizadas	Equipo utilizado	Especificaciones					
Reconocimiento del pozo	na	-		<input type="checkbox"/>			
Medición del NE	Sonda Sonlist 122	-		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Medición de parámetros hidrogeoquímicos in situ	Multi-lector analítico HANNA HI 9828-0	Los parámetros analizados se muestran en la Tabla 3		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Recuperación de recortes obtenidos durante la perforación del pozo	na	-		<input type="checkbox"/>			
Muestreo de agua	Bailer	Para análisis por el laboratorio de		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

		agua y geoquímica ambiental del Instituto de Geología UNAM. El muestreo se hizo con base en el protocolo especificado por la OMS (1966).	
Muestreo de agua	Instrumento diseñado (tubo de PVC en un tripie) para extracción de agua en el pozo	Para análisis por laboratorio certificado Laqmisa. El muestreo se hizo con base en el protocolo especificado por la OMS (1966).	
Observación de re-perforación por derrumbe a 29 m de prof.	Gardner-Denver, de dos motores en línea para efectuar perforación rotatoria	La re-perforación y ampliación fue realizada por la empresa JMR Perforaciones de Pozos	<input type="checkbox"/>
Observación de ampliación para la colocación del filtro sanitario			<input type="checkbox"/>
Supervisión de prueba de aforo	Motor marca Cumins de 350 HP, cabezal marca Amarillo de 300 HP, bomba marca Ocelco.	La empresa encargada de realizar la prueba de aforo fue Corporativo Rebopoz, S.A. de C. V. Diámetro de descarga 4" Diámetro de orificio cal. 3" Diámetro de columna 4" Longitud de la columna 150 m	<input type="checkbox"/>

Tabla 3 Parámetros medidos in situ

Parámetro	Unidad
Temperatura	°C
REDOX	mV
Oxígeno disuelto	-
Resistividad	ohm/cm
Conductividad eléctrica	μS/cm
pH	unidades de pH



○ Segundo muestreo para determinación de calidad del agua ○○ Muestreador de PVC ○○ Introduccion del muestreador al pozo ○○ Virtiendo el agua en los recipientes

3.3. Perforación exploratoria

Unicamente se recuperaron los primeros 66 m de recortes de la perforación, se realizó una descripción litológica con apoyo de un microscopio estereográfico, tomando en cuenta que para los fines hidrogeológicos de este trabajo no es de suma importancia conocer detalladamente la mineralogía de las unidades litológicas en el sitio, si no su propiedades geohidrogeológicas, esta descripción fue hecha de forma muy general y basada en los diagramas Q-A-P-F para rocas volcánicas

y volcánicas piroclásticas. Ya que las muestras obtenidas eran de tamaño pequeño, para su fácil análisis, la descripción estuvo enfocada en gran medida a la textura y colores que presentaban los recortes, misma descripción se verificaría con la interpretación del registro geofísico de pozo.

Para el intervalo de 46 m a 60 m donde se encontró abundancia de materiales granulares, se realizó un análisis granulométrico en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería UNAM y se clasificó con base en la escala de Wentworth (1922)

Se decidió hacer el análisis granulométrico con los siguientes tamices, #10, #18, #35, #60, #120, #230, #400; para que se pudiera clasificar con base en la escala de Wentworth (1922), ya que el objetivo fue saber si estaba bien o mal clasificado, y al ver que predominaban los granos de tamaños de arenas, se creyó innecesario utilizar tamices de diferente característica o mallado de otros tamaños.

Si bien el intervalo analizado es muy somero, es producto de episodios volcánicos que se han repetido constantemente en la región y es referencia de intervalos más profundos, los cuales probablemente sí estén en contacto con el acuífero o incluso sean parte del él.

La clasificación del intervalo recuperado se correlacionó con la información obtenida con los demás métodos.

La segunda perforación (mismas que se hizo tras observar que el socavón que realizaron inicialmente había sufrido un derrumbe parcial a los 29 m de profundidad) y diseño del pozo se hicieron en tres etapas, la primera fue la etapa de perforación, y concluyó al llegar a los 200 m de profundidad. En esta etapa, el diámetro del pozo fue de 12".

Posteriormente inició la segunda etapa, de ampliación, en la cual únicamente se aumentó el diámetro de los primeros 15 m,

siendo originalmente de 18" y concluyendo de 24" para introducir un sello sanitario de 20" en los 15 m más cercanos a la superficie. El resto del pozo se amplió a 18".

El pozo tiene un profundidad total de 200 m, los primeros 100 m tienen tubería de acero ranurada y con un diámetro de 10", y de los 100 m hasta los 200 m es tubería de acero sellada de 10". El diámetro de la perforación para insertar la tubería fue de 18". Se introdujo grava de 1/4" a 1/2" hasta los 200 m.



○ Pozo re perforado y equipado para prueba de bombeo ○ ○ Entubando el pozo para prueba de bombeo (Aforo) ○ ○ Entubando el pozo para prueba de bombeo (Aforo) ○ ○ ○ ○ Re perforando

3.4. Registro geofísico de pozo

La empresa privada Exploración, Perforación y Estudios del Subsuelo S.A. de C.V. llevó a cabo una serie de registros geofísicos de pozo (RGP) el día 30 de octubre del 2013 en el pozo perforado dentro de la comunidad de SAT. El equipo utilizado para la ejecución del RGP consiste en una sonda marca Century Geophysical Corporation, modelo 8144. Las curvas

registradas fueron: gamma natural (GR), potencial espontáneo (SP), resistividad normal corta (16") y larga (64"), resistividad lateral (LR), resistividad puntual (PR), resistividad de fluido (MR), temperatura (T) y diferencial de temperatura (ΔT).

Los resultados obtenidos fueron digitalizados con el software AutoCAD 2010, y posteriormente procesados e interpretados con el software Interactive Petrophysics V 3.5.

La profundidad del nivel estático fue encontrada a 84 m, por lo que únicamente se tienen datos de algunas curvas a profundidades mayores, debido a que los registros de resistividades sólo se pueden medir en medios saturados de fluido.

Para su análisis se tomó en cuenta que para secuencias siliciclásticas, la curva de rayos gamma determina el contenido de arcillas (Bassiouni, 1994). Sin embargo, para rocas volcánicas, la radiactividad natural se encuentra directamente relacionada a la composición mineral de dicha roca (Ran *et al.*, 2014). De esta forma, rocas ácidas presentan una respuesta de valores altos en su curva de rayos gamma debido a su alto contenido de feldespato potásico. Tomando esta información en cuenta, se puede llegar a una aproximación de la litología volcánica presente, directamente del análisis de la curva de rayos gamma.

Stefansson *et al.* (2000) utilizaron una tendencia lineal para calcular una curva de contenido de sílice. Utilizando dicha curva y analizando su intersección con la curva de resistividad normal, se pudieron definir las principales litologías/facies presentes en la columna del pozo.

La resistividad del agua de formación se estimó por medio de un procedimiento estándar de la SP y las curvas de temperatura

(Bassiouni, 1994), considerando la resistividad del lodo filtrado y la del fluido de perforación iguales.

Por otro lado, la ecuación de Archie (1942) relaciona la resistividad eléctrica de una roca con su saturación de agua, porosidad, resistividad del agua de formación y tres parámetros empíricos (Asquith y Gibson, 2014) exponente de cementación (m), que depende del tamaño y distribución de grano, factor de tortuosidad (a) y el exponente de saturación (n), que usualmente es definido con un valor igual a 2. Al tratarse de flujos en medios fracturados (como es el caso), m tiene valores entre 1 y 3, mientras que a es igual a 1 (Rider, 1996). Sin embargo estos mismos autores consideran que la utilización de un solo valor para el exponente de cementación no es apropiado para rocas volcánicas dadas sus grandes variaciones en tamaño, forma y rugosidad de la estructura de sus poros.

Para este trabajo, se consideran condiciones de saturación en el modelo de Archie, de manera que posible expresar la porosidad en función de la resistividad del agua contenida en el acuífero, la resistividad, el exponente de cementación y el factor de tortuosidad. De esta forma se estimó la porosidad acuífera a través de la relación establecida en la ecuación de Archie (Ec.3), la cual es estimada partiendo de las ecuaciones básicas de la petrofísica (Ec.1 y 2) :

$$R_0 = F \cdot R_w \quad (1)$$

Donde:

R_0 = Resistividad total de la roca

F = Factor de resistividad de la formación ... $F = \frac{a}{\phi^m}$ (en función del tipo de roca)

Donde:

a = constante

ϕ = porosidad

m = factor de cementación

R_w = Resistividad del agua

$$I = \frac{R_t}{R_0} \quad (2)$$

Donde:

I= Índice de resistividad

Rt= Resistividad de la roca

$$SW^n = \frac{F \cdot R_w}{R_t} \quad (3) \quad \text{Ecuación de}$$

Archie

Donde:

Sw = Saturación de agua

n = Exponente de saturación, usualmente n=2

F.Rw = Ro cuando la formación está 100% saturada(ver Ec.1) por ello, la Ec. 3 usualmente se escribe de la siguiente manera.

$$SW^2 = \frac{R_0}{R_t}$$

(3.1)

La saturación del agua (al cuadrado) es igual a la resistividad de la roca 100% saturada de agua dividida entre la resistividad de la roca. La ecuación es comunmente esrita:

$$SW = \sqrt{\frac{R_0}{R_t}} \quad \text{ó} \quad = \sqrt{\frac{F \cdot R_w}{R_t}}$$

(3.2, 3.3)

Por lo anterio, se utiliza la curva de resistividad normal larga como la resistividad de la formación y un valor estimado para Sw a partir del registro Sp. Como se aprecia, la ecuación de Archie define una relación inversa entre la porosidad y la resistividad de la formación.

3.5 Prueba de bombeo a caudal variable

Una vez concluida la ampliación del diámetro del pozo para introducir el ademe liso y ranurado, se llevó a cabo una prueba de aforo a caudal variable (última etapa), que duró 72 horas y fue desarrollada por la empresa privada "Corporativo Rebopoz".

La prueba de aforo se realizó de la siguiente manera.

Tabla 4 Datos de prueba de bombeo a caudal variable, caudales y tiempos

Tiempo (min)	Caudal (m ³ /d)
60	535
420	817
780	1131
1140	1332
1500	1532
1860	1714
2220	1904

Ya obtenidos los datos, se cargaron e interpretaron en el software AQTESOLV(Duffield, 2007) por los métodos Jacob-Rorabaugh(Cooper, 1950; Rorabaugh, 1953) y Eden-Hazel(Eden y Hazel, 1973) obteniendo así una estimación de los parámetros hidráulicos del acuífero y la eficiencia del pozo.

