



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

MODELO HIDROGEOLÓGICO LOCAL DEL POZO SANTA CATARINA 3A

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**PRESENTA:
ZAIDA MARTÍNEZ CASAS**

**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Eric Morales Casique
Instituto de Geología**

**COMITÉ TUTOR:
Dr. Eric Morales Casique
Instituto de Geología
Dr. Oscar Arnoldo Escolero Fuentes
Instituto de Geología
Dr. Martín Cárdenas Soto
Facultad de Ingeniería**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., marzo 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado examinador:

Dr. Francisco Martín Romero

Instituto de Geología

Dr. Oscar Arnoldo Escolero Fuentes

Instituto de Geología

Dr. Eric Morales Casique

Instituto de Geología

Dr. Juan Pérez Quezadas

Instituto de Geología

Dr. Guillermo Pérez Cruz

Facultad de Ingeniería

Este proyecto fue realizado gracias al convenio entre el Instituto de Geología de la UNAM y el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), contrato número 0446-10-ED-DT-1-17-1928, con número de registro UNAM 49664-2480-26-IX-17.

A mi familia

Agradezco

A **Dios** por permitirme llegar hasta aquí y nunca abandonarme.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría en el programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra en la Universidad Nacional Autónoma de México.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)**, por brindarme una educación de calidad y al **Posgrado en Ciencias de la Tierra** por el apoyo para mi formación profesional.

Al **Laboratorio de Cromatografía de Líquidos** y al **Laboratorio de Espectroscopias atómicas** del Instituto de Geología de la UNAM, en especial a la Dra. Olivia Zamora Martínez y al M. en C. Javier Tadeo León, por orientarme y su excelente disposición para la colaboración en la realización de los análisis para este trabajo.

Al **Dr. Eric Morales Casique**, por todas sus enseñanzas, su profesionalismo, paciencia y buena disposición para atender mis dudas. Por apoyarme desde el primer momento, estar al pendiente del trabajo en campo, por confiar en mí y ser tan buena persona conmigo.

Al **Mtro. José Luis Lezama Campos** por el apoyo y comprensión brindada durante la maestría en todos los aspectos, académico, profesional y personal.

Al **Dr. Oscar Escolero** por sus consejos, observaciones, su gran calidad como investigador y ser humano, por inspirarme y hacer que mi amor por el agua subterránea sea más grande.

Al **Dr. Martín Cárdenas Soto** por su apoyo al iniciar el posgrado, y por sus comentarios y observaciones durante el desarrollo de este trabajo.

Al **Dr. Francisco Martín Romero** por su asesoría y aclárame todas las dudas que me surgieron durante la realización de este trabajo.

Al **Dr. Guillermo Pérez Cruz** y al **Dr. Juan Pérez Quezadas** por sus valiosas observaciones y ayuda para mejorar este trabajo.

A María Luisa Reyes y Araceli Chamán por su excelente trabajo haberme ayudado en todos los tramites que se requirieron desde que entré al posgrado.

A Isaac Bautista y Daniel Cruz por su gran gran gran apoyo para el trabajo de campo, por siempre tener toda la actitud y disposición para hacer esto. Equipo SAWT de los pozos profundos.

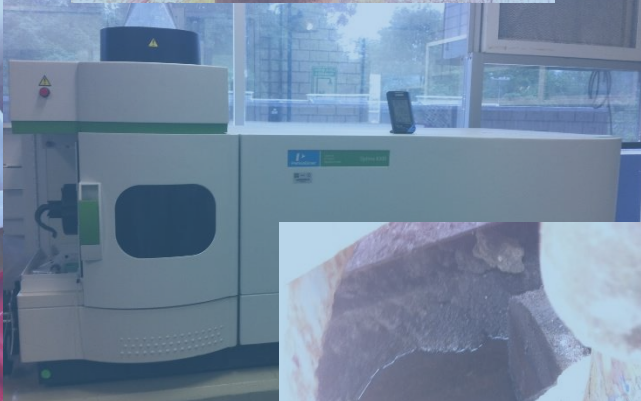
A todos mis compañeros que apoyaron durante las jornadas de trabajo de campo: Ricardo, Berenice, Tatiana, Daya, Saraí, Olán, Román y Mario. A todos los amigos que conocí mientras hacía el posgrado sin los cuales esta experiencia no hubiera sido la misma: Sol, Enrique, Heiner, Estefanía, Jorge, Jose, Paulina, Rosa, José Luis, Iván Arredondo, Daniel, Isaac, Vanessa.

A mi **mamá** por absolutamente todo. A Miguelin por siempre hacerme olvidar los malos momentos y llenarme de energía y ganas de vivir. A la Sra. Martita por todos sus consejos. A Dulce por su ayuda. A mi familia por ser tan hermosa y siempre tener palabras de apoyo y poner una sonrisa en mi rostro.

A Margarita por siempre estar cuando más se necesita, su disposición, su interés genuino y calidad como persona. Gracias. A Vicky por toda su ayuda y apoyo.

Al señor Carlos y el equipo de Hidrogama. A la tripulación del equipo PM-1282, por parte de PEMEX. Gracias a todos por su valioso apoyo.

A Rauw, porque su voz y su música me ayudaron a estar activa en muchas noches de desvelo que se requirieron para hacer este trabajo. Hace mucho mas de lo que se imagina.



Contenido

<i>Resumen</i>	1
<i>Abstract</i>	2
<i>Introducción</i>	3
<i>Capítulo 1 Marco teórico</i>	7
1.1 Caracterización física a partir de los registros geofísicos de Pozo.....	8
1.2 Pruebas hidráulicas.....	13
1.3 Hidrogeoquímica.....	16
1.4 Isotopía.....	17
<i>Capítulo 2 Área de estudio</i>	22
<i>Capítulo 3 Metodología</i>	29
3.1 Interpretación de registros geofísicos.....	31
3.2 Realización y procedimiento de interpretación de pruebas hidráulicas.....	33
3.3 Muestreo de agua para pruebas hidrogeoquímicas e isotópicas.....	34
3.3.1 Cálculo del tiempo de residencia.....	36
<i>Capítulo 4 Resultados</i>	37
4.1 Resultados de la interpretación de los registros geofísicos.....	38
4.2 Determinación de parámetros hidráulicos.....	50
4.3 Análisis hidrogeoquímico.....	53
4.4 Interpretación de las mediciones de isótopos estables e isótopos radiactivos.....	65
4.4.1 Información isotópica de las muestras analizadas.....	66
4.4.2 Diagrama de Han & Plummer.....	67
4.4.3 Cálculo del tiempo de residencia. Modelo de Eichinger.....	69
4.4.4 Cálculo del tiempo de residencia. Modelo de Pearson.....	70
4.4.5 Cálculo del tiempo de residencia. Modelo de la IAEA.....	71
4.4.6 Elevación de la infiltración y línea meteórica.....	74
<i>Discusión</i>	77
<i>Conclusiones</i>	80

<i>Referencias</i>	82
<i>Anexo 1</i>	86
<i>Anexo 2</i>	88
<i>Anexo 3</i>	89
<i>Anexo 4</i>	91
<i>Anexo 5</i>	92
<i>Anexo 6</i>	94

Índice de Mapas

Mapa 1. Localización del pozo Santa Catarina 3A en la Ciudad de México.....	23
Mapa 2. Localización de pozos perforados anteriormente al Santa Catarina 3A.....	25
Mapa 3. CDMX y sierras circundantes con altitudes mayores a 3000 [m].....	75

Índice de figuras

Figura 1. Correlación litoestratigráfica propuesta.	28
Figura 2. PHIC vs NPHI medida del pozo Agrícola Oriental 2B.	39
Figura 3. NPHI calculada para Santa Catarina 3A. Primera etapa.	40
Figura 4. NPHI calculada para Santa Catarina 3A. Segunda etapa.	41
Figura 5. Registros geofísicos del pozo Santa Catarina 3A. Primera etapa. Se marcan con una línea anaranjada los contactos litológicos identificados. Se resalta en azul un estrato identificado como posiblemente saturado.	44
Figura 6. Registros geofísicos del pozo Santa Catarina 3A. Segunda etapa.	47
Figura 7. Gráfica de abatimiento residual Vs. tiempo.	50
Figura 8. Simulación de la prueba de aforo de septiembre.	51
Figura 9. Gráfica de tiempo vs concentración de iones en la primera y tercera	57
Figura 10. Gráfica de tiempo vs concentración en escala logarítmica de iones en la	58
Figura 11. Gráfica de tiempo vs concentración de elementos traza en la primera y tercera	59
Figura 12. Diagrama de Piper.	61
Figura 13. Diagrama de Stiff para la muestra 9a adquirida.	62
Figura 14. Diagrama de Stiff para la muestra SC3-MA-07 adquirida.	62
Figura 15. Diagrama de Stiff para la muestra 7a correspondiente al pozo.	63
Figura 16. Diagrama de Stiff para la muestra del pozo San Lorenzo Tezonco.	63
Figura 17. Gráfico de Han & Plummer para el pozo Santa Catarina 3A.	67
Figura 18. Gráfica de $\delta^{18}\text{O}$ contra $\delta^2\text{H}$ de las muestras de agua de los pozos San Lorenzo Tezonco, Tláhuac y Santa Catarina 3A (SCT3A-8a y SC3-MA-07). Línea meteórica local de Cortés et al. (1997).	76
Figura 19 Modelo hidrogeológico local propuesto A-A'	79
Figura 20. Recortes de perforación de pozo SACT3A correspondientes al inicio y final de la primera etapa.	86
Figura 21. Recortes de perforación de pozo SACT3A de 547 a 1080 [m].	87
Figura 22. Segmento del núcleo 2 (N1-SCT3A). Profundidad de extracción: 967-968 [m].	88
Figura 23. Segmento del núcleo 2 (N2-SCT3A). Profundidad de extracción: 1550-1551 [m].	88
Figura 24. Segmento del núcleo 2 (N3-SCT3A). Profundidad de extracción: 1901-1902 [m].	88

Índice de tablas

Tabla 1. Integración de información de la unidad lacustre para los pozos Mix-AO2C, SLT, SCT3A y Tulye.....	26
Tabla 2. Integración de información de la unidad volcánica superior para los pozos Mix-AO2C, SLT, SCT3A y Tulye.....	26
Tabla 3. Integración de información de la unidad volcánica inferior para los pozos Mix-AO2C, SLT, SCT3A y Tulye.....	27
Tabla 4. Integración de información de la unidad de calizas para los pozos Mix-AO2C, SLT, SCT3A y Tulye.....	27
Tabla 5. Muestras de agua y análisis realizados en el pozo SCT3A.....	35
Tabla 6. Valores empleados para calibración de registro de porosidad.....	38
Tabla 7. Error en la calibración	39
Tabla 8. Estratos propuestos en los que se supone aporte.....	48
Tabla 9. Parámetros hidráulicos del pozo Santa Catarina 3A.....	52
Tabla 10. Resultados de los análisis químicos para elementos mayores y nitratos, de las muestras del pozo Tláhuac y Santa Catarina 3A para los meses de julio y septiembre.....	54
Tabla 11. Resultados de los análisis químicos para elementos traza, de las muestras del pozo	55
Tabla 12. Límites permisibles de características químicas en el agua para uso y	56
Tabla 13. Resultados del balance iónico.....	60
Tabla 14. Composición isotópica de las muestras de agua del pozo San Lorenzo Tezonco y Santa Catarina 3A.....	66
Tabla 15. Muestra los valores utilizados en el modelo de corrección de Eichinger.....	69
Tabla 16. Valores empleados para el cálculo del tiempo de residencia con $^{14}C0$ calculado acuerdo al modelo de Eichinger.....	69
Tabla 17. Muestra los valores empleados para el cálculo de	70
Tabla 18. Muestra los valores empleados para el cálculo del tiempo de residencia con.....	70
Tabla 19. Valores empleados para el cálculo de.....	71
Tabla 20. Valores empleados para el cálculo del tiempo de residencia con $^{14}C0$ calculado acuerdo al modelo de la IAEA.....	71
Tabla 21. Composición isotópica de las muestras de agua del pozo Santa Catarina 3A, Tláhuac y San Lorenzo Tezonco.....	74
Tabla 22. Resultados del cálculo de la elevación de infiltración del pozo Santa Catarina 3A (SCT 3a-8a, SC3MA-07), Tláhuac y San Lorenzo Tezonco (SLT).....	74

Resumen

En la actualidad la Ciudad de México cuenta con una gran demanda de agua, esto debido al continuo crecimiento de la población, lo que ejerce una enorme presión sobre el sistema hidrogeológico. Esta presión se ha manifestado, entre otros aspectos, como un descenso sostenido del nivel piezométrico, despresurización y consolidación del estrato lacustre superficial y, consecuentemente, subsidencia del terreno.