Por otro lado se interpretaron los datos con el método Rorabough (Rorabaugh, 1953), al ser una prueba de aforo (a caudal variable), el principal objetivo de esto fue determinar la eficiencia hidráulica de pozo, la productividad del pozo, caudal óptimo de extracción y pérdidas de carga.

3.5.1 Fundamento teórico

Una prueba de bombeo a caudal variable o una prueba de bombeo a caudal en escalones (*step drawdown test*) es una prueba de bombeo en la cual se observa el abatimiento de un pozo mientras la tasa de descarga del pozo se aumenta en escalones. Las pruebas de bombeo con caudal en escalones pueden utilizarse para determinar distintos parámetros hidráulicos de un acuífero

como pueden ser: la transmisividad, el componente de pérdida o el coeficiente de almacenamiento (Clark, 2016).

El abatimiento en un pozo bombeado tiene dos componentes: pérdidas en el acuífero y pérdidas en el pozo. La pérdida del acuífero es el abatimiento que resulta de la resistencia al flujo laminar dentro del acuífero; por otra parte, la pérdida del pozo es resultado de la resistencia al flujo turbulento en la zona adyacente al pozo.

Cooper (1950) sugirió que la pérdida en un pozo es aproximadamente proporcional al cuadrado de la tasa de descarga y que la relación entre los dos componentes del abatimiento es aproximadamente:

$$S_w = B \cdot Q + C \cdot Q^n$$

(4) *Abatimiento real*

Donde:

B = Coeficiente de pérdidas de circulación en la formación, varia con el tiempo de bombeo.

Q = Caudal

C y n = Coeficiente de pérdidas en el pozo, son independientes del tiempo.

Por lo que una prueba de bombeo a caudal en escalones, como la describe Cooper (1950), es una prueba en la que el abatimiento de un pozo es observado mientras la tasa de descarga (caudal) aplicada al pozo es incrementada en escalones. La tasa de descarga se mantiene constante a lo largo de cada escalón, y el cambio en dicha tasa se debe efectuar lo más rápido posible.

La gráfica del abatimiento VS. tiempo muestra una curva escalonada (Fig. 7)

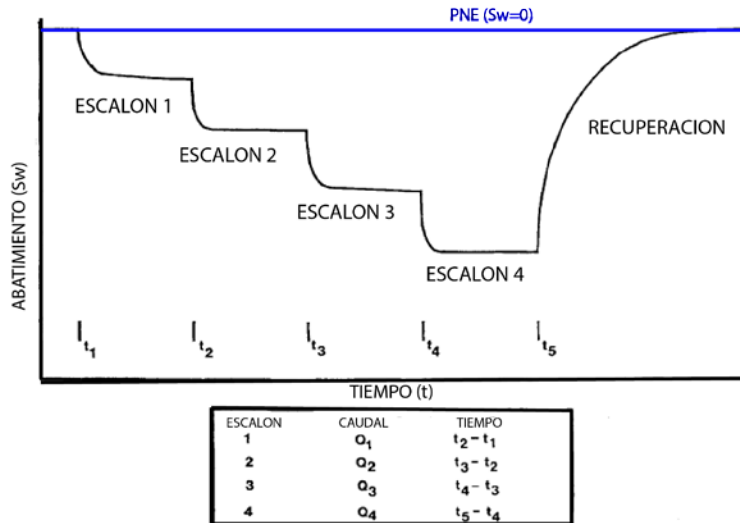


Figure 7 Bombeo escalonado tomado de (Clark, 2016)

En cualquier prueba de éste tipo, se tiene que asumir que el incremento en la tasa de descarga al iniciarse cada escalón es equivalente a un nuevo bombeo en el pozo con una tasa de descarga igual a el incremento en la tasa de descarga. El abatimiento total en una prueba de bombeo a caudal en escalones es igual a la suma de los abatimientos causados por los distintos bombeos teóricos responsables de cada escalón de descarga en la prueba (Clark, 2016).

En la Ec. 4 $B \cdot Q$ se refiere el descenso por las causas debidas al acuífero, el descenso en el borde exterior del tubo necesario para que el agua fluya al pozo en régimen laminar según la Ley de Darcy, y expresa el abatimiento teórico, mientras que $C \cdot Q^n$ se refiere a pérdidas por no validez de la Ley de Darcy en las proximidades del pozo, de penetración en el pozo o efecto parietal, ascensionales en el pozo y/o de entrada en la bomba, y expresa todas las pérdidas de carga (Custodio y Llamas, 2001). Walton (1962) denominó a C como un coeficiente no lineal de pérdidas de carga y reporta el deterioro de un pozo en función de algunos valores de C, cuando $C > 3800 \text{ s}^2/\text{m}^5$, el

deterioro que sufre el pozo es severo, cuando $1900 < C < 3800 \text{ s}^2/\text{m}^5$, el deterioro es medio.

El valor de n en la ecuación puede variar de 1 a 4 (Vargas y Arellano, 2002) sin embargo Cooper (1950), propone fijar $n=2$, para que sea más fácil la interpretación y la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$S_w = B \cdot Q + C \cdot Q^2 \quad (4.1)$$

Al conocer caudales sucesivos y sus respectivos descensos se puede resolver la ecuación anterior de la siguiente manera:

$$S_1 = B \cdot Q_1 + C \cdot Q_1^2 \quad ; \quad S_1/Q_1 = B + C \cdot Q_1$$

$$S_2 = B \cdot Q_2 + C \cdot Q_2^2 \quad ; \quad S_2/Q_2 = B + C \cdot Q_2$$

Una de las maneras en que se resolvió la ecuación en dicho trabajo fue suponiendo $n=2$, efectuando una resolución gráfica, dibujando S/Q en función de Q y trazando la recta que pasara por esos puntos, o que se acercara más. La pendiente de esa recta da el valor de C y la ordenada al origen el valor de B .

No siempre $n=2$, para ello se tendría que resolver la ecuación 1, y así obtener B , C y n , y calcular todos los demás parámetros.

Como resultado final se expresa la siguiente ecuación que relaciona el abatimiento teórico ($B \cdot Q$) y el abatimiento real (Ec.4) y da como resultado la eficiencia del pozo.

$$\text{Eficiencia \%} = \frac{S_{teórico}}{S_{real}} * 100\%$$

(5)

Donde:

S = abatimiento.

Para obtener un caudal óptimo al que se debería bombear para que no hubiera pérdidas generadas por el pozo, se optó nuevamente por un método gráfico en el cual se dibujan los

abatimientos máximos para cada caudal, contra su caudal respectivo. Las pérdidas en la formación en dicha gráfica tienen una tendencia lineal, mientras que las pérdidas en el pozo una tendencia exponencial, sabiendo esto al graficar los datos sobreponemos una línea recta y se observa el comportamiento de la gráfica, cuando la curva generada deje de ser una recta corresponde al valor de caudal óptimo al que se debe bombear para que tenga un mejor y duradero funcionamiento.

La prueba se interpretó en tres partes, pero por la corta duración de la recuperación y al observar que la primera parte era la más confiable, sólo se decidió reportar ésta.

3.6 Muestreo hidrogeoquímico y calidad del agua

Posterior al muestreo del día 15 de enero, la muestra de agua recolectada se llevó al laboratorio de agua y geoquímica ambiental en el Instituto de Geología de la UNAM, en donde se realizó la determinación de elementos traza, la cuantificación de iones mayoritarios y el contenido de sólidos totales disueltos.

La determinación de elementos se realizó por Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-OES) en un equipo Perkin Elmer 8300; las concentraciones de iones mayoritarios se analizaron por cromatografía iónica en un cromatógrafo Basic IC plus 883, Metrohm y un cromatógrafo Waters modelo 1525; y los bicarbonatos se cuantificaron por medio de un proceso de titulación potenciométrico (Tabla 5).

Table 5 Parámetros que fueron analizados por el laboratorio de agua y geoquímica ambiental del Instituto de Geología de la UNAM y los métodos por los que fueron analizados

Método	Parámetro
Espectrometría de Emisión Óptica con	Aluminio

Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-OES)	Arsénico
	Cadmio
	Cromo
	Cobre
	Hierro
	Manganeso
	Plomo
	Zinc
	Bario
	Sodio (Na ⁺)
	Potasio (K ⁺)
Cromatografía iónica	Magnesio (Mg ²⁺)
	Calcio (Ca ²⁺)
	Fluor (F ⁻)
	Cloruros (como Cl ⁻)
	Bromo (Br ⁻)
	Nitritos (NO ₂ ⁻ /N)
	Nitratos (NO ₃ ⁻ /N)
	Fosfato (PO ₄ ³⁻)
	Sulfatos (SO ₄ ²⁻)
	Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)
Titulación potenciométrico	Dureza total (como CaCO ₃)

Los resultados obtenidos fueron interpretados y comparados con los valores permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000), y en la "Guidelines for Drinking-water Quality" (OMS, 2011).

Los resultados de los iones mayoritarios fueron normalizados para graficarlos en una modificación del diagrama de Stiff (Stiff, 1951), esto permitió visualizar mejor la geoquímica del agua e inferir el transporte y procesos que dieron como resultado ésta.

Posterior al muestreo del día 10 de marzo del 2014, las muestras de agua se llevaron a analizar al laboratorio certificado Laqmisa. De acuerdo a los procedimientos indicado en las siguientes normas (Tabla 6), el análisis de clordano, plaguicidas y herbicidas se realizó con un equipo Clarus 500.

Tabla 6 Parámetros analizados por el laboratorio Laqmisa y las normas que marcaron los procedimientos para su análisis

Método	Parámetro
NMX-AA-045-SCFI-2001	Color
NMX-AA-008-SCFI-2001	pH

NMX-AA-038-SCFI-2001	Turbiedad
	Aluminio
	Arsénico
	Bario
	Cadmio
	Cobre
NMX-AA-051-SCFI-2001	Cromo
	Hierro
	Manganeso
	Mercurio
	Plomo
	Sodio
	Zinc
NMX-AA-058-SCFI-2001	Cianuros (como CN ⁻)
NMX-AA-108-SCFI-2001	Cloro residual libre
NMX-AA-073-SCFI-2001	Cloruros (como Cl ⁻)
NMX-AA-034-SCFI-2001	Sólidos totales disueltos
NMX-AA-074-1981	Sulfatos (SO ₄ ²⁻)
NMX-AA-039-SCFI-2001	S.A.A.M.
NMX-AA-072-SCFI-2001	Dureza total (como CaCO ₃)
NMX-AA-050-SCFI-2001	Fenoles
NMX-AA-077-SCFI-2001	Floruros
NMX-AA-099-SCFI-2006	Nitritos (NO ₂ ⁻ /N)
NMX-AA-082-1986	Nitratos (NO ₃ ⁻ /N)
NMX-AA-026-SCFI-2010	Nitrógeno amoniacal (como N)
NMX-AA-042-1987	Coliformes fecales
	Coliformes totales
	Aldrín
	Dieldrin
	Clordano (total de isómeros)
	D.D.T (total de isómeros)
EPA-8081 A-1996 NMX-AA071-1982	GAMMA-HCH (Lindano)
	Hexaclorobenceno
	Heptacloro
	Epóxido de Heptacloro
	Metoxicloro
EPA-8157-A-1998	2,4-D
	Benceno
	Tolueno
	Etilbenceno
EPA-8260-B1996	Xileno (tres isómeros)
	Trihalometanos totales
Pruebas organolépticas	Olor
	Sabor
SM-4500-1A	Yodo residual

Los resultados de ese muestreo fueron comparados de igual manera con los valores permisibles establecidos en la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000), y en la "Guidelines for Drinking-water Quality" (OMS, 2011).

Con base en esas comparaciones y el diagrama de Stiff, que se realizó con los resultados del primer muestreo, se hizo un análisis de la hidrogeoquímica del lugar con el objetivo de evaluar la calidad del agua, siendo esto indispensable, sabiendo que en la zona se descarga agua residual sin tratamiento, y que el objetivo principal del pozo es abastecimiento de agua potable para uso doméstico.

Capítulo 4. Resultados y Discusión

A continuación se muestran los resultados, producto del procesamiento y análisis de la información previamente obtenida.

4.1 Perforación exploratoria

El pozo en las coordenadas antes mencionadas fue construido con el siguiente diseño (Fig. 8).

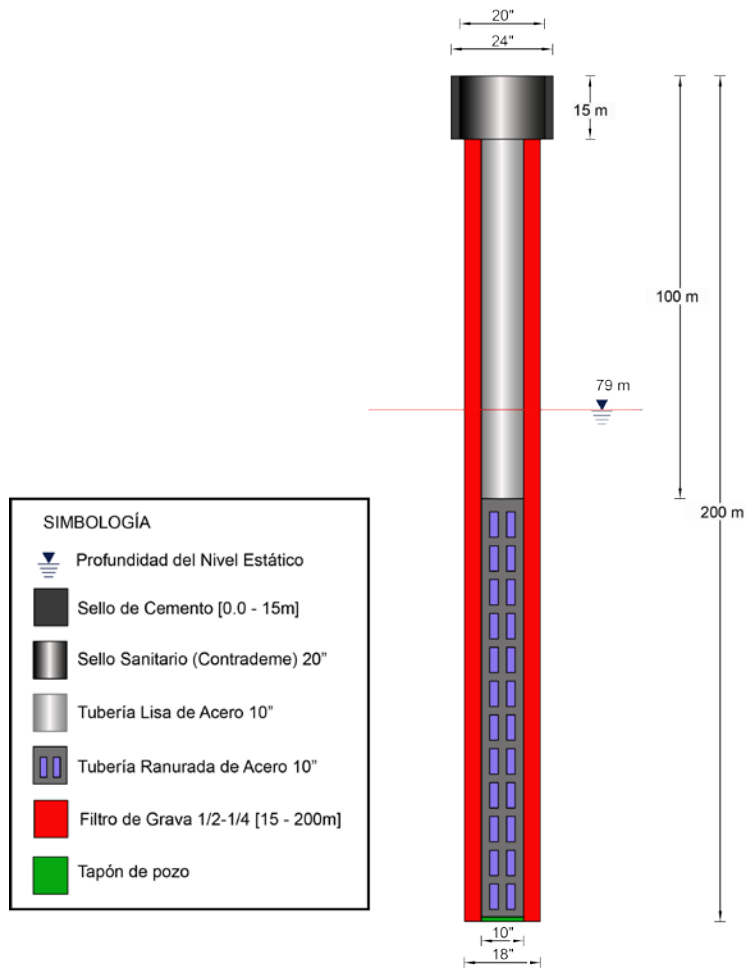


Figura 8 Diseño constructivo del Pozo San Agustín Tlalixticapa

4.2 Hidroestratigrafía del subsuelo

Dentro de las muestras recuperadas, se distinguen tres grupos principales, todos asociados a eventos volcánicos de la región.

En el primer grupo predomina el color claro, de acuerdo a la mineralogía presente se infiere que pertenecen a una roca de composición intermedia, la textura que presenta es afanítica, no se distinguen cristales a simple vista.

El segundo grupo tiene como característica principal un color más oscuro y la presencia de una gran cantidad de vesículas, así como minerales que indican una composición de

intermedia a máfica, de igual manera presenta una textura afanítica, en algunas zonas abunda material de color rojizo, producto de la oxidación de minerales ferro-magnesianos presentes en rocas de dicha composición.

Por último, un grupo conformado por materiales de depósito de caída, constituido por partículas de diferentes tamaños de grano, cenizas finas y lapilli con agregados y apariencia de un posible proceso de re trabajo.

La clasificación de las muestras arrojó los siguientes resultados:

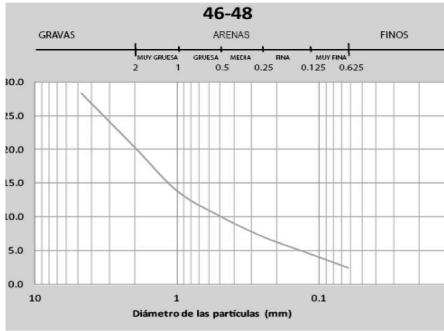
Table 7 Descripción y clasificación litológica

Intervalo (m)	Litología	Comportamiento hidrogeológico	Observaciones
0-0.5	Suelo	-	
0.5-4	Andesita	Impermeable	Roca intermedia afanítica
4-16	Basalto	Permeable	Muy vesicular, con diferente grado de alteración en el mismo intervalo
16-18	Depósito de Lapilli	Permeable	Re-trabajado, poco soldado, con estructuras vesiculares.
18-20	Basalto	Permeable	Muy vesicular
20-36	Andesita	Impermeable	Alto grado de alteración
36-46	Basalto	Permeable	Muy vesicular, algunas de estas vesículas rellenas con fragmentos líticos y cuarzo. Fragmentos de color rojo, asociado a poca consolidación y fuerte intemperismo, lo que provoca oxidación de los minerales ferro-magnesianos. Presencia de minerales félsicos.
46-60	Toba de ceniza y lapilli	Permeable	Poco soldada

Las gráficas elaboradas (Fig. 9), representan el diámetro de las partículas vs el porcentaje de la muestra que pasó o que es mayor que ese tamaño de partícula.

En la parte superior de las gráficas se agregó una escala de Wentworth en la cual sólo se subdividió a las arenas, pues se pretendió mostrar la variabilidad de tamaños en un mismo intervalo.

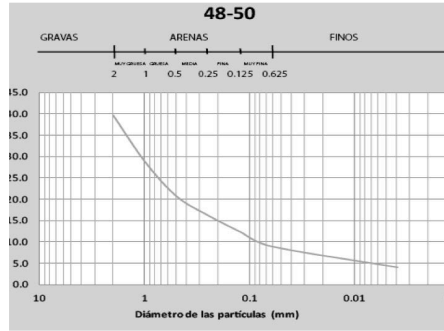
Posteriormente se describen los resultados y se da una clasificación para cada muestra tomada del intervalo.



46-48 m

80% gravas, 17.5% arenas y 2.5% finos

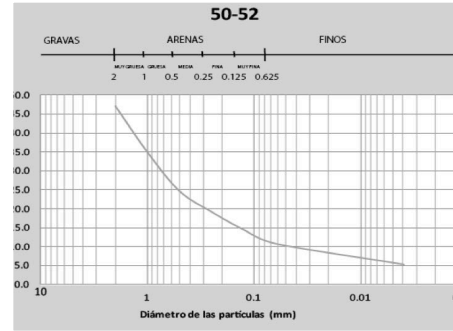
Grava arenosa GS



48-50 m

60% gravas, 31% arenas y 9% finos

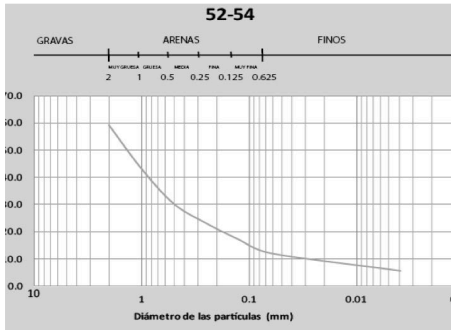
Grava arenosa GS



50-52 m

53% gravas, 36% arenas y 11% finos

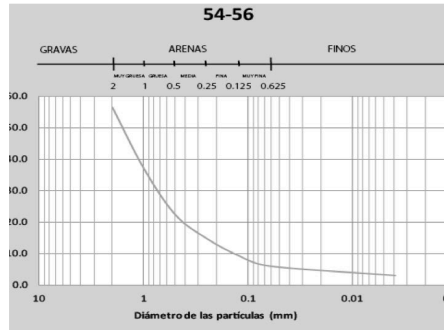
Grava arenosa GS



52-54 m

41% gravas, 47% arenas y 12% finos

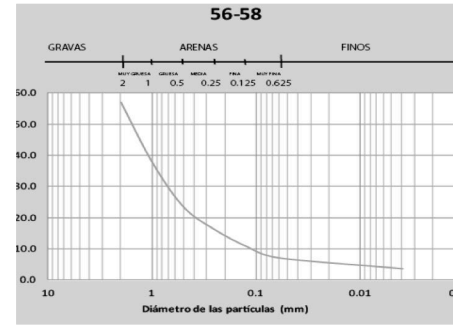
Arena gravosa SG



54-56 m

44% gravas, 50% arenas y 6% finos

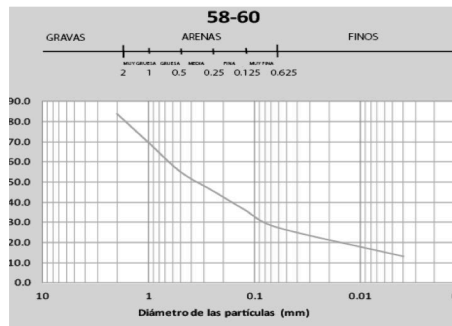
Arena gravosa GS



56-58 m

43% gravas, 49% arenas y 7% finos

Arena graosa SG



58-60 m

72% gravas, 16% arenas y 28% finos

Grava limosa GM

Figure 9 Curvas granulométricas

Haciendo una comparación entre las gráficas, a medida que aumenta la profundidad, la pendiente de las curvas va aumentando, sobre todo en el tamaño de arenas, esto representa un aumento en la graduación. Se observa que hay una gradación que tiende a ser inversa, esto es usual en flujos piroclásticos y tobas, en donde la velocidad del flujo decrece.