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), en colaboración con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y Petróleos Mexicanos (PEMEX), implementaron un programa de exploración para estudiar las características geológicas e hidrogeológicas de las formaciones profundas de la Ciudad de México (CDMX), esto con el fin de ampliar las opciones de manejo del sistema hidrogeológico. El pozo Santa Catarina 3A es el cuarto pozo de este programa, fue perforado como pozo direccional con 1992 [m] de profundidad, proyectada en la vertical.

El análisis de esta tesis se basa en los datos obtenidos de registros geofísicos de pozos, recortes de perforación, núcleos, análisis hidrogeoquímicos e isotópicos y pruebas de aforo.

Con base en los recortes de perforación, núcleos, registros eléctricos y rayos gamma se identificaron de manera general dos zonas con posibilidad de aportar agua: la primera que va de los 895 a 990 [m] compuesta por depósitos de ceniza, la segunda es un paquete de intercalaciones que se encuentra entre los 1346 y 1750 [m] de profundidad clasificada como depósitos de Lahar con de alteración hasta los 1755 [m] aproximadamente.

En cuanto al análisis hidrogeoquímico, se observa una concentración constante de iones mayores y elementos traza de julio a septiembre del 2017, tiempo en el cual se estuvo monitoreando el pozo. Al utilizar los valores de los iones mayores en el diagrama de Piper, éste muestra que el agua pertenece al grupo de aguas cloruradas-sódicas. Únicamente se detectaron nitratos en las muestras del mes de julio, lo cual indica presencia del agua del pozo con la que se hizo el lodo de perforación, la cual también tiene nitratos y es extraída de un pozo somero.

Para el análisis isotópico se obtuvieron dos muestras la primera tuvo un contenido de $\delta^{18}\text{O} = -10.6$ y $\delta^2\text{H} = -73.6$, la segunda $\delta^{18}\text{O} = -10.7$ y $\delta^2\text{H} = -75.15$ lo cual sugiere que se tiene un origen por infiltración de precipitación la cual ocurrió aproximadamente a 3000 [m.s.n.m.], la cual, con base en el modelo de Ortega y Farvolden (1989), puede provenir de la Sierra Chichinautzin, Sierra de las Cruces, Sierra Río Frío o Sierra Nevada. El cálculo del tiempo de residencia se llevó a cabo utilizando el contenido actual de ^{14}C en el agua y diferentes modelos de corrección, con los cuales se calculó el contenido inicial de ^{14}C . El tiempo de residencia estimado fue de 2840 años; sin embargo, sería necesario datar nuevamente el agua del pozo para asegurar este resultado.

A través del análisis de un ensayo de recuperación se determinó una transmisividad de 768 [$\text{m}^2/\text{día}$], lo que corresponde a una conductividad hidráulica promedio de 0.885 [$\text{m}/\text{día}$] para el espesor saturado. A través de un análisis de regresión lineal, mediante el software AQTESOLV®, de calculó un almacenamiento específico de 3.11×10^{-6} [m^{-1}].

Abstract

Nowadays, Mexico City has a high demand for water due to the population growth, this exerts an enormous pressure on the hydrogeological system. This pressure has manifested itself, among other aspects, as a sustained decrease in the piezometric level, depressurization and consolidation of the superficial lake stratum and consequently the terrain subsidence.

In order to expand hydrogeological system management options, the *Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX)*, with the *Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)* and *Petróleos Mexicanos (PEMEX)*, has implemented an exploration program to study geological and hydrogeological characteristics of Mexico City deep formations. Santa Catarina 3A well is the fourth of this program and it was drilled as a directional well with 1992 meters depth, vertically projected.

To achieve this goal, this work is based on the analysis of geophysical well logs, drilling cuts, drilling cores, hydrogeochemical and isotopic analyses, and pumping tests.

Based on drilling cuts, drilling cores, electrical and gamma ray logs, there are two areas that were identified with supplying water possibility: the first one that goes from 895 to 990 meters is composed of ash deposits, the second is an interleaving package between 1346 and 1750 meters depth classified as Lahar's deposits with alteration approximately by 1755 meters.

As for the hydrogeochemical analysis, a constant concentration of major ions and trace elements is observed from July to September 2017, time in which the well was monitored. By using major ions values in the Piper diagram, it shows that the water belongs to the chlorinated-sodium group of waters. Nitrates were only found in the samples of July, which indicates the presence of water from the well that was used to make the drilling mud, this well is not very deep and also has nitrates.

For the isotopic analysis, two samples were obtained, the first one had $\delta^{18}\text{O}=-10.6$ & $\delta^2\text{H}=-73.6$ content, the second one of $\delta^{18}\text{O}=-10.7$ & $\delta^2\text{H}=-75.15$ which suggests that it has an origin due to precipitation infiltration which occurred at approximately 3000 [m.a.m.s.l.], according to Ortega and Farvolden (1989), probably from *Sierra Chichinautzin*, *Sierra de las Cruces*, *Sierra Río Frío* or *Sierra Nevada*. The residence time calculation was carried out using the current content of carbon-14 in the water and different correction models, with which the initial carbon-14 content was calculated. The estimated residence time was 2840 years; nevertheless it would be necessary to do the radiocarbon test in another sample, in order to confirm this result.

Through a recovery test analysis, a transmissivity of 768 [m² / day] was determined, which corresponds to an average hydraulic conductivity of 0.885 [m / day] for saturated thickness. Specific storage of 3.11×10^{-6} [m⁻¹] was calculated, by a linear regression analysis, made with AQTESOLV© software.

Introducción

La Cuenca de México ha sido motivo de diversos estudios, particularmente se han llevado a cabo varios de estos en la Ciudad de México, ya sea para conocer su estratigrafía, sus estructuras geológicas o las propiedades físicas y químicas del subsuelo y del agua que circula por este. En el campo de la hidrogeología es necesario contar, en la medida de lo posible, con la información de los rubros anteriormente mencionados, para así facilitar la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual. De acuerdo con estudios previos ([Ortega y Farvolden, 1989](#); [Mooser y Molina, 1993](#) ; [Edmunds et al., 2002](#); [Leyva-Suárez, 2010](#); [Morales Casique et al., 2014](#); [Birkle et al., 2015](#)) se pueden clasificar distintas unidades hidroestratigráficas en la Ciudad de México: i) unidad de depósitos lacustres; ii) rocas volcánicas del cuaternario y material piroclástico; iii) material aluvial y piroclástico; iv) rocas volcánicas del terciario y; v) rocas carbonatadas. La evolución química del agua que circula a través de algunas de estas unidades ha sido estudiada por diferentes autores ([Edmunds et al., 2002](#); [Huizar et al., 2004](#); [Cardona y Hernández, 2015](#)); sin embargo, la profundidad de los pozos en los que se han llevado a cabo dichos estudios no van más allá de los 450 [m], lo que indica que el agua se extrae de las unidades i y ii, de acuerdo con las profundidades de las unidades hidroestratigráficas propuestas por [Morales Casique et al. \(2014\)](#). Particularmente en [Edmunds et al. \(2002\)](#), además del análisis hidrogeoquímico, realizan la datación de seis muestras de agua en la Ciudad de México, clasificando tres de ellas como agua moderna y la más antigua de 6080 años en un pozo de 150 [m] de profundidad.

La formación y evolución geológica de la Cuenca de México ha sido estudiada por diversos autores ([Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989](#); [Lozano-García y Ortega-Guerrero, 1998](#); [Ferrari et al., 2000](#); [García-Palomo et al., 2008](#); [Arce et al., 2013](#)). A modo de resumen, identifican las rocas más profundas como rocas carbonatadas del Cretácico (Formación Morelos, Formación Cuautla y Formación Mexcala); sobre estas se encuentran rocas volcánicas del Terciario y depósitos continentales (Grupo Balsas, Ingnimbrita, Riolita y Andesita) seguidos de depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno; a continuación le sobreyacen rocas volcánicas del Cuaternario (Formación Iztaccíhuatl, Formación Popocatepetl, Formación Chichinautzin, Dacita, Basalto y Andesitas); finalmente se identifican depósitos aluviales y lacustres correspondientes al Cuaternario. [Birkle et al. \(2015\)](#) mencionan que se pueden distinguir en el Valle de México cuatro unidades: arcillas lacustres, piroclastitas volcánicas, lavas volcánicas y carbonatos calcáreos. Durante los años 1986 y 1987, la Comisión Federal de Electricidad y

Petróleos Mexicanos, llevaron a cabo estudios geológicos y geofísicos, entre los cuales se perforaron 4 pozos de sondeo estratigráfico, levantamientos sísmicos, entre otros. Dichos pozos son el Mixhuca – 1, Tulyehualco – 1, Roma – 1 y Copilco – 1, los cuales tienen profundidades entre los 2258 y los 3200 [m]. Con base en dichos estudios [Pérez-Cruz, G. A. \(1988\)](#), propuso un modelo geológico del subsuelo de la Ciudad de México en términos de estructura y estratigrafía.

Desde hace varios años, la Ciudad de México cuenta con una gran demanda de agua debido al continuo crecimiento de la población, lo cual ejerce una enorme presión sobre el sistema hidrogeológico. La constante extracción de agua subterránea, se ha manifestado como subsidencia del terreno, despresurización, consolidación del estrato lacustre superficial y descenso sostenido en el nivel piezométrico. A partir del 2011 el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, en colaboración con la Comisión Nacional del Agua y Petróleos Mexicanos, implementó un programa de exploración para estudiar las características geológicas e hidrogeológicas de las formaciones profundas de la Ciudad de México. Este programa consistió en la perforación de 5 pozos cuyas profundidades varían entre los 1570 y 2289 [m]: i) San Lorenzo Tezonco de 2008 [m], ii) Agrícola Oriental 2B de 2000 [m], iii) Agrícola Oriental 2C 1570 de [m], iv) Santa Catarina 3-A de 1992 [m], v) El Mirador 2289 [m]. ([Morales-Casique et al., 2014](#); [Lezama-Campos et al., 2016](#); comunicación personal con el Mtro. José Luis Lezama Campos.)

Esta tesis se enfoca en el estudio del pozo Santa Catarina 3a (cuarto pozo de la campaña de perforación), ubicado en la delegación Xochimilco, al sur de la ciudad de México. Fue perforado de diciembre del 2016 a julio del 2017, es un pozo direccional con un azimut aproximado de 270°, tipo “J” con una inclinación de 26.9°, alcanzando 1992 [m] de profundidad proyectada en la vertical y 2036 [m] perforados ([Morales Casique et al., 2017](#)).

Estudios previos realizados por [Morales-Casique et al. \(2014\)](#) describen la litoestratigrafía encontrada en el pozo San Lorenzo Tezonco (que también forma parte del programa de exploración) y reportan valores estimados de conductividad hidráulica ($K=0.2$ [m/día]) y almacenamiento específico ($S_s=4 \times 10^{-6}$ [1/m]) entre 1176 y 2008 [m] de profundidad. Adicionalmente, a partir del análisis de isótopos estables sugieren que el origen del agua captada en estos estratos, es debido a la infiltración de la precipitación y tiene un tiempo de residencia estimado de $14,237 \pm 265$ años. En [Morales-Casique et al. \(2015\)](#) se realizó la inversión de ensayos de bombeo escalonados en el mismo intervalo de profundidad, considerando para la inversión un modelo de flujo que toma en cuenta pérdidas de carga hidráulica lineales y no lineales

debidas al pozo y al flujo no darciano en la vecindad del pozo; de este modo se estimó la conductividad hidráulica ($K=0.24$ [m/día]) y el almacenamiento específico ($S_s=4 \times 10^{-6}$ [1/m]), corroborando así los resultados de [Morales-Casique et al. \(2014\)](#) e indicando que estos resultados son representativos de cientos de metros alrededor del pozo y que pueden ser empleados para la calibración de modelos regionales de flujo de agua subterránea en la Cuenca de México.

De igual manera, a través de los análisis de ensayos de bombeo escalonados y de recuperación, realizados en el pozo Santa Catarina 3A se desea obtener valores de transmisividad y de almacenamiento de 1168 a 1992 [m], lo cual corresponde con el tramo de tubería ranurada (proyectado en la vertical). Con esta tesis se pretende: i) ampliar el conocimiento actual que se tiene sobre las características físicas de las rocas que conforman los sistemas hidrogeológicos intermedios y profundos, así como las características del agua presente en dichos sistemas y ii) la posible relación entre las diferentes masas de agua presentes en la Cuenca de México. En este trabajo se realizan estudios hidroquímicos para determinar la composición química del agua y determinar el tipo de agua que se puede encontrar en el intervalo de profundidades antes mencionado, mediante el uso de diagramas de Piper y Stiff. Por otra parte, a través de la química isotópica se pretende determinar el tiempo de residencia y el origen del agua. Para el cálculo del tiempo de residencia se emplean diferentes modelos de corrección y se analiza la diferencia de resultados que puedan llegar a generar. Por medio de los registros geofísicos, se complementan los estudios para la determinación de porosidad y permeabilidad de la zona saturada. Cabe señalar que para la estimación de estas dos propiedades se utilizan ecuaciones que fueron desarrolladas empíricamente para yacimientos petroleros o específicamente para ciertos campos petroleros, lo que implica un sistema de fluidos multifase (aceite, agua, gas), que por simplicidad típicamente se consideran inmiscibles. En este pozo y en pozos perforados anteriormente en rocas volcánicas de la Cuenca de México, no se han encontrado evidencias de otras fases fluidas ([Morales-Casique et al., 2016](#); [Morales-Casique et al., 2017](#)), por lo que se adopta un supuesto hidrogeológico tradicional de una sola fase (agua) que satura el espacio poroso. Bajo este supuesto se desea explorar hasta qué punto se pueden aplicar las ecuaciones empíricas para fluidos multifase a un sistema hidrogeológico saturado de una sola fase.