El resultado que arrojó el análisis de los recortes es muy acercado a lo real, sin embargo, ya que son muestras alteradas, puede variar la precisión incluso por decenas de metros, pues se contaminan con otros materiales al sacarlos.

4.3 Características petrofísicas de las hidrofacies.

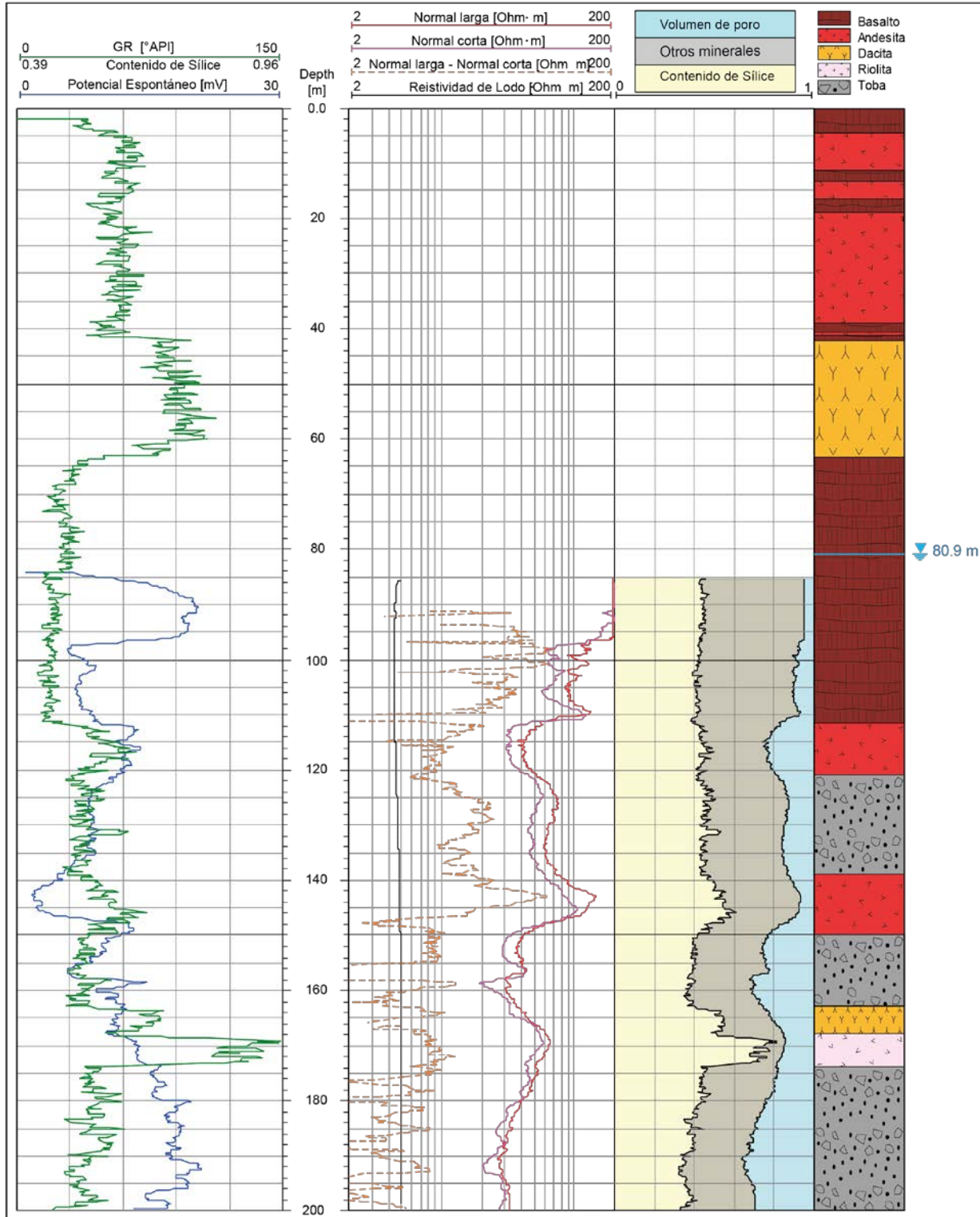


Figura 10 Registros geofísicos de pozo, curvas calculadas y columna litológica inferida

En la Fig. 10 se muestran los registros geofísicos de pozo en los primeros dos carriles, las curvas calculadas en el tercer carril y del lado derecho la columna litológica inferida.

Se observa que el rayos gamma de los 40 m a 60 m tiene un desplazamiento hacia la derecha llegando a los 90° API, a profundida disminuye considerablemente y se mantiene bajo los siguientes 100 m, se mantiene en aproximadamente 50° API, y a los 170 m aumenta bruscamente hasta llegar a 150° API. Esta curva esta directamente relacionada con el contenido de sílice en la formación.

Se observa que los valores de resistividad disminuyen conforme aumenta la profundidad, dicha tendencia también se encuentra presente en la curva de SP, teniendo los valores más positivos en la parte más profunda del pozo. Lo cual apoya la interpretación de la curva de SP como un indicador de porosidad en rocas que presentan ausencia de material arcilloso.

Para los registros geofísicos de pozo, en el caso específico del pozo de SAT , la curva de potencial espontáneo (SP) puede ser interpretada como un claro indicador de permeabilidad, ya que en casi la totalidad de la columna estratigráfica del área de estudio no encontramos presencia de arcillas. De esta forma la respuesta de la curva de SP está dada en función de su difusión y potenciales electrocinéticos, los cuales dependerán de la diferencia de salinidad entre el fluido de perforación y el agua de formación en rocas permeables. Para estos fines se tiene que considerar una salinidad constante a lo largo del intervalo perforado por el pozo.

Tomando en cuenta el perfil de invasión observado en el pozo con ayuda de las curvas de resistividad, la resistividad del agua de formación es mayor que la resistividad del fluido de perforación; para este caso, el potencial medido en el fluido de

formación es positivo. A mayor potencial positivo se le asocia una mayor permeabilidad por intervalo dentro del pozo.

La intersección de la curva de contenido de sílice que se calculó y la de resistividad normal, nos indica siete distintas facies/litologías presentes en la columna perforada por el pozo San Agustín:

Tabla 8 Facies litológicas y sus características

Litología	Contenido de Sílice	Resistividad (Ohm·m)
Basalto compacto	<52	>150
Basalto fracturado	<52	80 - 150
Andesita compacta	55 - 65	80 - 150
Toba	50 - 60	50 - 80
Toba fracturada	50 - 65	25 - 55
Dacita	62 - 70	40 - 60
Riolita	70 - 95	50 - 70

La interpretación de las curvas medidas en el Pozo San Agustín permiten definir cada intervalo con distintas propiedades, asignándole una litología inferida con base en éstas (Fig. 10), los cuales se describen a continuación a partir de la superficie:

Table 9 Propiedades petrofísicas y columna litológica inferida

Intervalo de profundidad (m)	Litología	Contenido de sílice (%)	Resistividad promedio (Ohm·m)	Porosidad total promedio (%)
0 - 4	Basalto	<55	-	-
4 - 42	Andesita con intercalaciones de Basalto	55 - 66	-	-
42 - 63	Dacita	Indicador de contenido de sílice no es válido ya que la presencia de minerales arcillosos cuentan con	-	-

		radiactividad natural y alteran los datos		
63 - 84	Basalto compacto	45 - 55	-	-
84 - 97	Basalto compacto	45 - 55	>200	<5
97 - 112	Basalto fracturado	44 - 55	100	7 - 17
112 - 121	Andesita fracturada	45 - 65	45	21
121 - 139	Toba	48 - 62	50	14
139 - 150	Andesita compacta	50 - 66	146	5
150 - 163 (156 m a 158 intervalo de baja permeabilidad)	Toba fracturada	50 - 66	30 - 43	27
163 - 168	Dacita	67	50	(Disminuyendo a) 20
168 - 174	Riolita	86 (llegó hasta 95)	80	15
174 - 200	Toba fracturada	55	40	30

Al comparar las resistividades obtenidas con los registros geofísicos de pozos y las que se conocían, obtenidas en la etapa anterior del proyecto con el método electromagnético, se observó una coincidencia en los contrastes de resistividad. A lo que se conocía como unidad hidrogeológica 1 (UH1), la cual abarcaba los primeros 80 m de la superficie, a lo que hoy es la base del pozo, se le atribuía una resistividad que va de 100 a 200 Ohm·m; en el registro este intervalo de profundidad, aprox. a 85 m, el valor de la resistividad supera los 200 Ohm·m, a 100 m de profundidad aprox., el valor de resistividad disminuye hasta 100 Ohm·m.

Donde ya se observa un cambio a UH3 y a UH2, las cual tienen un valor de resistividad de 40 Ohm·m a menos de 8 Ohm·m, y abarcan de 80 m a 200 m (Miguel Cortés y Rochín García, 2010;

Ruiz Aguilar, 2010), se observa una mayor diferencia con los valores que arrojan los registros, ya que a 120 m de profundidad el valor de 45 Ohm•m coincide con lo reportado Ruiz Aguilar (2010), sin embargo de 140 m a 150 m, hay un importante aumento y llega hasta 146 Ohm•m, a partir de esa profundidad comienza a disminuir, hasta el intervalo de 168 m - 174 m en donde se observa, nuevamente, un ligero aumento. De 174 m - 200 m disminuye de 20 a 30 Ohm•m.

4.3 Prueba de bombeo a caudal variable

A continuación se presentan los datos utilizados (Tabla 10)

Table 10 Datos utilizados y procesados de la prueba de bombeo a caudal variable

tiempo (min)	s(m)	Q(m ³ /d)
60.00	0.88	535
120.00	0.89	535
180.00	0.91	535
240.00	0.91	535
300.00	0.91	535
360.00	0.91	535
420.00	1.63	817
480.00	1.63	817
540.00	1.65	817
600.00	1.68	817
660.00	1.68	817
720.00	1.68	817
780.00	2.35	1131
840.00	2.37	1131
900.00	2.37	1131
960.00	2.34	1131
1020.00	2.32	1131
1080.00	2.34	1131
1140.00	2.89	1332
1200.00	2.87	1332
1260.00	2.95	1332
1320.00	2.96	1332
1380.00	2.98	1332
1440.00	2.98	1332
1500.00	3.43	1532
1560.00	3.45	1532
1620.00	3.43	1532
1680.00	3.43	1532
1740.00	3.44	1532
1800.00	3.44	1532
1860.00	3.75	1714
1920.00	3.76	1714
1980.00	3.76	1714
2040.00	3.76	1714
2100.00	3.76	1714
2160.00	3.76	1714
2220.00	4.19	1904
2280.00	4.21	1904
2340.00	4.21	1904
2400.00	4.21	1904
2460.00	4.22	1904
2520.00	4.23	1904

Para la interpretación por el método Rorabaugh se graficó el tiempo (T) contra el abatimiento (s), en la siguiente gráfica (Fig. 11) se observa cada escalón que representa un caudal de bombeo diferente y el aumento del abatimiento respecto al tiempo.

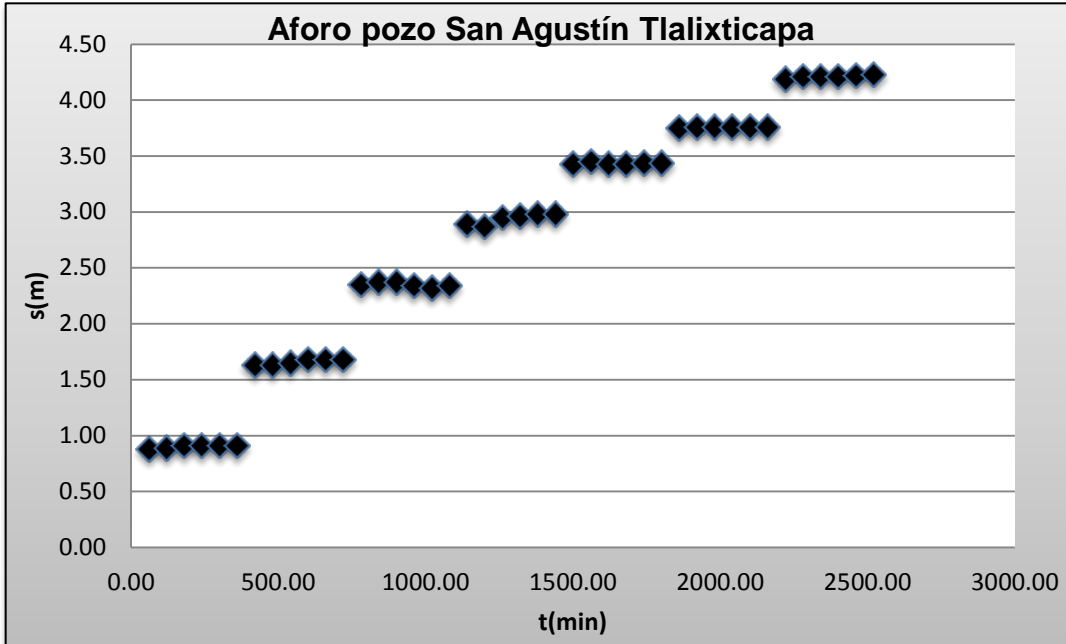


Figura 11 Gráfica tiempo (min) vs Abatimiento (m)

Se agruparon los descensos máximos para cada caudal al que se bombeó, y suponiendo que $n=2$, se graficaron los caudales (Q) vs su respectivo producto de s/Q (Fig.12), se obtuvo la línea de pendiente y la ecuación de dicha línea, conociendo así C y B .

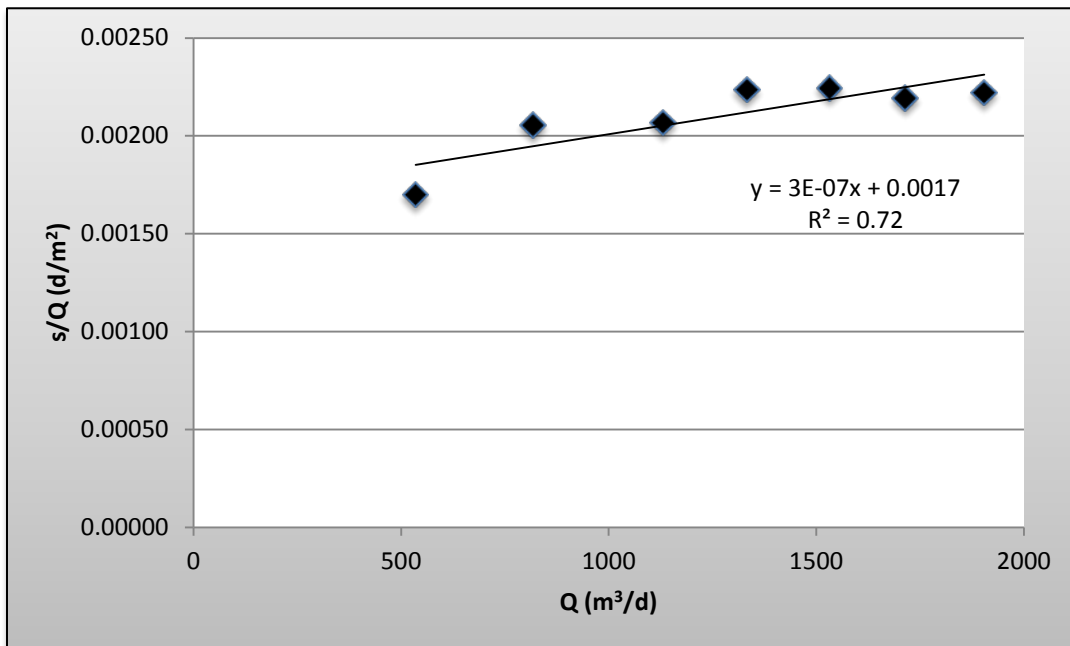


Figura 12 Gráfica Q (m^3/d) vs s/Q (d/m^2)

Table 11 Resultados de coeficientes de la ecuación característica

Valores obtenido con la gráfica		
n	2	
C	3.00E-07	d ² /m ⁵
B	0.0017	d/m ²

Al ser el coeficiente de Pearson (R^2) igual a 1 se infiere que n corresponde a 2, pero como no es el caso, los valores de C, B y n no son del todo precisos. Sin embargo con dichos datos la ecuación característica del pozo es la siguiente:

$$S_w = 0.0017Q + 3.00E^{-7}Q^2$$

Para determinar el caudal óptimo al que se debería bombear para que el pozo tenga su mejor funcionamiento, se graficó los descensos máximos por caudal (s) vs sus caudales respectivos (Q), observando que el caudal óptimo de extracción es aprox. 1300 m³/d (Fig.13).

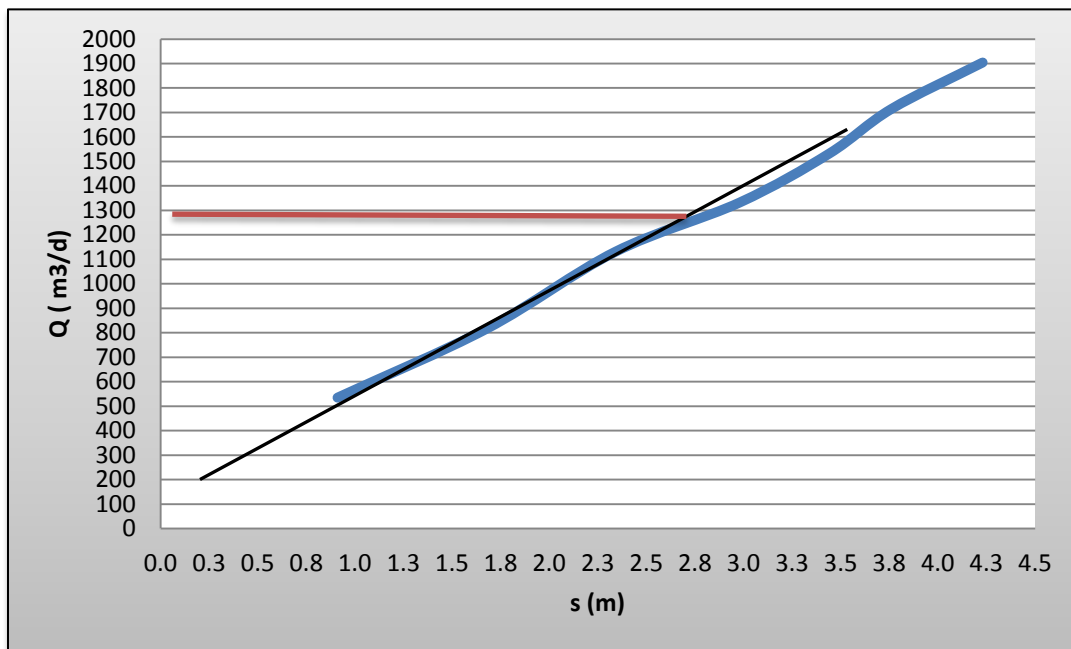


Figura 13 Gráfica Abatimientos (m) vs Caudales (m³/d)

Calculando descenso teórico, pérdidas de carga, el descenso real (S_w) y la eficiencia del pozo para el caudal promedio ($Q_{prom.}$) y el caudal óptimo (Q_o) se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 12).

Table 12 Resultados de interpretación de la prueba de bombeo a caudal variable con el método de Rorabaugh(Cooper, 1950; Rorabaugh, 1953)

	s (m)	Q (m ³ /d)	s/Q (d/m ²)	Descenso teórico (m)	Pérdida s (m)	S real (m)	Eficiencia (%)
Qprom	2.8	1280.81	0.00223	2.18	0.4921	2.670	76.4
Qo	2.9	1300.00	0.00223	2.21	0.5070	2.717	76.2

Se interpretó la prueba con ayuda del software AQTESOLV(Duffield, 2007), se ingresaron los datos y obtuvo una solución por el modelo Jacob-Rorabaugh(Cooper, 1950; Rorabaugh, 1953) y Eden-Hazel(Eden y Hazel, 1973) *Stept Test* y Thies. Así mismo se calcularon los coeficientes, y parámetros hidráulicos del acuífero

A continuación se muestra la solución obtenida con ayuda del software, el Anexo 1 corresponde al reporte generado por el software donde se indica los datos cargados, los datos obtenidos y los métodos o modelos por los cuales se obtuvieron.