Todo lo descrito anteriormente, aporta datos para proponer un modelo hidrogeológico en la vecindad del pozo Santa Catarina 3A.

Hipótesis

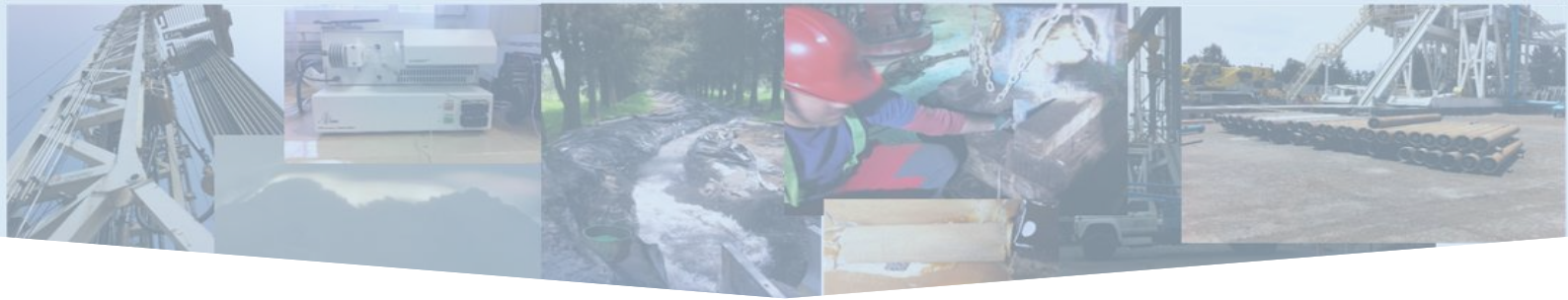
El flujo de agua subterránea captado con la perforación del pozo Santa Catarina 3A es dominado por la gravedad y proviene de la recarga de lluvia en la Sierra Chichinautzin, Sierra de las Cruces o Sierra Nevada, la cual circula a través de formaciones volcánicas y calcáreas, continuando su camino hacia zonas de descarga natural ([Ortega y Farvolden, 1989](#)). Ya que la zona de captación del pozo Santa Catarina 3A se encuentra casi a la misma profundidad y en rocas volcánicas con descripción similar a las del pozo San Lorenzo Tezonco ([Morales-Casique et al., 2014](#)), los valores de conductividad hidráulica y de coeficiente de almacenamiento serán similares en ambos pozos. El tiempo de residencia del agua del pozo Santa Catarina 3A será del orden de 10 000 años similar al pozo San Lorenzo Tezonco y pertenecerá a la familia de agua clorurada y/o sulfatada sódica.

Objetivo general

Proponer un modelo hidrogeológico local para el Pozo Santa Catarina 3A, al analizar y caracterizar la litología en la cual se encuentra la tubería ranurada del pozo, así como las características físicas y químicas del agua presente en dichas unidades.

Objetivos particulares

- Determinar la porosidad y permeabilidad del subsuelo a lo largo del pozo.
- Calcular la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento de la unidad hidrogeológica alrededor de la tubería ranurada.
- Calcular el tiempo de residencia del agua en el subsuelo.
- Determinar el origen y la composición química del agua extraída.



Capítulo 1

Marco teórico



1.1 Caracterización física a partir de los registros geofísicos de Pozo

Según [Telford \(1990\)](#) el objetivo principal de los registros de pozo es medir *in situ* las propiedades de las rocas y los fluidos que contiene. Dentro de los registros geofísicos de pozo se incluyen métodos mecánicos y métodos de fuente pasiva y activa, entre los que se incluyen resistividad, inducción, polarización inducida, detección de rayos gamma, etc.

Durante la perforación se agrega al agujero una combinación de agua con diferentes sólidos (barita, bentonita, entre otros) para crear un lodo denso y viscoso, que al ser introducido mientras se perfora, evita el derrumbe de las paredes del pozo y ayuda a enfriar la barrena; adicionalmente el lodo circula dentro del pozo y remueve la roca que está siendo triturada (recortes de perforación), llevándola a la superficie. Al mismo tiempo este lodo penetra en las formaciones porosas, proceso conocido como invasión, generando en ocasiones, una capa de 2 a 3 [cm] de espesor (enjarre), la cual evita que se siga filtrando más lodo a la formación rocosa. Un análisis del proceso de invasión resulta esencial para la interpretación de los registros ya que se pueden identificar las zonas que fueron más afectadas durante la perforación ([Telford, 1990](#)).

El registro de potencial espontáneo (SP) es un método pasivo y mide pequeñas diferencias de potencial generadas por corrientes eléctricas en el pozo, la cuales son causadas por la diferencia de las resistividades del agua de la formación y el lodo de perforación filtrado, y también las diferencias de potencial generadas por la presencia de iones en capas de arcilla. Los cambios en la diferencia de potencial son medidos respecto a la superficie del terreno por un electrodo dentro del agujero. Sus unidades son los mili Volts [mV] ([Krygowski, 2003](#)).

El registro de rayos gamma (GR) representa la cantidad medida de rayos gamma generados de manera natural a partir del uranio, torio, potasio y productos derivados de estos presentes en el subsuelo. Los rayos son contados por un detector de rayos gamma naturales y por espectroscopía de rayos gamma, en esta última se mide la energía de cada rayo gamma detectado. Sus unidades son [API] ([Krygowski, 2003](#)).

El caliper consta de un brazo o brazos que se contraen o extienden a lo largo del pozo, este movimiento es traducido en diámetro del agujero. Esta medida puede ser utilizada para detectar derrumbes o determinar el grosor del enjarre. La existencia de enjarre (cuando el diámetro del hoyo es menor que el de la perforación) es un indicativo de infiltración del lodo hacia la formación lo que puede ser un indicativo de permeabilidad en formaciones sedimentarias ([Krygowski, 2003](#)).

Para medir la resistividad del medio se pueden utilizar registros de inducción. La herramienta de inducción consta de una bobina transmisora, que induce una corriente alterna en la formación, y de una bobina receptora que capta la respuesta de la formación (tanto magnitud como fase). La respuesta es proporcional a la conductividad de la formación. Mediante este método se pueden tener medidas someras, medias y profundas, las unidades de medición son los [ohm*m]. La resistividad verdadera (resistividad de la formación) puede ser determinada a partir de la curva de inducción profunda ([Krygowski, 2003](#)).

[Aquith \(2004\)](#), indica que la porosidad, permeabilidad, saturación de agua y resistividad, son las características que más influyen en los registros geofísicos.

La porosidad (ϕ) está definida como el volumen de poros (V_p) respecto volumen total de la roca (V_T):

$$\phi = \frac{V_p}{V_T} \quad (1)$$

El tamaño de poros, su distribución y comunicación varían espacialmente, pueden ser poros cerrados que dificultan el tránsito de agua o poros interconectados que facilitan el movimiento el agua. Cuando existe comunicación entre los poros es denominada porosidad efectiva (ϕ_e), que representa el volumen de poros (V_e) interconectados respecto al volumen total de la roca (V_T):

$$\phi_e = \frac{V_e}{V_T} \quad (2)$$

La permeabilidad es la propiedad que tienen los materiales para permitir el paso de un fluido. La permeabilidad está relacionada con la porosidad, pero no de manera proporcional, ya que se puede tener una roca muy porosa pero cuyos poros no estén interconectados, también puede ocurrir que se tenga una garganta de poro muy pequeña (arcillas, pumitas, etc.), en estos casos la roca no sería permeable; sin embargo, una roca con menor porosidad, pero con gargantas de poro más grandes e interconectadas pueden tener mayor permeabilidad. La permeabilidad se mide en m^2 o cm^2 y es representada como k . ([Custodio-Llamas, 1983](#))

En muchos casos puede existir una relación entre la porosidad y la permeabilidad, pero esta relación típicamente es empírica y para cierta formación en algún área específica, por lo que las ecuaciones empíricas no son necesariamente válidas para aplicarlas de manera general. Una relación empírica más general es la que incorpora la saturación de agua irreducible, con lo cual se toma en cuenta el efecto de la porosidad abierta al flujo o porosidad efectiva; existen diferentes modelos basados en esta relación, con los cuales es posible calcular la permeabilidad en un registro de pozo a partir de la porosidad y el agua irreducible ([Schlumberger 1991](#)):

Tixier

$$k = \left(250 * \frac{\phi^3}{S_{wi}} \right)^2 \quad (3)$$

Timur

$$k = \left(100 * \frac{\phi^{2.25}}{S_{wi}} \right)^2 \quad (4)$$

Coates-Dumanoir

$$k = \left(\frac{300}{w^4} * \frac{\phi^w}{S_{wi}^w} \right)^2 \quad (5)$$

Coates

$$k = \left(70 * \frac{\phi_e * (1 - S_{wi})}{S_{wi}} \right)^2 \quad (6)$$

Donde:

- k es la permeabilidad
- ϕ es la porosidad
- S_{wi} es el agua irreducible
- w es un parámetro textural relacionado con los exponentes de cementación y saturación

La saturación de agua (S_w) es el volumen de poros que es ocupado por agua de formación. En esta tesis se le asigna a S_w un valor de 1, ya que los estratos de interés hidrogeológico están repletos de agua. La relación es:

$$S_w = \frac{\text{agua de la formación que ocupa los poros}}{\text{espacio poral total en la roca}} = 1 \quad (7)$$

La saturación de agua irreducible (S_{wi}) representa el agua que está atrapada entre granos de la roca o es retenida por la presión capilar. ([Asquith, 2004](#))

La resistividad es la medida de la dificultad o facilidad con la que fluye la corriente eléctrica a través de un material. Matemáticamente, es el inverso de la conductividad y se mide en ohm-metro ($\Omega \cdot m$). La resistividad está en función de la porosidad, el tipo de fluido y el tipo de roca; a través de las mediciones de resistividad de los registros geofísicos es posible estimar la porosidad de la formación. [Asquith \(2004\)](#) señala que los experimentos de Archie muestran que la resistividad de una formación saturada de agua (R_o) y la resistividad del agua que la satura (R_w) se relacionan mediante el factor de formación (F).

$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad (8)$$

Así mismo el factor de formación está relacionado con la porosidad de la siguiente manera:

$$F = \frac{a}{\phi^m} \quad (9)$$

Donde a es el factor de tortuosidad y m es el exponente de cementación que varía respecto a la geometría del arreglo y tamaño de granos. Estos valores son determinados de manera empírica. A mayor tortuosidad, mayor valor de m . La saturación de agua se representa mediante la relación entre la resistividad de la formación saturada (R_o) y la resistividad verdadera de la formación (R_t) mediante la siguiente relación ([Asquith, 2004](#)):

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{R_o}{R_t}} \quad (10)$$

Donde n es el exponente de saturación que varía desde 1.8 hasta 2.5. La ecuación de saturación de agua de Archie, comúnmente conocida como ecuación de Archie puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{a * R_w}{\phi^m * R_t}} \quad (11)$$

Donde:

- S_w es la saturación de agua
- n es el exponente de saturación
- a es el factor de tortuosidad
- R_w resistividad del agua que se encuentra en la formación
- ϕ es la porosidad
- m es el exponente de cementación
- R_t es la resistividad verdadera de la formación

La ecuación de Archie es una relación espacial entre el factor de formación y la porosidad, en dicha ecuación intervienen variables tales como el exponente de cementación (m), el factor de tortuosidad (a) y el exponente de saturación (n). ([Schlumberger, 1991](#))

Debido a la ausencia de curva de porosidad en el pozo Santa Catarina 3A, se generó dicha curva a partir de las curvas de resistividad medidas en rocas volcánicas del pozo Agrícola Oriental 2B, despejando la porosidad de la ecuación de Archie:

$$\phi = \sqrt[m]{\frac{a * R_w}{S_w^n * R_t}} \quad (12)$$

1.2 Pruebas hidráulicas

Un ensayo de bombeo es un método de análisis para el estudio del comportamiento de pozos de captación de agua subterránea, igualmente puede proporcionar información acerca de la calidad de construcción del pozo, pérdidas de carga o el caudal de bombeo más aconsejable, predicción de caudales y descensos futuros, transmisividad y coeficiente de almacenamiento de las rocas por las que circula el agua ([Custodio & Llamas, 1983](#); [Villanueva & Iglesias, 1984](#)).