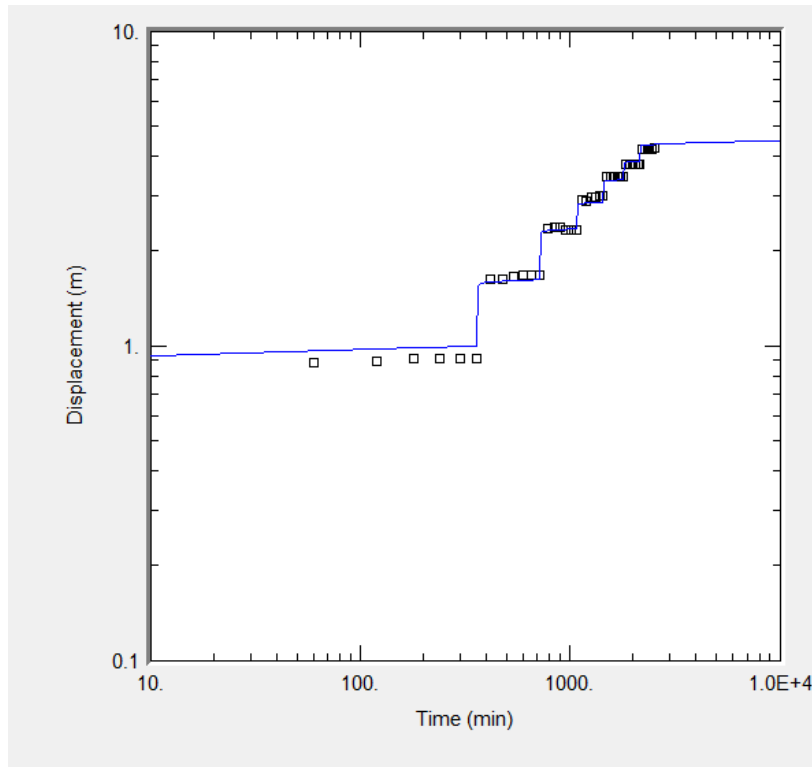


Figura 14 Gráfica Tiempo (min) vs Desplazamiento(Abatimiento) (m), ayuda del software AQTESOLV(Duffield, 2007) por los métodos Jacob-Rorabaugh(Cooper, 1950; Rorabaugh, 1953) y Eden-Hazel(Eden y Hazel, 1973) Stept Test y Thies para el pozo SAT

El software reporta los siguientes valores para los coeficientes n, C y B (Tabla 13).

Table 13 Resultados de coeficientes de la ecuación característica con los métodos Jacob-Rorabauh(Cooper, 1950; Rorabaugh, 1953) y Eden-Hazel(Eden y Hazel, 1973)

Valores obtenidos con AQTESOLV

n	1.5			
C	1	min ² /m ⁵	4.82E-07	d ² /m ⁵ 3600 s ² /m ⁵
B	1.75	min/m ²	0.001216	d/m ²

La ecuación característica del pozo utilizando estos resultados (Tabla 13) es la siguiente:

$$S_w = 0.0012Q + 4.84E^{-7}Q^2$$

Calculando descenso teórico, pérdidas de carga, el descenso real(S_w) y la eficiencia del pozo para el cauda promedio ($Q_{prom.}$) y el caudal óptimo (Q_o), con los

resultados anteriores (Tabla 13) se obtuvieron los siguientes resultados.

Table 14 Resultados de la interpretación de la prueba de bombeo a caudal variable por los métodos Jacob-Rorabaugh(Cooper, 1950; Rorabaugh, 1953) y Eden-Hazel(Eden y Hazel, 1973)

	s (m)	Q (m ³ /d)	s/Q (d/m ²)	Descenso teórico (m)	Pérdida s (m)	s real (m)	Eficiencia (%)
Q _{prom}	2.85	1280.81	0.00223	1.56	0.0221	1.580	54.6
Q _o	2.90	1300.00	0.00223	1.58	0.0226	1.603	54.5

El valor de eficiencia para un caudal de 1904 m³/d que reporta el software AQTESOLV(Duffield, 2007) es de 24.85%, el cual es mucho menor a los obtenidos con los coeficiente obtenidos con los métodos, sin embargo, esas magnitudes refieren un mal funcionamiento en el pozo. Según Walton (1962), el deterioro del pozo es medio.

La Transmisividad (T) obtenida por el método Thies, así como el coeficiente de almacenamiento específico (Ss) entran en el rango de los datos reportados por CONAGUA (2013).

Estos valores de T y Ss indican que el acuífero tiene un buen potencial para abastecer de suficiente agua a la comunidad de San Agustín Tlalixticapa.

4.5 Hidrogeoquímica

De los dos muestreos que se realizaron, los resultados de los análisis fueron reportados en la Tabla 15, también se agregaron resultados de análisis obtenidos de muestreos que se hicieron en la etapa previa del proyecto en pozos cercanos a la comunidad, se consideró adecuado para poder comparar la calidad del agua en este nuevo pozo con la de otros ya en funcionamiento. Los pozos están ordenados en orden descendente de la magnitud de la distancia de cada pozo a San Agustín.

Los documentos que fueron tomados como guía son; la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisible de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización" (SSA, 2000), esta norma es la encargada de regular la calidad del agua en México; y "Guidelines for Drinking-water Quality" (OMS, 2011), documento en el cual la Organización Mundial de la Salud determina lineamientos para la calidad del agua potable.

Ambos documentos establecen límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas, además de los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya.

Table 15 Resultados de análisis hidrogeoquímicos

Pozo	Unidad	La	Huapil	San	Puebl	Yonthé	SAT	SAT	NOM-127	Guidelin es for Drinking -water Quality OMS
		Nolap era PN01	la PHU1	José Decá PD1	o Nuevo PNV	Chico PYCI				
Clave de la muestra		HP-3	HP-2	HP-4	HP-6	HP-1	SAT-1	SAT-2		
Parámetro										
Temp ¹	°C	•	•	•	•	•	18.3	21.8	-	-
REDOX ¹	mV	•	•	•	•	•	129. 0	221.1	-	-
Oxígeno disuelto ¹		•	•	•	•	•	3.75	5.00	-	-
Resistivi- dad ¹	Ohm•cm	•	•	•	•	•	831	816	-	-
Conductiv i-dad eléctrica ¹	µS/cm	659	904	941	1199	1231	1203	1230	-	-
pH ¹	unidades de pH	7.63	8.09	7.84	7.55	•	7.73	7.78	6.5- 8.5	6.5-8.6
pH	unidades de pH	8.27	8.56	8.65	8.38	8.6	•	•	6.5- 8.5	6.5-8.6
Color	Pt-Co	•	•	•	•	•	•	10	20	15
Turbiedad	NTU	•	•	•	•	•	•	28.4	5	5
Aluminio	mg/L	•	•	•	•	•	<LD	2.03	0.20	0.1-0.2

Arsénico	mg/L	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.05	0.01
Bario	mg/L	•	•	•	•	•	0.2	<LD	0.7	0.7
Cadmio	mg/L	•	•	•	•	•	<LD	<LD	0.005	0.003
Cianuros (como CN ⁻)	mg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	0.07	0.07
Cloro residual libre	mg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	0.2- 1.5	0.2-1.5
Cloruros (como Cl ⁻)	mg/L	50.0	79.50	75.9	94.0	99.40	55.0	92.46	250	250
Sólidos disueltos totales	mg/L	0	586	0	688	734	3	910	1000	1000
Sólidos disueltos totales ¹	mg/L	467	•	606	•	•	602	614	1000	1000
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	29.2	44.77	59.7	54.4	62.99	82.2	75.86	400	500
S.A.A.M	mg/L	8	•	0	9	•	4	•	•	•
Cobre	mg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	0.5	0.5
Cromo	mg/L	•	•	•	•	•	<LD	<LD	2	2
Hierro	mg/L	•	•	•	•	•	0.00	<LD	3	3
Manganeso	mg/L	•	•	•	•	•	<LD	<LD	0.05	0.05 *
Mercurio	mg/L	0.04	0.26	0.03	<LD	0.08	<LD	1.05	0.30	0.30
Plomo	mg/L	0.00	0.002	0.00	<LD	0.003	0.01	<LD	0.15	0.4
Sodio	mg/L	2	•	4	•	•	9	•	•	•
Zinc	mg/L	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	•	<LD	0.001	0.006
Dureza total como CaCO ₃)	mg/L	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.025	0.01*
Fenoles	mg/L	•	•	•	•	•	136	282	200	200
Fluoruros	mg/L	•	•	•	•	•	<LD	<LD	5	3
Nitritos (NO ₂ ⁻ /N)	mg/L	204	355	214	341	258	280	318	500	500
Nitratos (NO ₃ ⁻ /N)	mg/L	•	•	•	•	•	•	<0.009	0.001	0.001
Nitrógeno Amoniacal (como N)	mg/L	•	•	•	•	•	•	0.03	0.84	1.50
Coliformes fecales	NMP/100 mL	•	•	•	•	•	•	<LD	<LD	0.5
Coliformes totales	NMP/100 mL	2.2	6.1	7.4	3.9	8.0	10.6	10.1	10	11
Aladrin	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	0.5	0.5
Dieldrin	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	460	ND
Clordano (total de isómeros)	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	2	-
D.D.T. (total de isómeros)	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	460	2
GAMMA-HCH (Lindano)	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	0.03	0.03
	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	0.03	0.03
	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	0.03	0.2
	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	1	1
	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	2	2

Hexacloro -benceno	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	0.01	1
Heptacloro	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	0.03	0.03
Epóxido de Heptacloro	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	0.03	0.03
Metoxicloro	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	20	20
2, 4-D	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	50	30
Benceno	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	10	10
Tolueno	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	700	700
Etilbenceno	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	300	300
Xileno (tres isómero)	µg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	500	500
Trihalometanos totales	mg/L	•	•	•	•	•	•	<LD	0.2	0.2
Olor		•	•	•	•	•	•	A	A	-
Sabor		•	•	•	•	•	•	A	A	-

¹ Datos medidos en campo; •Parámetro no analizado para esa muestra; LD límite detectado; ND no detectable; * Valor provisional; A Agradable; color azul valores que superan los máximos permisibles para la NOM-127; color rojo valores que superan los máximos permisibles para la NOM-127 y para la OMS.

Para los pozos muestreados con anterioridad no se lograron analizar todos los parámetros de la norma, sin embargo, los valores de los parámetros que sí se tienen, son similares a los del pozo de San Agustín. Únicamente el pH obtenido en laboratorio, de los pozos cercanos, rebasa ligeramente el límite máximo permisible de la norma, pero los valores del agua de San Agustín está por debajo de éste.

Los parámetros cuyas concentraciones superan los límites máximos permisibles en el caso del Pozo de San Agustín son el sodio, nitratos, coliformes fecales y totales así como hierro y aluminio.

El sodio en altas concentraciones generalmente se origina de forma natural, se debe al intercambio iónico durante la infiltración y transporte en el subsuelo; sin embargo en este caso, altas concentraciones de nitratos además de coliformes fecales y totales, nos indican que el agua no ha tenido

suficiente transporte, por ello, el origen de los anteriores, se le atribuye a procesos antropogénicos, específicamente, al uso de aguas residuales no tratadas para irrigación. Jimenez y Chavez, 2005, 2004; Jimenez *et al.*, 2000; Lesser-Carrillo *et al.*, 2011; Chávez *et al.*, 2011, han reportado en sus estudios acerca del tema en la zona, valores muy por arriba de la Norma Oficial Mexicana de nitratos y coliformes, fecales y totales. El pozo de SAT está ubicado antes que los demás pozo en el sentido del flujo de agua (Fig. 16), y se puede apreciar en la tabla como la concentración de coliformes totales y fecales disminuye, con forme se alejan de éste.

El hierro y el aluminio también se encuentran en altas concentraciones, en un principio las condiciones de pH en la muestra propiciarían que estos metales se encontraran en disolución con el agua, así que, también estos provienen del agua infiltrada con la que se riega el área de estudio, proveniente de la Ciudad de México. Se han realizado numerosos estudios acerca de la absorción de metales por el subsuelo provenientes de esta agua residuales en el Valle del Mezquital (Broszat *et al.*, 2014; Cajuste *et al.* 1991; Flores *et al.*, 1997; Huerta *et al.*, 2002; Lucho-Constantino *et al.*, 2005; Reyes-Solís *et al.*, 2009)

Para clasificar el agua del pozo se realizó un diagrama de Stiff, con base en los resultados normalizados de iones mayoritarios, que se muestran en la siguiente tabla (Tabla 16).

Table 16 Iones mayoritarios

Ion	Na ¹⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻¹	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻¹
meq/L	5.93	3.28	3.05	1.55	1.71	8.10

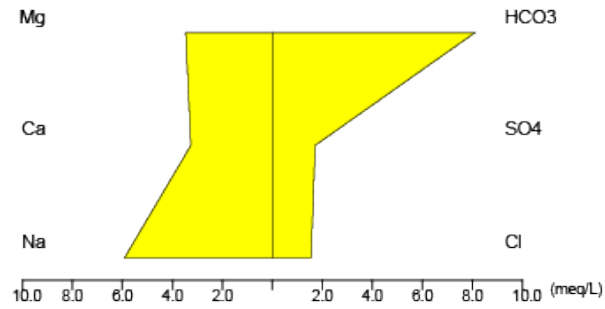


Figure 15 Diagrama de Stiff

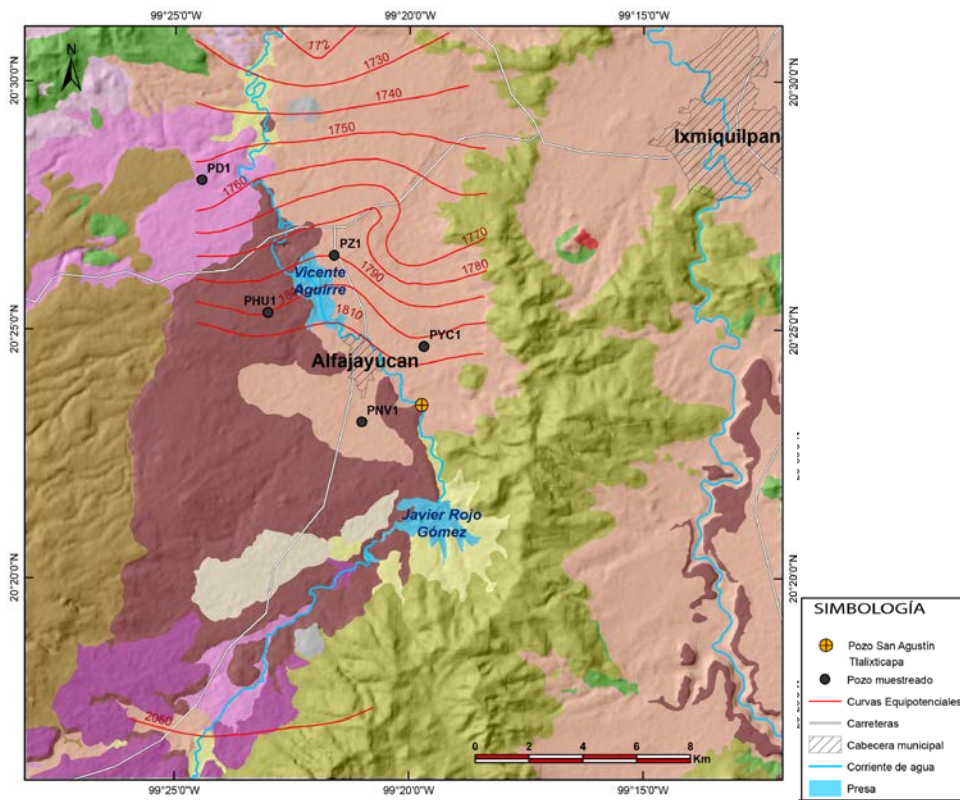


Figure 15 Mapa geológico, pozos y flujo subterráneo.

Capítulo 5. Conclusiones

Tras integrar el análisis de los registros geofísicos de pozo y el de los recortes de pozo, se obtuvo la siguiente columna hidroestratigráfica local.

Table 17 Columna estratigráfica

Intervalo de profundidad (m)	Litología
0 - 4	Suelo y basalto
4 - 42	Andesita con intercalaciones de basalto
42 - 63	Toba de ceniza
63 - 97	Basalto compacto
97 - 112	Basalto fracturado
112 - 121	Andesita
121 - 139	Toba
139 - 150	Andesita compacta
150 - 163	Toba fracturada
163 - 168	Dacita
168 - 174	Riolita
174 - 200	Toba fracturada

De acuerdo con la Tabla 17 y en cuanto a la hidroestratigrafía del subsuelo, las zonas acuíferas con mayor potencial para ser explotadas son en orden descendente, las siguientes:

1. Basalto fracturado, abarca aproximadamente de los 97 m a los 112 m de profundidad, cuya resistividad es de 100 Ohm·m y la porosidad total de 7% - 17 %, por el alto fracturamiento que presenta se le considera la zona más permeable.
2. Toba fracturada, en los intervalos de 150 m - 163 m y 174 m - 200 m, cuyo valor de resistividad es 30 - 40 Ohm·m y porosidad aproximada de 27%. Este intervalo tiene una pequeña zona de baja permeabilidad
3. Toba, en el intervalo de 121 m - 139 m, cuya resistividad es de entre 40 y 50 Ohm·m, y una porosidad de 14%.

En la zona con mayor potencial la permeabilidad se debe a la porosidad secundaria, provocada por fracturamiento de las unidades.

Por otro lado las zonas con menor permeabilidad se encuentran en los siguientes intervalos:

1. Basalto compacto, de 63 m a 97 m, le corresponde un valor de resistividad superior a 200 Ohm·m
2. Andesita compacta, con un valor de resistividad de 146 Ohm·m y se encuentra en el intervalo de 139 m - 150 m

Al evaluar la hidráulica del acuífero y del pozo, con los modelo Jacob-Rorabaugh(Cooper, 1950; Rorabaugh, 1953) y Eden-Hazel (Eden y Hazel, 1973) y suponiendo el coeficiente $n=2$, da como resultado una eficiencia del pozo va de 55% a 76% a , además tomando en cuenta el criterio de Walton (1962), el pozo tendría que ser rediseñado para un mejor funcionamiento. El valor de Transmisividad del acuífero es $2225.3 \text{ m}^2/\text{d}$, mientras que el coeficiente de almacenamiento específico es 0.05045, estos valores indican un buen potencial acuífero, suficiente para abastecer a la comunidad de SAT.

En cuanto a la hidrogeoquímica, el agua extraída del pozo SAT se clasificó, de acuerdo a la concentración de iones mayoritarios, como Bicarbonatada sódica, esto coincide con el tipo de agua que se ha encontrado en la zona (Lesser-Carrillo *et al.*, 2011).

Al comparar los resultados con los límites permisibles de calidad, descritos en la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000), se determinó, que el agua no es apta para uso y consumo humano, a menos de que se lleve a cabo un proceso de potabilización previo a su consumo.

Para disminuir las concentraciones de Nitratos y Sodio es recomendable realizar, intercambio iónico o coagulación-floculación-sedimentación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos. Adicionalmente se puede tratar la turbiedad con adsorción en carbón activado u oxidación.

Para coliformes totales y fecales la (SSA, 2000) en la NOM-127-SSA1-1994 recomienda desinfección con cloro, compuestos de cloro, ozono o luz ultravioleta. Para los metales aluminio y hierro, recomienda subir el pH 0.5 unidades.

A pesar de que en los resultados sólo superaron los límites máximos permisibles los compuestos ya mencionados, se recomienda realizar estudios más completos que contemplen además de todos los compuestos que especifica la Norma Oficial Mexicana, fármacos y otros compuestos orgánicos, así mismo realizar estudios bacteriológicos, ya que en publicaciones recientes se han encontrado altas concentraciones de éstos en las aguas que se descargan en la zona (Chávez *et al.*, 2011; Downs *et al.*, 1999; Gibson *et al.*, 2010).

Se considera que el pozo de SAT requiere un ajuste en su diseño y deben realizarse tratamientos de potabilización previo al consumo humano, además de efectuar constantes monitoreos para que pueda ser considerado como una nueva fuente de agua potable.