Los ensayos de bombeo también son llamados pruebas de interferencia, ya que además de medir el descenso del nivel del agua en el pozo, se mide también en piezómetros alrededor del mismo o en su defecto en otros pozos cercanos al pozo que se está estudiando. Desafortunadamente no siempre se cuenta con piezómetros u otros pozos en los alrededores, por lo que a la medición del descenso del nivel del agua en el pozo recibe el nombre de prueba de aforo o ensayo de descenso. Por otra parte, los ensayos de recuperación son aquellos en los que se mide el cambio del nivel del agua en el pozo, una vez que se detiene el bombeo ([Custodio & Llamas, 1983](#)).

De acuerdo a [Villanueva & Iglesias \(1984\)](#) los tipos de ensayo de bombeo se pueden clasificar de la siguiente manera:

$$\text{Tipos de ensayos de bombeo} \left\{ \begin{array}{l} \text{A caudal constante} \\ \text{A caudal variable} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{Régimen permanente} \\ \text{Régimen variable} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{Prueba de bombeo} \\ \text{Prueba de recuperación} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Bombeo a caudal crítico} \\ \text{Bombeo escalonado} \end{array} \right.$$

Tomado de [Villanueva & Iglesias \(1984\)](#)

En este trabajo se realizaron bombeos escalonados (de caudal variable) y pruebas de recuperación. Los métodos de bombeo escalonado se utilizan para calcular las pérdidas de carga del pozo, producidas por la construcción defectuosa del pozo, por la alta velocidad del flujo en la proximidad del pozo o por una mala instalación o diseño de la bomba. Para determinar estas pérdidas se realiza el cálculo de los coeficientes de la fórmula general de descensos que contempla pérdidas de carga lineal y no lineal ([Villanueva & Iglesias, 1984](#)):

$$s = BQ + CQ^n \quad (13)$$

Donde:

- s es el descenso en el nivel del agua
- B es el coeficiente de pérdida de carga (término lineal, flujo laminar)
- C es el coeficiente de pérdidas de pozo (término no lineal, flujo turbulento)
- Q es el caudal
- n es el exponente de pérdidas no lineales que puede variar entre 1 y 3.5

El pozo Santa Catarina 3A fue perforado hasta una unidad de rocas volcánicas (descrita en el capítulo 2), en la cual se localiza el tramo ranurado de la tubería. Por simplicidad, dicha unidad volcánica se supone confinada de estratos superiores e inferiores, es infinito, homogéneo, de espesor uniforme donde ocurre flujo radial y se considera el diámetro del pozo lo suficientemente pequeño para despreciar el almacenamiento. Por lo anterior, mediante el software AQTESOLV© se implementó la solución de Theis (1935) ([ec. 14](#)) para el análisis del bombeo escalonado realizado.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy ; \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (14)$$

Duffield implementó, a través de AQTESOLV©, una modificación a la ecuación de la solución de Theis (para un ensayo escalonado) que simula pérdidas lineales y no lineales en el pozo ([ec. 15](#)). Para este trabajo, se resolvió la ecuación modificada de Theis con el método linealizado de Gauss-Newton a través de AQTESOLV©, buscando el mejor ajuste entre la estimación y los datos del bombeo escalonado medidos en campo.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) + 2S_w] + CQ^n ; \quad u = \frac{r^2 S}{4\pi t} \quad (15)$$

Donde:

- s es el abatimiento respecto al nivel estático en el pozo
- T es la transmisividad
- $W(u)$ es la función de pozo de Theis
- r es el radio del pozo
- S_w factor de pérdidas lineales o factor de daño
- S es el almacenamiento específico
- t es el tiempo

Por otro lado, para analizar la prueba de recuperación se simula matemáticamente a partir de que se para el bombeo. Se supone que el pozo que ha bombeado un tiempo t a caudal constante Q , no se para, y en su lugar se inyecta un caudal constante Q a partir del tiempo t . La transmisividad es el parámetro que se puede obtener a partir de análisis de la recuperación por medio de la siguiente expresión ([Batu, 1998](#)):

$$T = \frac{2.303 Q}{4\pi\Delta s'} \quad (16)$$

Donde:

- Q es el caudal correspondiente al caudal de la etapa anterior al paro del bombeo
- $\Delta s'$ es el abatimiento residual
- Finalmente, la conductividad hidráulica (K) se puede obtener al dividir la transmisividad entre el espesor de la unidad hidrogeológica que se considera aporta agua.

1.3 Hidrogeoquímica

El agua está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, en la cual hay una separación de 105° entre los átomos de hidrógeno. La forma de la molécula no permite que haya equilibrio eléctrico, por lo que la molécula del agua es polar. La polaridad le confiere al agua la capacidad de disolver diferentes tipos de sales y algunos tipos de materia orgánica. Usualmente la conductividad eléctrica, cuyas unidades son $(\Omega \cdot m)^{-1}$, es un indicativo de la cantidad de iones disueltos. Debido al paso del agua a través de las rocas, la atmósfera y la interacción con diferentes cuerpos de agua, el agua subterránea contiene diferentes compuestos químicos con concentraciones variadas. Los compuestos disueltos en el agua subterránea pueden ser un indicativo de las rocas por las que ha circulado el agua, los procesos hidrogeoquímicos por lo que ha pasado o si ha sido afectada por las actividades del ser humano. Los iones mayores (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) comúnmente conforman el 90% de los sólidos disueltos en el agua ([Freeze & Cherry, 1979](#); [Appelo & Postma, 2005](#)).

Dependiendo de los componentes disueltos en el agua se le puede asignar un uso o un tratamiento para algún uso en específico, para esto se realizan análisis químicos. La temperatura, conductividad eléctrica, pH y análisis de iones mayores son variables que deben ser medidas para un estudio hidrogeoquímico ([Appelo & Postma, 2005](#)).

Para tener un control de calidad del análisis de iones mayores se utiliza el balance iónico, en el cual, los cationes y aniones se expresan en mili equivalentes por litro [meq/L]. Cuando las muestras presentan resultados menores a 5% es indicativo de que el análisis químico se realizó de manera adecuada. El balance iónico se calcula mediante la siguiente expresión ([Appelo & Postma, 2005](#)):

$$\text{balance iónico}[\%] = \frac{\text{cationes} + \text{aniones}}{\text{cationes} - \text{aniones}} \times 100 \quad (17)$$

Cuando se tienen varias muestras de agua se utilizan métodos gráficos para determinar a simple vista la composición química del agua. El diagrama de Stiff consta de tres o cuatro ejes horizontales, los cuales se dividen en dos, de lado izquierdo se ubican los cationes y de lado derecho los aniones; en uno de los ejes se colocan Na^+ y Cl^- , Ca^{2+} y HCO_3^- , Mg^{2+} y SO_4^{2-} , el cuarto eje es opcional. Una vez establecidos los contenidos de cada ion en [meq/L] se conectan con una línea recta. Otro método gráfico es el diagrama de Piper el cual consta de dos triángulos en los que se colocan las proporciones de cationes y aniones en [meq/L]. En el triángulo de los aniones el 100% se leen contrario a las manecillas del reloj, el Cl^- se encuentra en la parte inferior del triángulo, en el lado derecho el SO_4^{2-} y de lado izquierdo HCO_3^- . El triángulo de cationes se lee en sentido de las manecillas del reloj, el Ca^{2+} se encuentra abajo, el Mg^{2+} en el lado izquierdo y el Na^+ de lado derecho. Una vez ubicados los puntos se traza una línea paralela al lado derecho del triángulo para los aniones y una línea paralela al lado izquierdo del triángulo para los cationes, estas líneas se unen en un rombo y de este modo la composición química de la muestra queda indicada en un solo punto ([Appelo & Postma, 2005](#)).

1.4 Isotopía

Los isótopos presentes en el agua de manera natural han sido utilizados desde los años 50 para estudiar el ciclo del agua. En los análisis del agua están involucrados isótopos radioactivos como el tritio (^3H) y el carbono-14 (^{14}C), e isótopos estables como el oxígeno-18 (^{18}O) y el deuterio (^2H). Por su parte, los isótopos radioactivos son empleados para calcular el tiempo que ha transcurrido desde que el agua infiltrada llega a la zona saturada hasta el momento de su extracción ([Freeze & Cherry, 1979](#); [Mook, W. G., 2000](#)).

De acuerdo a [Mook, W. G. \(2000\)](#), el origen del ^{14}C y la datación del agua subterránea se pueden resumir de la siguiente manera:

El ^{14}C es un isótopo radiactivo con una vida media de 5730 ± 40 años, que se origina de manera natural en la atmósfera terrestre debido a la interacción de la radiación cósmica con el isótopo estable del nitrógeno ^{14}N ; sin embargo, al ocurrir las pruebas nucleares en 1953 se generó ^3H y ^{14}C , alcanzando este último, un máximo en su concentración en la atmósfera en 1963.

El ^{14}C se oxida formando $^{14}\text{CO}_2$ el cual se mezcla con el CO_2 atmosférico; dicha mezcla se combina con el agua de lluvia y al entrar en contacto con el suelo es capaz de disolver el carbonato contenido en éste. Es así como el ^{14}C pasa a formar parte del carbono inorgánico disuelto (CID) en el agua.

Para determinar la “edad del agua” o tiempo de residencia del agua, se mide la actividad del ^{14}C en el CID contenido en el agua. Del mismo modo es necesario saber la actividad inicial del ^{14}C en el CID presente en el agua. Esta actividad inicial debe ser asignada tomando en cuenta procesos hidrogeoquímicos, para lo cual existen diferentes modelos, algunos de los cuales se explican más adelante.

[Han & Plummer \(2016\)](#) utilizan la siguiente ecuación para calcular el tiempo de residencia:

$$t = -\frac{5730}{\text{Ln } 2} \text{Ln} \frac{{}^{14}\text{C}_{\text{CID}}}{{}^{14}\text{C}_0} \quad (18)$$

Donde:

- ${}^{14}\text{C}_{\text{CID}}$ es la actividad específica del carbono moderno de la muestra en pMC
- ${}^{14}\text{C}_0$ es la actividad específica del carbono inorgánico disuelto (CID) en $t=0$

[Pearson y Hanshaw, \(1970\)](#) utilizan valores entre 70 y 90 % como actividad inicial del carbono; sin embargo [Han & Plummer \(2016\)](#) realizaron un análisis de los modelos y otros enfoques utilizados para datar el ^{14}C del CID en el agua subterránea: modelos basados en una sola muestra, aproximaciones estadísticas basadas en la relación de carbono-13 (^{13}C) y ^{14}C y aproximaciones de balance de masa geoquímico. En esta tesis se emplearán algunos de los modelos basados en una sola muestra; éstos son los más utilizados en hidrogeología y han demostrado dar edades realistas, pero dependiendo del modelo que se seleccione se puede tener un amplio rango de edades; algunos de los modelos son: Tamer, Pearson, Mook, Wigley, Evan, Eichinger, Fontes y Garnier, Han & Plummer, Organismo

Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés), Oeschger, Cheng, entre otros. Cada modelo está basado en una serie de suposiciones referentes a reacciones químicas y fraccionamientos isotópicos que pueden ocurrir durante la evolución del carbono isotópico en el CID, lo cual afecta el valor de $^{14}C_0$.

Dentro de los modelos de corrección basados en una sola muestra, se encuentran los siguientes: i) modelos de mezcla simple acompañados de intercambio de carbono; ii) los modelos de mezcla simple y iii) el modelo de la IAEA el cual combina las condiciones de un sistema abierto y uno cerrado; entre otros.

Los modelos de mezcla simple acompañados de intercambio de carbono, suponen que el carbono isotópico en el agua proviene de la disolución del CO_2 gaseoso del suelo en el agua y de la interacción agua-roca (agua-carbonato sólido), y considera que el CID formado durante este proceso también tiene un intercambio de carbono, ya sea con el CO_2 gaseoso del suelo o los carbonatos sólidos.

Bajo la hipótesis de que el tramo ranurado del pozo SCT3A está en una formación que se encuentra en condiciones de sistema cerrado (no se considera intercambio de carbono en la zona no saturada), se consideró emplear los modelos de corrección que toman en cuenta el intercambio de carbono con carbonatos sólidos, como los son el modelo de Wigley, Evan y Eching. Evaluando estos tres, se considera que el modelo de Eichinger es un poco más completo ya que además de suponer que el agua subterránea está en equilibrio isotópico con el carbonato sólido, toma en cuenta la contribución del CO_2 acuoso en la composición isotópica del CID ([Han & Plummer, 2016](#)).

Modelo de Eichinger ([Han & Plummer, 2016](#)):

$$^{14}C_0 = \left(\frac{\delta^{13}C_{CID} - \delta^{13}C_E}{\delta^{13}C_i - \delta^{13}C_E} \right) \left(\frac{C_a + 0.5 C_b}{C_T} \right) ^{14}C_g \quad (19)$$

Donde:

- $\delta^{13}C_{CID}$ es la composición isotópica del carbono determinado a partir de la muestra (‰)
- $\delta^{13}C_E$ es el valor para $\delta^{13}C$ del CID en equilibrio con el carbonato sólido (‰)
- $\delta^{13}C_i$ es la composición isotópica para el carbono primario del CID (‰)
- C_a es la concentración de $CO_2 (aq)$ (mol/Kg)
- C_b es la concentración del HCO_3^- (mol/Kg)
- C_T es la concentración total del carbono inorgánico disuelto, $C_a + C_b$ (mol/Kg)
- $^{14}C_g$ es la composición isotópica del carbono para el CO_2 gaseoso en el suelo pMC

Los modelos de mezcla simple consideran que el $^{14}C_0$ proviene de dos fuentes, del CO_2 gaseoso del suelo y de los carbonatos sólidos. El modelo de Tamer y el modelo de Pearson son los modelos de mezcla simple más empleados, ambos consideran condiciones de sistema cerrado. La diferencia entre estos modelos, es que el modelo de Pearson considera dos fuentes de carbono isotópico en lugar de dos fuentes de carbono atómico. Adicionalmente, el modelo de Tamer asume que el CID proviene de la mezcla del 50% de carbonatos sólidos y del 50% de CO_2 en el suelo, mientras que el modelo de Pearson esta mezcla se puede dar en cualquier proporción.

En cuanto a estos dos modelos, se considera que el modelo de Pearson otorga mayor libertad en cuanto a la proporción de mezcla que dio lugar al CID, lo cual es conveniente debido a las diferentes condiciones que pueden presentarse en la naturaleza. Además, éste modelo, supone que el agua subterránea evoluciona química e isotópicamente debido a la disolución de carbonatos en condiciones de sistema cerrado mientras reacciona con el CO_2 disuelto en el agua que se recarga. El modelo de Pearson omite la disolución del CO_2 gaseoso en el agua ([Han & Plummer, 2016](#)).

Modelo de Pearson et al. ([Fontes y Garnier, 1979](#)), con $A_0 = {}^{14}\text{C}_0$:

$$A_0 = \frac{\delta_T - \delta_c}{\delta_g - \delta_c} (A_g - A_c) + A_c \quad (20)$$

Donde:

- δ_T es el carbono total disuelto $\delta^{13}\text{C}$
- δ_c son los carbonatos
- δ_g es el CO_2 en el suelo
- A_g es la actividad del CO_2 en el suelo
- A_c actividad del carbonato de origen marino

La estimación de A_0 mediante el método de Pearson y colaboradores toma en cuenta indirectamente la química del carbono, en términos de la mezcla de diferentes componentes, pero no incluye el efecto de fraccionamiento isotópico durante las reacciones de intercambio ([Fontes y Garnier, 1979](#)) lo que podría introducir incertidumbre adicional en la edad calculada.

El modelo de la IAEA toma en cuenta que el agua puede pasar de condiciones de sistema abierto a cerrado en su camino por el subsuelo. A continuación, se presenta la ecuación generalizada del modelo de corrección de la IAEA, la cual no toma en cuenta la contribución del CO_2 disuelto:

$${}^{14}\text{C}_0 = \left(\frac{{}^{14}\text{C}_g - 0.2\varepsilon_{g/b}}{\delta^{13}\text{C}_g - \varepsilon_{g/b}} \right) \delta^{13}\text{C}_{CID} \quad (21)$$

Donde:

- $\delta^{13}\text{C}_{CID}$ es la composición isotópica del carbono determinado a partir de la muestra (‰)
- $\delta^{13}\text{C}_g$ es el CO_2 gaseoso en el suelo (‰)
- ${}^{14}\text{C}_g$ es la composición isotópica del carbono para el CO_2 gaseoso en el suelo pMC
- $\varepsilon_{g/b}$ es la relación del CO_2 gaseoso en el suelo ($\delta^{13}\text{C}_g$) y el CO_2 gaseoso respecto al HCO_3^- (‰)

Al igual que el modelo de Eichinger, el modelo de la IAEA realiza la corrección debida al intercambio de carbono entre el CID y los carbonatos sólidos; sin embargo, el modelo de la IAEA supone que una vez formado el CID a partir de la interacción del agua con los carbonatos y la disolución del CO₂ del suelo, sigue ocurriendo una interacción entre el agua y el CO₂ gaseoso del suelo hasta alcanzar un equilibrio (condiciones de sistema abierto). Una vez alcanzado este equilibrio, se presume que el agua pasa a condiciones de sistema cerrado, es decir, el intercambio de carbono sólo ocurre con los carbonatos sólidos. A diferencia del modelo de Eichinger, el cual considera la contribución del CO₂ acuoso al CID, el modelo de la IAEA sólo considera la contribución de los bicarbonatos. [Han & Plummer \(2016\)](#), indican que el modelo de la IAEA es exclusivo para casos en los cuales el intercambio de carbono en la zona no saturada ha alcanzado el equilibrio.

Al inicio de este capítulo se mencionó que en el agua subterránea también se encuentran presentes isótopos estables, como los son el oxígeno-18 (¹⁸O) y el deuterio (²H). Estos isótopos pueden ser utilizados como trazadores; particularmente los isótopos estables son auxiliares para definir procesos geoquímicos e hidrológicos, como indicadores de evaporación en cuerpos superficiales, pero principalmente son usados como indicadores de áreas de recarga ([Freeze & Cherry, 1979](#); [Mook, W. G., 2000](#)).

De acuerdo con [Freeze & Cherry \(1979\)](#), cada forma isotópica del agua tiene presión de vapor y punto de congelamiento ligeramente diferentes, lo que lleva a que existan diferencias en la concentración de ¹⁸O y ²H en el agua durante el ciclo hidrológico. Se le llama fraccionamiento isotópico, al cambio en el contenido isotópico de una sustancia, lo cual puede ser debido a procesos de evaporación, congelamiento, derretimiento, reacciones químicas y procesos biológicos. Al ocurrir la evaporación en los océanos, el agua evaporada presenta contenidos entre 12-15‰ de ¹⁸O y 80-120 ‰ de ²H; al momento de la condensación, la lluvia o nieve tiene más ¹⁸O y ²H que el vapor remanente. A medida que el vapor de agua se mueve hacia los continentes y ocurren repetidamente procesos de precipitación y condensación, la lluvia o nieve terminan teniendo bajas concentraciones de ¹⁸O y ²H. Las cantidades de estos dos isótopos presentes en el agua de lluvia dependen de factores como la altitud, latitud y clima (temperatura), lo cual provoca que existan ciertas tendencias, alrededor del mundo, en la composición isotópica de la precipitación media anual, cambios en los contenidos isotópicos dependiendo de la estación del año e incluso variaciones isotópicas durante la precipitación.

Los contenidos de ¹⁸O y ²H en el agua subterránea pueden ser alterados de manera significativa con temperaturas mayores a 50°C; sin embargo, en temperaturas más bajas estos isótopos no son reactivos por lo que las concentraciones de éstos están determinadas por la composición isotópica presente al momento de la precipitación y la evaporación antes de que ocurra la infiltración ([Freeze & Cherry, 1979](#)).

Las concentraciones de ¹⁸O y ²H obtenidas a partir de precipitaciones alrededor del mundo se correlacionan mediante la siguiente relación empírica ([Craig, 1961](#)):

$$\delta^2H = 8 \cdot \delta^{18}O + 10 \quad (22)$$

Esta expresión es conocida como la línea de agua meteórica mundial y puede ser usada para estudiar la influencia del agua subterránea en el balance hidrológico de lagos, o para estudiar los efectos de la evaporación en la infiltración ([Freeze & Cherry, 1979](#)). [Cortés et al. \(1997\)](#) estimaron una línea meteórica local para la Ciudad de México, la cual está representada mediante la siguiente expresión:

$$\delta^2H = 7.97 \cdot \delta^{18}O + 11.03 \quad (23)$$

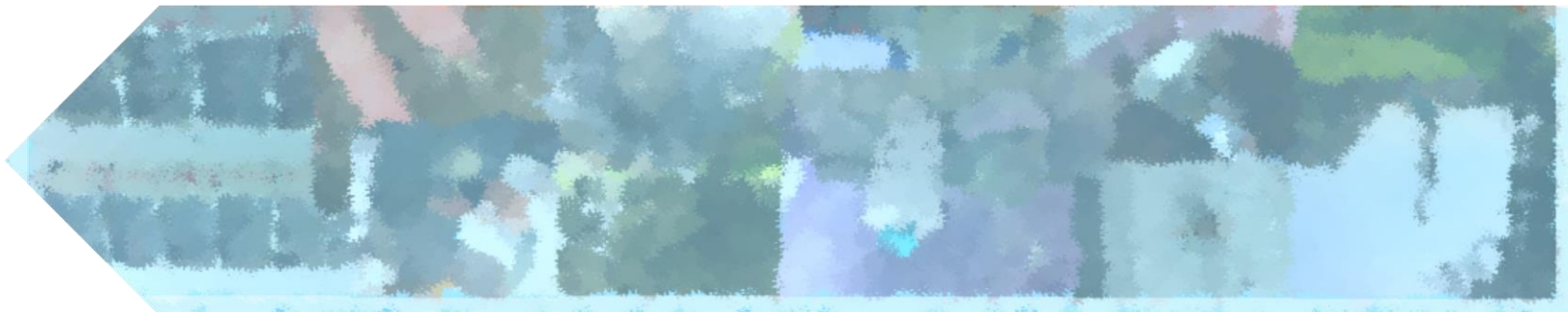
Ya que la concentración de ^{18}O varía, entre otros factores, debido a la elevación respecto al nivel del mar, puede ser utilizada para determinar la cota aproximada en la cual ocurrió la recarga, [Cortés y Durazo \(2001\)](#) utilizan la siguiente expresión para la Ciudad de México, en la cual interviene la altitud [Km] y el $\delta^{18}O$ [‰]:

$$\delta^{18}O = -2.13 \cdot Z[Km] - 3.2 \quad (24)$$

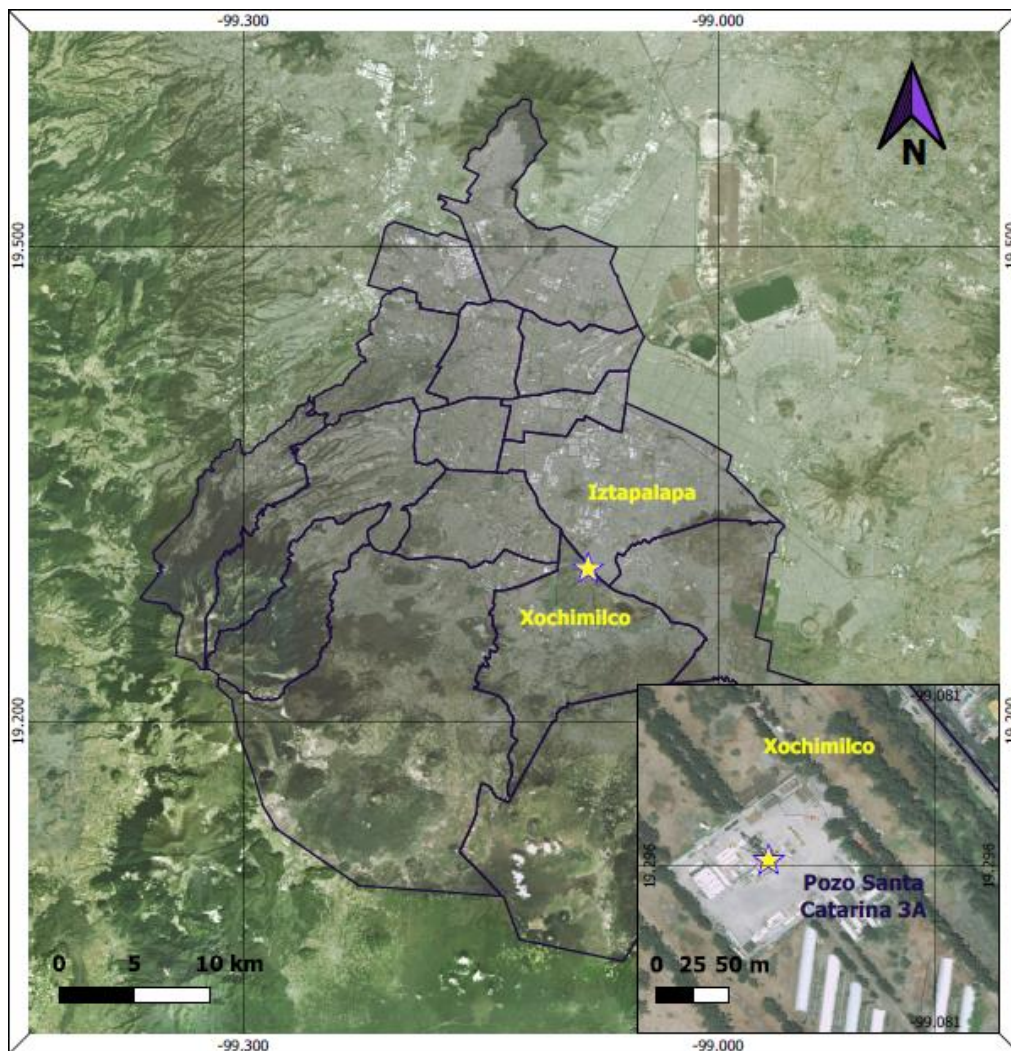


Capítulo 2

Área de estudio



La Cuenca de México se encuentra ubicada en la provincia geológica del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano, con una altitud promedio de 2240 [m.s.n.m.] ([Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989](#)). Es una estructura geomorfológica endorreica, de origen vulcano-tectónico ([Enciso-de la Vega, 1992](#)), que se encuentra rodeada por la Sierra de las Cruces al oeste, la Sierra Nevada al este, la Sierra del Chichinautzin al sur y la Sierra de Pachuca y Campo Volcánico Apan-Tezontepec al norte. La cuenca abarca parte de los estados de Hidalgo, México, Puebla, Tlaxcala, y Ciudad de México ([Arce, J. L., et al. 2013 y 2015](#)). El pozo Santa Catarina 3A se encuentra localizado al sur de la Cuenca de México, en las coordenadas 19°17'45.74" N, 99° 4' 55.7" W, ubicadas en la alcaldía de Xochimilco, Ciudad de México ([mapa 1](#)).