Capítulo 6. Referencias Bibliográficas

Aguirre-Díaz, G. J., López-Martínez, M. (2009). Geologic evolution of the Donguinyó-Huichapan caldera complex, central Mexican Volcanic Belt, Mexico. *Journal of Volcanology and*

- Geothermal Research, 179(1-2), 133-148.
- Archie, G. E. (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Petroleum Technology*, (October), 54-62.
- Asquith, G., Gibson, C. (2014). Basic Well Log Analysis for Geologist. The American Association of Petroleum Geologist, 216p
- Bassiouni, Z. (1994). Theory, Measurement, and Interpretatio of Well Logs. (S. of P. Engineers, Ed.) (Primera). Richardson, Texas, 372p.
- Binley, A., Cassiani, G., Deiana, R. (2010). Hydrogeophysics : opportunities and challenges. *Bollettino di Geofisca Teorica ed Applicata*, 51(December), 267-284.
- Broszat, M., Nacke, H., Blasi, R., Siebe, C., Huebner, J., Daniel, R., Grohmann, E. (2014). Wastewater irrigation increases the abundance of potentially harmful Gammaproteobacteria in soils in Mezquital Valley, Mexico. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(17), 5282-91.
- Cajuste, L. J., Carrillo, R. G., Cota, E. G., Laird, R. J. (1991). The distribution of metals from wastewater in the Mexican Valley of Mezquital. *Water, Air, & Soil Pollution*, 57-58(1), 763-771.
- Carrera-Hernández, J. J., Gaskin, S. J. (2009). Water management in the Basin of Mexico: Current state and alternative scenarios. *Hydrogeology Journal*, 17(6), 1483-1494.
- Cassiani, G., Binley, A. M., Ferré, T. P. . (2006). Unsaturated zone processes. *Applied Hydrogeophysics*, 51, 75-116.
- Chávez, A., Maya, C., Gibson, R., Jiménez, B. (2011). The

- removal of microorganisms and organic micropollutants from wastewater during infiltration to aquifers after irrigation of farmland in the Tula Valley, Mexico. *Environmental Pollution*, 159(5), 1354-1362.
- Chowdhury, A., Jha, M. K., Machiwal, D. (2003). Application of remote sensing and GIS in groundwater studies: an overview. *Proceedings of the International Conference on Water & Environment. Ground Water Pollution*, 39-50.
- Clark, L. (2016). The analysis and planning of step drawdown test. *Engng Geol.*, 10(1973), 125-143.
- Comisión Nacional del Agua. (2009). Estadística del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII, *Aguas del Valle de México*.
- Comisión Nacional del Agua. (2013). Actualización de la disponibilidad de agua en el acuífero Chapantongo-Alfajayucan(1309), *Estado de Hidalgo*.
- Comisión Nacional del Agua. (2014). Estadísticas del Agua en México.
- Cooper, J. (1950). Flow Groundwater. *Engineering hydraulics*, 5.
- Custodio, E., Llamas, M. R. (2001). Hidrogeología Subterránea (Segunda). Barcelona, pp. 825-845
- Day-Lewis, F. D., Singha, K., Binley, A. M. (2005). Applying petrophysical models to radar travel time and electrical resistivity tomograms: Resolution-dependent limitations. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 110(8), 1-17.
- Downs, T. J., Cifuentes-García, E., Suffet, I. M. (1999). Risk screening for exposure to groundwater pollution in a wastewater irrigation district of the Mexico City region. *Environmental health perspectives*, 107(7), 553-561.

- Duffield, G. M. (2007). AQTSOLV.
- Eden, R. N., Hazel, C. . (1973). Computer and graphical analysis of variable discharge pumping test of wells. Civil Engineering, 5-10.
- Engman, E. T., Gurney, R. J. (1991). Remote Sensing in Hydrology. London: Chapman and Hall, 125p
- Facultad de Ingeniería UNAM, 2010. Factibilidad de extracción de agua subterránea y prospección hidrogeológica en la comunidad San Agustín Tlalixticapa, Estado de Hidalgo. Reporte técnico. Grupo de Hidrogeología, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México
- Flores, L., Blas, G., Andez, G. H. (1997). Distribution and Sequential Extraction of some heavy metals from soils irrigated with wastewater from Mexico City. Water, Air, & Soil Pollution, (98), 105-117.
- Gibson, R., Durán-Álvarez, J. C., Estrada, K. L., Chávez, A., Jiménez Cisneros, B. (2010). Accumulation and leaching potential of some pharmaceuticals and potential endocrine disruptors in soils irrigated with wastewater in the Tula Valley, Mexico. Chemosphere, 81(11), 1437-1445.
- Giustiniani, M., Accaino, F., Picotti, S., Tinivella, U. (2008). Characterization of the shallow aquifers by high-resolution seismic data. Geophysical Prospecting, 56, 655-666.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M., Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la faja Volcánica Transmexicana. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LVII(3), 227-283.
- Huerta, L., Contreras-Valadez, R., Palacios-Mayorga, S., Miranda, J., Calva-Vasquez, G. (2002). Total elemental composition of soils contaminated with wastewater irrigation

- by combining IBA techniques. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 189(1-4), 158-162.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Censo de población y vivienda 2010/Estadística.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2011). Anuario estadístico del estado de Hidalgo. Aguascalientes, Aguascalientes.
- Jha, M. K., Chowdhury, A., Chowdary, V. M., Peiffer, S. (2007). Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: Prospects and constraints. Water Resources Management, 21, 427-467.
- Jimenez, B., Chávez, A. (2004). Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: "El Mezquital Valley" case. Water Science and Technology, 50(2), 269-276.
- Jimenez, B., Chavez, A. (2005). Water Quality in an aquifer recharged with wastewater and its implications. Latino-Americana de Hidrogeología, 4, 111-116.
- Jimenez, B., Chavez, A., Barrios, J. E., Perez, R. (2000). Impact and potential of reused water in the Mezquital Valley. Water 21, (JUNE), 34-36.
- Kobr, M., Mare, S., Paillet, F. (2005). Geophysical well logging. Borehole geophysics for hydrogeological studies: principles and applications, New York, pp. 291-331.
- Lesser-Carrillo, L. E., Lesser-Illades, J. M., Arellano-Islas, S., González-Posadas, D. (2011). Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del valle del Mezquital, México Central. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas,

28(3), 323-336.

- Lucho-Constantino, C. a., Prieto-García, F., Del Razo, L. M., Rodríguez-Vázquez, R., Poggi-Varaldo, H. M. (2005). Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 108(1), 57-71.
- McNeill, J. D. (1990). Use of electromagnetic methods for groundwater studies. *Geotechnical and Environmental Geophysics*, 1(5), 191-218.
- McNeill, J. D. (1994). Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding. *Geonics technical note*, 27, 1-15
- Miguel Cortés, F., Rochín García, H., 2010. Prospección hidrogeológica y factibilidad de extracción de agua subterránea en el poblado San Agustín Tlaxiaticapa, Hidalgo. Tesis de Licenciatura. División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México. 111p.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (1966). *Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes*.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality*. 4a edición.
- Ortega Gutiérrez, F., Mitre Salazar, L. M., Roldán Quintana, J., Aranda Gómez, J. J., Morán Zenteno, D. J., Alanís Álvarez, S. A., Nieto Samaniego, A. F. (1992). *Carta Geológica de la República Mexicana, Quinta Edición, escala 1:2000000*. México D.F.: UNAM.
- Ran, Q., Wang, Y., Sun, Y., Yan, L., Tong, M. (2014). Volcanic

Gas Reservoir Characterization. Elsevier.

Reyes-Solís, I. E., Solís, C., Isaac-Olive, K., García, N. E., & Andrade, E. (2009). Fractionation analysis of trace metals in humic substances of soils irrigated with wastewater in Central Mexico by particle induced X-ray emission. *Microchemical Journal*, 91(1), 129-132.

Rhind, D. (1989). Why GIS? *ARC News*, 11(3).

Rider, M. (1996). The Geological interpretation of Well logs (Segunda). 280 p.

Rorabaugh, M. J. (1953). Graphical and theoretical analysis of step-drawdown test of artesian wells,. *Proc. of the American Society Civil Eng.*, 79, 23.

Ruiz Aguilar, D., 2010. Estudio geofísico para la evaluación hidrogeológica de una zona del acuífero Alfajayucan-Chapantongo, Tesis de Licenciatura, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, 65 p.

Secretaria de Salubridad y Asistencia (SSA). (2000). Modificación a la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario de la Federación*, 22(noviembre).

Stefansson, V., Gudlaugsson, S. T., Gudmundsson, A. (2000). Silica content and Gamma Ray logs in volcanic rocks. *World Geothermal Congress* (pp. 2893-2897).

Stiff, H.A., J. (1951). The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal of Petroleum Technology*, 3(10), 15-16.

- Vargas, A., Arellano, F. (2002). Comparación de tres métodos para el cálculo de eficiencia de pozos. *Revista Geológica de América Central*, 27, 97-110.
- Walton, W. (1962). Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. *Illinois State Water Survey Bulletin*, 49, 81.
- Wastewater irrigation increases the abundance of potentially harmful Gammaproteobacteria in soils in Mezquital Valley, Mexico. (2014). *Applied and Environmental Microbiology*, 80(17), 5282-5291.
- Wentworth, C. K. (1922). A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments, *The Journal of Geology* 30(5), 377-392.
- Zamudio, S., Rzedowski, J. E., Carranza, G., Calderón, G. (1992). La vegetación en el estado de Querétaro. Reporte técnico

Anexo 1

Data Set: C:\Users\Alejandrok2\Desktop\SanAgustinPozo\sanagustin.aqt
Date: 12/01/15
Time: 13:38:17

PROJECT INFORMATION

Location: San Agustin
Test Date: 2015
Test Well: San Agustin

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 120. m
Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.

PUMPING WELL DATA

No. of pumping wells: 1

Pumping Well No. 1: San Agustin

X Location: 465687. m
Y Location: 2254842. m

Casing Radius: 0.125 m
Well Radius: 0.125 m

Partially Penetrating Well
Depth to Top of Screen: 20. m
Depth to Bottom of Screen: 120. m

No. of pumping periods: 7

<u>Pumping Period Data</u>					
<u>Time (min)</u>	<u>Rate (m³/day)</u>	<u>Time (min)</u>	<u>Rate (m³/day)</u>	<u>Time (min)</u>	<u>Rate (m³/day)</u>
0.	534.8	1080.	1332.3	2160.	1904.3
360.	817.3	1440.	1531.9		
720.	1131.	1800.	1714.2		

OBSERVATION WELL DATA

No. of observation wells: 1

Observation Well No. 1: San Agustin

X Location: 465687. m
Y Location: 2254842. m

Radial distance from San Agustin: 0. m

Partially Penetrating Well
Depth to Top of Screen: 20. m
Depth to Bottom of Screen: 120. m

SOLUTION

Pumping Test
Aquifer Model: Confined
Solution Method: Theis (Step Test)

VISUAL ESTIMATION RESULTS

Estimated Parameters

<u>Parameter</u>	<u>Estimate</u>	
T	2225.3	m ² /day
S	0.05045	
Sw	10.	
C	1.	min ² /m ⁵
P	1.5	

$K = T/b = 18.54$ m/day (0.02146 cm/sec)
 $S_s = S/b = 0.0004204$ 1/m

STEP TEST ANALYSIS RESULTS

Jacob-Rorabaugh Step Test Model: $s(t) = BQ + CQ^P$
 $t = 1$.min
Q in cu.m/min
B = 1.751
C = 1.
P = 1.5

Eden-Hazel Step Test Model: $s(t) = (a + b \log_{10}(t))Q + CQ^P$
Q in cu.m/min
a = 0.4322
b = 0.1186
C = 1.
P = 1.5

Well Efficiency: 24.85% (Q from last step)