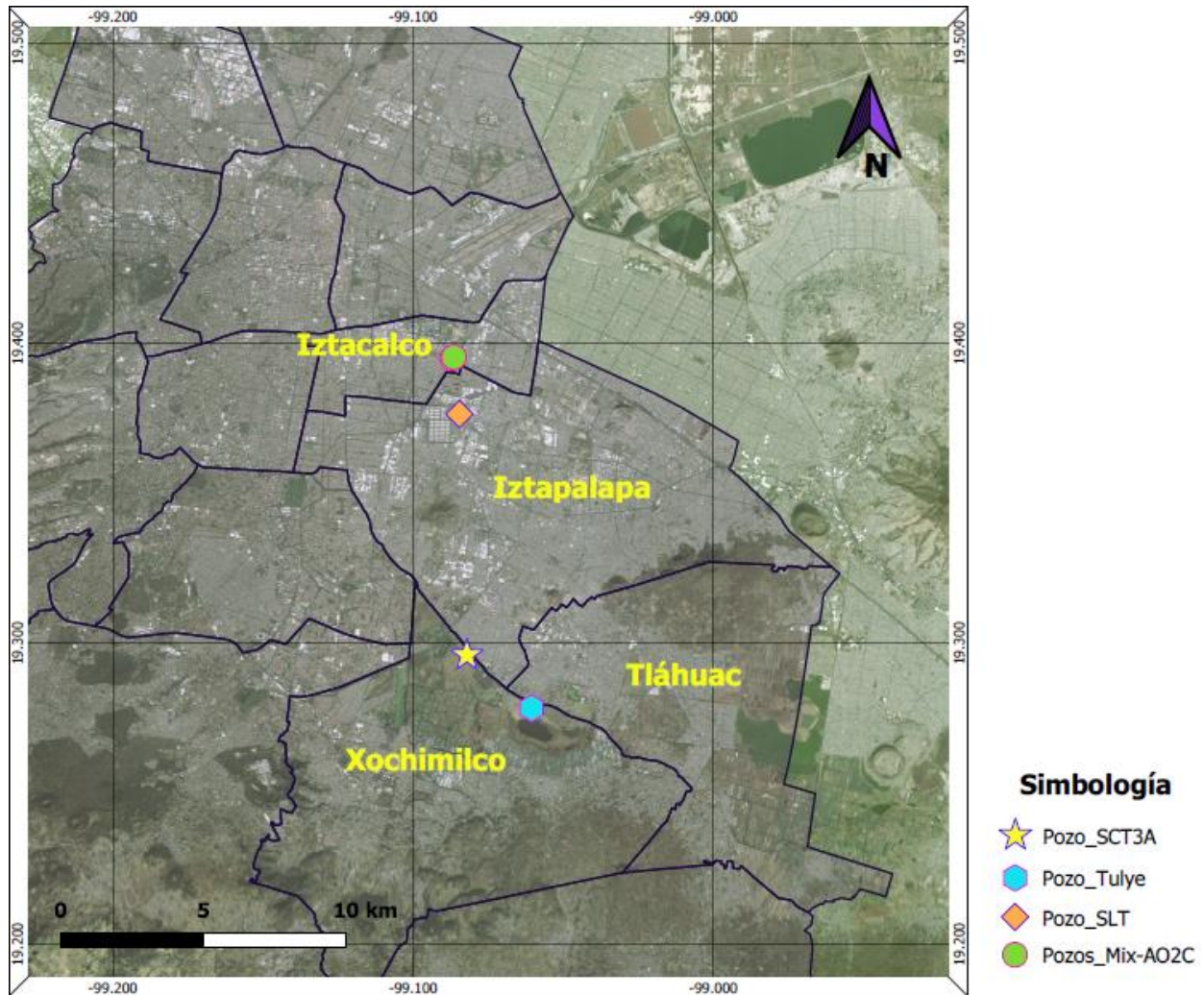
Mapa 1. Localización del pozo Santa Catarina 3A en la Ciudad de México.

[Pérez-Cruz \(1988\)](#) propone un modelo geológico de la Ciudad de México, clasificándolo en cuatro unidades estratigráficas: unidad de calizas del cretácico (perforada únicamente en los pozos Tulyehualco-1, Mixhuca-1 y Agrícola Oriental 2B), unidad volcánica inferior, unidad volcánica superior y unidad de arcillas lacustres. [Lezama-Campos et al. \(2016\)](#) indica que las rocas más antiguas encontradas en los pozos profundos, perforados en la Ciudad de México, son calizas de origen marino del Cretácico Inferior, cubiertas por calizas, lutitas y areniscas del Cretácico Superior. Éstas, están cubiertas por rocas sedimentarias de origen continental. A estos depósitos continentales le sobreyacen rocas volcánicas predominantemente andesíticas y dacíticas. Posteriormente, se encuentran depósitos volcánicos y vulcanoclásticos.

La litología presente en el pozo Santa Catarina 3A se describe en [Morales-Casique \(2017\)](#) y fue construida a partir de registros geofísicos, núcleos y recortes de perforación. Se describen lavas andesíticas con intercalaciones de ignimbrita y lavas alteradas de composición dacítica entre 547 y 820 [m], a continuación, se encuentra un paquete compuesto principalmente de ignimbrita y presenta intercalación con depósitos de lahar alterado y ceniza de 820 – 980 [m]. De los 980 a los 1125 [m] aproximadamente, se encuentran depósitos de lahar arcilloso seguidos de depósitos de lahar alterado. Posteriormente se encuentra una zona de depósito de lahar permeable hasta los 1300 [m] y en los siguientes cien metros hay presencia de lahar alterado y sin alterar. A continuación, existen intercalaciones de lahar permeable, lahar sin alteración y depósitos de bloques y cenizas que se extienden hasta los 1600 [m] de profundidad con presencia de piroxenos oxidados y fracturas rellenas con minerales hidrotermales. De 1600 a 1700 [m] se distinguen lahar permeable, lahar alterado y lahar sin alteración. Finalmente, con el análisis de los núcleos se pueden identificar aproximadamente 10 [m] (1900-1910 [m]), de depósitos de lahar hiperconcentrado de color verde debido a hidrotermalismo.

Anterior al pozo Santa Catarina 3A, se perforaron los pozos Mixhuca y Agrícola Oriental 2C (Mix-AO2C) en la alcaldía Iztacalco¹, el San Lorenzo Tezonco (SLT) en la alcaldía Iztapalapa, y el Tulyehualco (Tulye) en Xochimilco ([mapa 2](#)). Analizando las columnas estratigráficas reportadas de estos pozos se observa cierta correlación en la descripción litológica que puede ser asociada a las unidades estratigráficas propuestas por [Pérez-Cruz \(1988\)](#), así mismo se encuentra una correlación en la edad de estos pozos. Si bien el pozo Santa Catarina 3A, aún no cuenta con datación radiométrica, se puede correlacionar de acuerdo a su descripción litológica con estos pozos.

¹ Para el pozo Agrícola Oriental 2C no hay una columna litológica definida, [Vásquez-Serrano et al. \(2019\)](#) indica que, debido a la cercanía de este pozo con el Mixhuca, se puede tomar la columna de este último como representativa del AO2C.



Mapa 2. Localización de pozos perforados anteriormente al Santa Catarina 3A.

Tomando como base los estratos propuestos por [Pérez-Cruz \(1988\)](#) se describen las columnas litológicas de los pozos Mix-AO2C, SLT, SCT3A y Tulye indicando a qué época geológica corresponden de acuerdo a su datación radiométrica. Si bien, hay segmentos de las columnas que pertenecen a una misma época, se le dio prioridad a la descripción litológica para identificar en esta correlación una unidad lacustre, una unidad volcánica superior, una unidad volcánica inferior y una unidad de calizas. El pozo SCT3A no cuenta con edad radiométrica, pero se propone esta relación de acuerdo a su litología ([figura 1](#)).

En las [tablas 1 a 4](#), se muestran las unidades anteriormente mencionadas, descritas en cada pozo:

Unidad vulcano-sedimentaria					
Pozo	Profundidad [m]	Descripción	Edad [Ma]	Época	Referencia
Mix-AO2C	0-120	Depósitos lacustres	1.2	Pleistoceno	Vásquez-Serrano et al. (2019)
SLT	0-70	Sedimentos lacustres color amarillo claro	-	-	Arce, J. L et al. (2015)
	90-120	Secuencia andesítica-dacítica afanítica	-	-	
	510-580	Secuencia andesítica-dacítica afanítica	0.25	-	
	590-604	Lacustres	-	-	
SCT3A		no se identificó			Morales-Casique et al. (2017)
Tulye	0-580	Sedimentos lacustres, arcilla y arena	-	-	Unda-López (2012)

Tabla 1. Integración de información de la unidad lacustre para los pozos Mix-AO2C, SLT, SCT3A y Tulye.

Unidad volcánica superior					
Pozo	Profundidad [m]	Descripción	Edad [Ma]	Época	Referencia
Mix-AO2C	120-1000	Flujos piroclásticos, lavas de composición andesítica-basáltica	-	Plioceno-Pleistoceno	Vásquez-Serrano et al. (2019)
	604-700	Lavas y depósitos dacíticos	0.9-1.8	Pleistoceno	
SLT	700-760	Depósitos de flujo de bloques y ceniza	-	-	Arce, J. L et al. (2015)
	760-875	Ignimbrita color rosado, poco consolidado	5	Plioceno	
SCT3A	547-820	Lava alterada de composición dacítica, lava de composición andesítica	-	-	Morales-Casique et al. (2017)
	820-880	Depósitos de ceniza	-	-	
	880-980	Ignimbrita rosa	-	-	
Tulye	580-980	Intercalación de tobas, basalto y brecha volcánica	-	-	Unda-López (2012)

Tabla 2. Integración de información de la unidad volcánica superior para los pozos Mix-AO2C, SLT, SCT3A y Tulye.

Unidad volcánica inferior					
Pozo	Profundidad [m]	Descripción	Edad [Ma]	Época	Referencia
Mix-AO2C	1000-1573	Intercalación de lava y productos piroclásticos de composición andesítica y andesítica-dacítica	21.7	Mioceno	Vásquez-Serrano et al. (2019)
	875-1470	Secuencias de flujos de lava y depósitos piroclásticos de composición andesítica			
SLT	1470-1510	Riolita	13.5	Mioceno	Arce, J. L et al. (2015)
	1510-1800	Secuencias de flujo de lava andesítica gris, mineralización hidrotermal	-	-	
	1800-1930	Lava andesítica-basáltica	14.5-18.4	Mioceno	
	1930-2008	Lava andesítica	17.5-20.1	Mioceno	
SCT3A	980-1040	Depósito de lahar	-	-	Morales-Casique et al. (2017)
	1040-1080	Lava andesítica con lahar en la base	-	-	
	1550-1559	Depósitos de lahar	-	-	
	1900-1909	Depósitos de lahar	-	-	
Tulye	980-2107	Intercalación de tobas con basalto y brecha volcánica	16.5-19.6	Mioceno	Unda-López (2012)

Tabla 3. Integración de información de la unidad volcánica inferior para los pozos Mix-AO2C, SLT, SCT3A y Tulye.

Unidad de calizas					
Pozo	Profundidad [m]	Descripción	Edad [Ma]	Época	Referencia
Mix-AO2C	1573	Calizas tipo <i>mudstone</i> y <i>wackstone</i> recristalizadas	-	Cretácico inferior	Vásquez-Serrano et al. (2019)
SLT		No se perforó esta unidad			Arce, J. L et al. (2015)
SCT3A		No se perforó esta unidad			Morales-Casique et al. (2017)
Tulye	2107	Caliza tipo <i>mudstone</i>	-	Cretácico inferior	Unda-López (2012)

Tabla 4. Integración de información de la unidad de calizas para los pozos Mix-AO2C, SLT, SCT3A y Tulye.

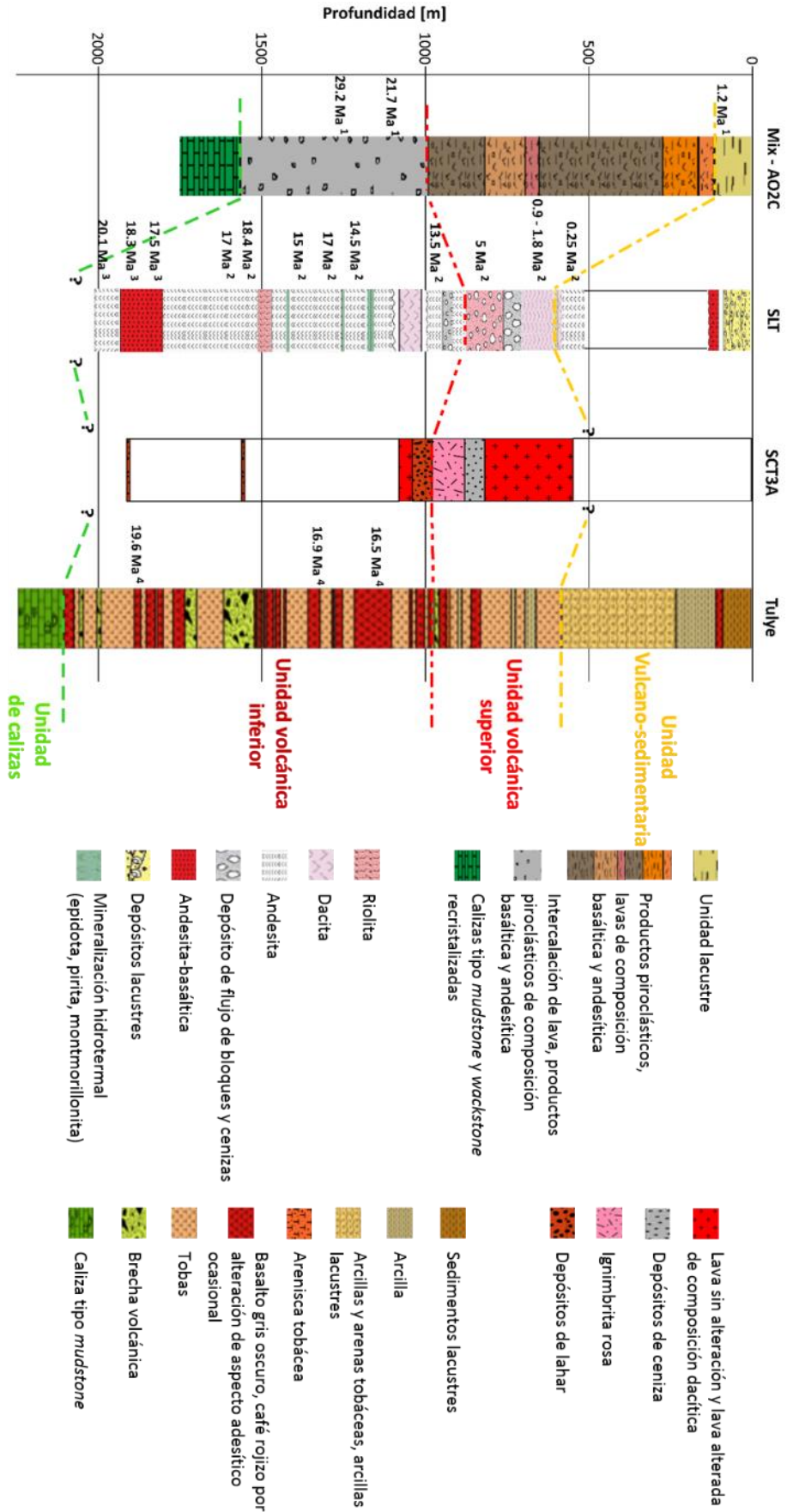


Figura 1. Correlación litoestratigráfica propuesta. Dirección N-S (aproximadamente), de acuerdo a la ubicación de los pozos en la ciudad de México como se muestra en el mapa 2. Se muestra una correspondencia litológica a través de las líneas puntadas en diferente color. Los signos de interrogación (?) indican el desconocimiento de la profundidad en la cual inicia dicha unidad. En el caso del pozo SLT y SCT3A no se perforó la unidad de calizas. Del mismo modo el pozo SCT3A presenta signos de interrogación en la profundidad de la unidad lacustre ya que debido a la perforación no se pudo identificar claramente este contacto. ¹ Edad radiométrica K-Ar reportada por Pérez-Cruz (1988). ² Edad radiométrica U-Pb reportada por Arce et al. (2013). ³ Edad radiométrica Ar/Ar reportada por Arce et al. (2013). ⁴ Edad radiométrica Ar/Ar reportada por Luca-Ferrari et al. (2013).



Capítulo 3

Metodología



En este apartado se expone la línea de trabajo seguida para el análisis de la información con la se contó para este proyecto, la cual se describe a continuación:

- Primero, durante la perforación, la supervisión del Sistema de Aguas de la Ciudad de México realizó un muestreo in situ de los recortes de perforación, dichos recortes fueron tomados desde los 547 [m] en intervalos de 20 [m] hasta los 1008 [m]. ([Anexo 1](#))
- A continuación, se tomaron tres núcleos a diferentes profundidades²: Núcleo 1 (N1-SCT3A), entre 966.0 y 969.0 [m]; Núcleo 2 (N2-SCT3A), entre 1550.0 y 1559.0 [m] y el Núcleo 3 (N3-SCT3A), entre 1900.0 y 1909.0 [m]. ([Anexo 2](#))
- Una vez terminado el pozo se corrieron herramientas para obtener registros geofísicos de pozo a profundidades que van de 510.84 a 1009.49 [m] (R2-SC3) y de 1060.09 a 1773.47 [m] (R3-SC3) ya que así lo permitieron las condiciones del pozo.

[Morales Casique et al. \(2017\)](#), realiza una descripción de los núcleos adquiridos y los clasifica de acuerdo a los minerales que se observaron en muestra de mano y sus características físicas. Con esta información se complementó la interpretación de los registros geofísicos.

- Seguido de esto durante los meses de julio, agosto y septiembre, se realizaron diferentes pruebas de aforo con los cuales se obtuvieron datos de la evolución en el nivel del agua durante el bombeo.
- Durante los aforos se tomaron muestras de agua a las cuales se les hicieron análisis químicos y de isótopos estables y radiactivos.

² Los núcleos fueron obtenidos conforme lo permitieron las condiciones de las columnas litológicas de pozos perforados con anterioridad (San Lorenzo Tezonco, Agrícola Oriental 2B y 2C). El primer núcleo, se extrajo de una profundidad menor a la cual se colocó la tubería ranurada; el segundo y el tercero se extrajeron en donde se observó pérdida de circulación y que posteriormente, sería donde se colocaría la tubería ranurada.

3.1 Interpretación de registros geofísicos

Los registros geofísicos del pozo Santa Catarina 3A fueron adquiridos con equipo y personal de Petróleos Mexicanos. De los tres ensayos de adquisición, se obtuvieron dos registros completos: (R2-SC3) de 510.84 a 1009.49 m y (R3-SC3) de 1060.09 a 1773.47 [m]. Los dos registros completos incluyeron: Registro Inductivo (AIT), Geometría del pozo (BGL) y Espectroscopia de Rayos Gama con Potencial Espontáneo (NGS). ([Morales Casique et al, 2017](#))

El análisis de los registros geofísicos se realizó de la siguiente manera:

- i. Verificar las curvas con las que se cuenta y si la información está completa
- ii. Seleccionar las curvas más adecuadas para realizar cálculos e interpretaciones
- iii. Realizar un análisis de grupos para determinar paquetes con las mismas características físicas
- iv. Calcular el volumen de arcilla a partir los rayos Gamma
- v. Calibrar la curva de porosidad calculada con una existente
- vi. Calcular la porosidad ([ec. 12](#))
- vii. Calcular el agua irreducible (S_{wi})
- viii. Calcular la permeabilidad ([ecs. 3, 4, 5 y 6](#))
- ix. Analizar las curvas en conjunto para interpretar

Para la calibración de la curva de porosidad se buscó empatar la curva de porosidad resultante de la ecuación de Archie con la curva de porosidad neutrón (NPHI) corrida en la primera etapa del registro en el pozo Agrícola Oriental 2B ([Morales-Casique et al., 2016](#)), ya que en esta etapa se encuentra material volcánico similar al encontrado en el pozo Santa Catarina 3A.

La calibración se realizó de la siguiente manera: primero se calculó una curva “inicial” de porosidad ([ec. 12](#)) con la curva de resistividad verdadera (R_t) del pozo Agrícola Oriental 2B (AO2B) con un factor de tortuosidad (a) de 1, un exponente de cementación (m) de 2, una saturación de agua (S_w) de 1 y una resistividad de agua (R_w) de 3.27 [Ohm*m]; después se aplicó un filtro de media móvil de 71 puntos a la curva de resistividad para suavizarla y facilitar la determinación de valores discriminatorios. Se les llamó valores discriminatorios al rango de resistividades para las cuales se identificaron valores de a y m , específicos para ese rango. Éstos son diferentes a los valores iniciales ($a \neq 1$ y $m \neq 2$) y fueron utilizados para ajustar (a través de ecuación de Archie [ec. 12](#)) la curva “inicial” de porosidad, de esta manera se logró así una mejor aproximación entre la curva de porosidad calculada y la curva NPHI del pozo AO2B. Como resultado se identificaron 6 valores discriminatorios, en la [tabla 6](#) del apartado 4.1, se muestran estas resistividades, así como los valores de a y m utilizados para el ajuste de las curvas. Una vez realizada la calibración (determinando los valores discriminatorios, así como a y m), se aplicó la ecuación de Archie para calcular una curva de porosidad para el pozo Santa Catarina 3A, utilizando la curva AT90 (resistividad profunda), una saturación de agua (S_w) de 1 y una resistividad de agua (R_w) de 3.27 [Ohm*m].

Una vez calculada la porosidad y el volumen de arcilla se estimó S_{wi} (agua irreducible), bajo el supuesto de que esta agua se encuentra asociada a la arcilla y no fluye por la porosidad efectiva. Por lo que el agua irreducible se obtiene eliminando el agua que fluye por la porosidad efectiva, de la saturación de agua total. Sin embargo, no se debe perder de vista que se pueden tener lecturas altas de rayos gamma en formaciones volcánicas debido al contenido de potasio en la formación y no necesariamente al contenido de arcillas, lo cual es importante tener en cuenta al momento de la interpretación. Por lo anterior, con el propósito de determinar zonas con aporte de agua, se utilizaron principalmente las curvas de resistividad somera y profunda, y el diámetro del agujero, verificando y comparando con la curva de permeabilidad calculada.

3.2 Realización y procedimiento de interpretación de pruebas hidráulicas

El 24 de agosto del 2017, el Instituto de Geología colocó un sensor capaz de medir presión, temperatura y conductividad eléctrica con el fin de registrar dichos parámetros antes, durante y después de las pruebas de aforo; el sensor quedó colocado a una profundidad de 139.45 [m] con respecto al suelo. El 29 de agosto se registró una profundidad del nivel estático de 66.77 [m] desde el suelo, esta medida fue la misma para el 1 de septiembre del 2017. Durante el estudio del pozo Santa Catarina 3A, en 2017, se realizaron 4 ensayos de bombeo, los detalles de cada uno se muestran en el [Anexo 3](#).

Para los ensayos de bombeo se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- i. Planeación: dependiendo del número de días en que se lleva a cabo el ensayo de bombeo se determinan la cantidad de escalones y la duración de cada uno.
- ii. Al llegar al pozo se mide con el nivel estático del agua y se deja la sonda dentro del pozo para que sea más fácil la medición del nivel una vez iniciado el bombeo.
- iii. Una vez iniciado el bombeo se empieza a medir y registrar el valor del nivel dinámico del agua. Los primeros 5 minutos se toma una lectura cada minuto, las siguientes lecturas se toman en el minuto 7 y 10, a partir de los 10 minutos se toma una lectura cada 5 minutos hasta llegar a los 50 minutos, las lecturas se siguen tomando en los minutos 60, 70, 80, 100, 120, a continuación, se toman lecturas cada 30 min hasta llegar a los 300 min y a partir de ahí se mide cada hora hasta completar 720 min.
- iv. En caso de contar con un piezómetro es recomendable medir el nivel del mismo cada vez que se mide el nivel dinámico.

El procedimiento descrito en el punto iii, indica que idealmente se debería bombear y medir durante 720 min en cada etapa del ensayo de bombeo; sin embargo, el tiempo puede ser reducido, pero se deben respetar los intervalos de tiempo en lo que se mide. En el [Anexo 3](#), se describe el procedimiento llevado a cabo en el pozo Santa Catarina 3A durante el mes de septiembre, este ensayo fue el más completo ya que se realizaron 8 escalones y 2 ensayos de recuperación por lo que fue utilizado para el cálculo del coeficiente de almacenamiento y la transmisividad.

Cálculo de la transmisividad:

- i. Construcción de la gráfica de abatimiento residual vs. $\log \text{ tiempo/tiempo}'$ ([figura 7](#))
- ii. Cálculo del abatimiento en un ciclo logarítmico
- iii. Utilización de la [ecuación 16](#) para calcular la transmisividad
- iv. Cálculo de la conductividad hidráulica

Para el cálculo del almacenamiento:

- i. Fijar el valor de transmisividad (valor calculado en el paso anterior)
- ii. Estimar el S, C, n y S_w mediante regresión utilizando AQTESOLV©

3.3 Muestreo de agua para pruebas hidrogeoquímicas e isotópicas

Durante el bombeo del pozo Santa Catarina 3A se tomaron 20 muestras de agua, en botellas de polietileno de alta densidad con capacidad de 1 [L]. De estas 20 muestras se enviaron dos al laboratorio Beta Analytic© para analizar ^{14}C e isótopos estables deuterio ($\delta^2\text{H}$) y oxígeno 18 ($\delta^{18}\text{O}$), mientras que para los análisis de iones mayores y elementos traza se analizaron 11 muestras en el Instituto de Geología en los laboratorios de cromatografía y espectroscopía atómica, respectivamente. Para realizar cada uno de estos análisis se les dio un tratamiento previo a las muestras dependiendo del tipo de estudio ([Anexo 4](#)).

En la toma de cada muestra se realizó el siguiente procedimiento:

- i. Llenar la botella a la mitad con agua bombeada del pozo.
- ii. Agitar vigorosamente para enjuagar el interior de cualquier agente contaminante.
- iii. Vaciar el contenido.
- iv. Repetir 4 veces, los 3 incisos anteriores.
- v. Enjuagar la tapa con agua bombeada del pozo.
- vi. Llenar la botella con agua del pozo cuidando que no queden burbujas de aire.
- vii. Tapar la muestra y etiquetar.
- viii. Preparar las muestras para el análisis designado ([Anexo 4](#)).
- ix. Construir los diagramas de Piper, Stiff, gráficas de Concentración vs. Tiempo y gráfica de $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ con los resultados de los análisis.
- x. Calcular la elevación donde ocurre la infiltración de la precipitación.

En la [tabla 5](#) se enlistan las muestras de agua seleccionadas³ para el análisis de radiocarbono, isótopos estables, iones mayores y elementos traza; así mismo se señala si la muestra fue adquirida durante un ensayo de bombeo, la fecha y hora de adquisición, las revoluciones por minuto del motor durante la extracción de agua, el caudal obtenido, el nombre asignado a las muestras, el análisis al que fueron sometidas y el método utilizado.

Todas las muestras fueron enviadas para el análisis de iones mayores y elementos traza. Únicamente se mandaron a análisis de radiocarbono e isótopos estables la última muestra de julio y la última muestra de septiembre, ya que éstas eran las más representativas del agua de la formación al momento de su extracción.

³ En el caso en el que se tomaron varias muestras para un mismo caudal de bombeo, se seleccionaron las muestras que fueron tomadas antes de iniciar una nueva etapa de bombeo o antes de detener el bombeo.

Muestra tomada durante ensayo	Ensayo de bombeo	Fecha y hora	RPM	Caudal [L/s]	Nombre de la muestra de agua	Análisis realizado	Método de medición	Observaciones
No	-	25/07/2017 12:14	-	-	7	IM, ET	CI, ICP-OES	Muestra para ver la evolución hidrogeoquímica del pozo
No	-	25/07/2017 12:23	-	-	Tláhuac (7a)	IE, IM, ET	IRMS, CI, ICP-OES	Agua con la que se hizo lodo de perforación
No	-	30/07/2017 13:20	1400	36.05	SCT3A-8a	¹⁴ C, IE	AMS, IRMS	Muestra tomada previo al primer ensayo de bombeo
No	-	30/07/2017 16:05	1400	36.05	9a	IM, ET	CI, ICP-OES	Muestra tomada previo al primer ensayo de bombeo
Sí	4°	01/09/2017 23:21	1300	65.32	SC3MA-01	IM, ET	CI, ICP-OES	
Sí	4°	02/09/2017 08:38	1300	56.57	SC3MA-02	IM, ET	CI, ICP-OES	
Sí	4°	02/09/2017 17:20	1400	56.57	SC3MA-03	IM, ET	CI, ICP-OES	
Sí	4°	02/09/2017 23:20	1500	62.33	SC3MA-04	IM, ET	CI, ICP-OES	
Sí	4°	04/09/2017 02:00	1600	67.05	SC3MA-05	IM, ET	CI, ICP-OES	
Sí	4°	04/09/2017 07:53	1700	75.09	SC3MA-06	IM, ET	CI, ICP-OES	
Sí	4°	04/09/2017 12:00	1800	82.34	SC3MA-07	¹⁴ C, IE, IM, ET	AMS, IRMS, CI, ICP-OES	

Tabla 5. Muestras de agua y análisis realizados en el pozo SCT3A.

En esta tabla se encuentran las 10 muestras de agua enviadas a diferentes laboratorios para su análisis. A continuación, se enlista el significado de las abreviaturas presentes. En la columna "Análisis realizado": i) IE- isótopos estables, ii) IM- iones mayores, iii) ET- elementos traza, iv) ¹⁴C- carbono-14. En la columna "Método de medición": v) CI- cromatografía iónica, vi) ICP-OES- espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente, vii) IRMS- espectrometría de masas de relaciones isotópicas, viii) AMS- espectrometría de masas con aceleradores.

3.3.1 Cálculo del tiempo de residencia

Para determinar el modelo de corrección más adecuado para el carbono inorgánico disuelto se realizó lo siguiente:

- Revisar de los datos hidrogeoquímicos e isotópicos disponibles para las muestras de agua.
- Buscar y analizar los métodos existentes para la determinación del $^{14}\text{C}_0$ en el CID presente en el agua, con el fin de comprenderlos y verificar si se contaba con los datos necesarios para su utilización, ya que mientras menos datos se supongan, más confiable es el resultado.
- Realizar el diagrama de Han & Plummer (2016):
 - Asegurarse que los datos isotópicos estén des-normalizados.
 - Cálculo de los puntos A1, A, A2, O, M y M'' a partir de: i) la temperatura del agua leída con los sensores multiparamétricos, ii) la actividad de los bicarbonatos determinada a partir de los análisis hidrogeoquímicos, iii) actividad del dióxido de carbono acuoso determinada a partir de los bicarbonatos, constantes de equilibrio, pH y temperatura, iv) la composición isotópica del $\delta^{13}\text{C}$ en los minerales de carbonato sólidos = 0.8 ‰, propuesto por [Edmunds et al. \(2002\)](#), v) la composición isotópica del $\delta^{13}\text{C}$ en el CO_2 gaseoso del suelo = -26 ‰ ([Edmunds et al., 2002](#)), vi) composición isotópica del ^{14}C en el CO_2 gaseoso del suelo = 100 pMC ([Pearson y Hanshaw, 1970](#)), vii) la composición isotópica del ^{13}C en el CID leído en la muestra.
 - Ubicar las muestras en el diagrama de acuerdo al contenido de $\delta^{13}\text{C}$ (per mil) y ^{14}C (pMC). Con esto, se localiza en qué área del gráfico está la muestra y así se puede determinar el modelo. Para este trabajo se utilizó el modelo de Eichinger.
- Estimar $^{14}\text{C}_0$ con las [ecs. 19 y 20](#)
- Calcular el tiempo de residencia con la [ec. 18](#)



Capítulo 4

Resultados



En este capítulo se presentan y describen los resultados obtenidos al aplicar las diferentes metodologías expuestas en el capítulo tres: i) la calibración de la curva de la porosidad neutrón y la curva de porosidad calculada; ii) los registros geofísicos, una aproximación de la permeabilidad, las zonas propuestas donde se considera que hay circulación de agua de la formación hacia el pozo; iii) la curva resultante de la prueba de aforo y la simulada para la estimación de las propiedades hidráulicas de la formación, así como los parámetros hidráulicos estimados; iv) el balance iónico, la composición hidrogeoquímica de las muestras de agua del pozo SCT3A, mediante diagramas de Piper y Stiff, así como el cambio en la composición entre los meses de julio y septiembre; v) diagrama de Hann & Plummer construido, tiempo de residencia calculado, elevación de la infiltración, los contenidos de ^2H y ^{18}O y su comparación con la línea meteórica local.

4.1 Resultados de la interpretación de los registros geofísicos

Debido a la ausencia de curva NPHI en el pozo Santa Catarina 3A se procedió a calcular esta mediante la [ecuación 12](#) ($\phi = m \sqrt{\frac{a \cdot R_w}{S_w^n \cdot R_t}}$). Debido a la diferencia entre la curva de control (NPHI del pozo AO2B) y la curva calculada se modificaron el factor de tortuosidad (a) y el exponente de cementación (m) teniendo en cuenta ciertos rangos de resistividad como se muestra en la [tabla 6](#):

AT90			
	Límite de resistividad [Ohm · m]	a	m
1	≥ 3	0.5	1.4
2	2	0.25	1.5
3	0.570	0.2	1.8
4	0.557	0.2	1.25
5	0.555	0.2	2
6	0.540	0.25	2.2
7	< 0.540	0.35	2.7

Tabla 6. Valores empleados para calibración de registro de porosidad.

A continuación, se muestra la curva PHIC calculada (tomando en cuenta los valores de la [tabla 6](#)) para el pozo AO2B y la curva NPHI medida en el mismo pozo.

Calibración de porosidad con resistividad profunda Pozo Agrícola Oriental 2B

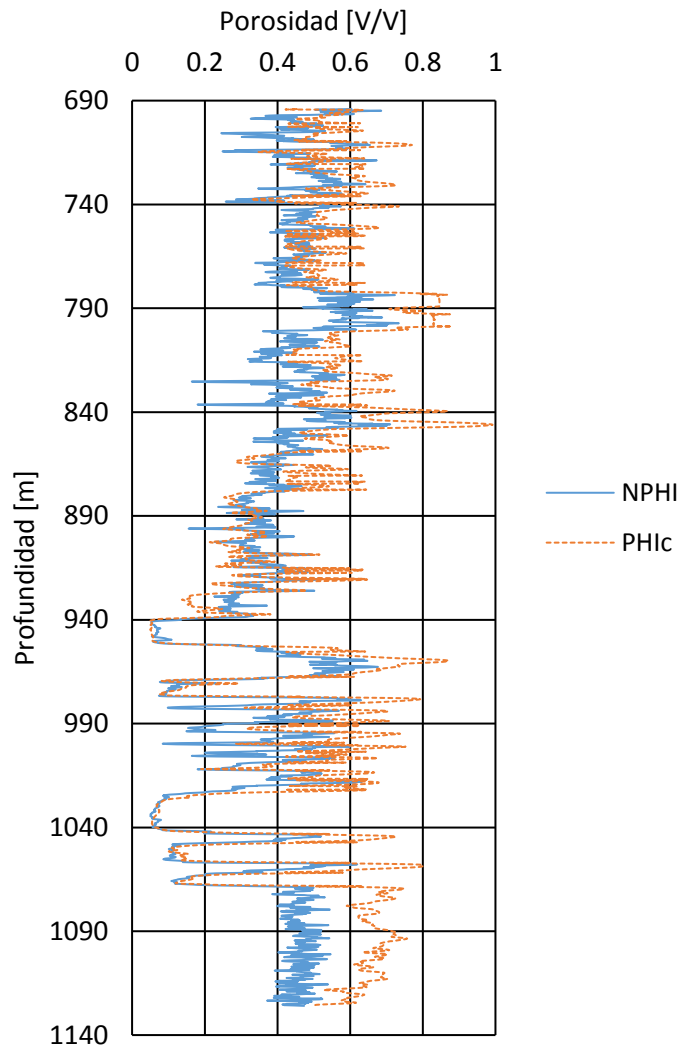


Figura 2. PH1c vs NPHI medida del pozo Agrícola Oriental 2B.

Se puede observar que la curva calculada tiene un comportamiento semejante a la curva observada; sin embargo, hay secciones en las que se sobreestima la porosidad neutrón, como en el tramo de 1068 a 1086 [m]. En la [tabla 7](#) se muestra el error existente entre la curva calculada y la medida.

Error absoluto de la calibración		
Min	Max	Media
5.17E-05	0.449	0.116

Tabla 7. Error en la calibración

Porosidad calculada. Primera etapa. Santa Catarina 3a.

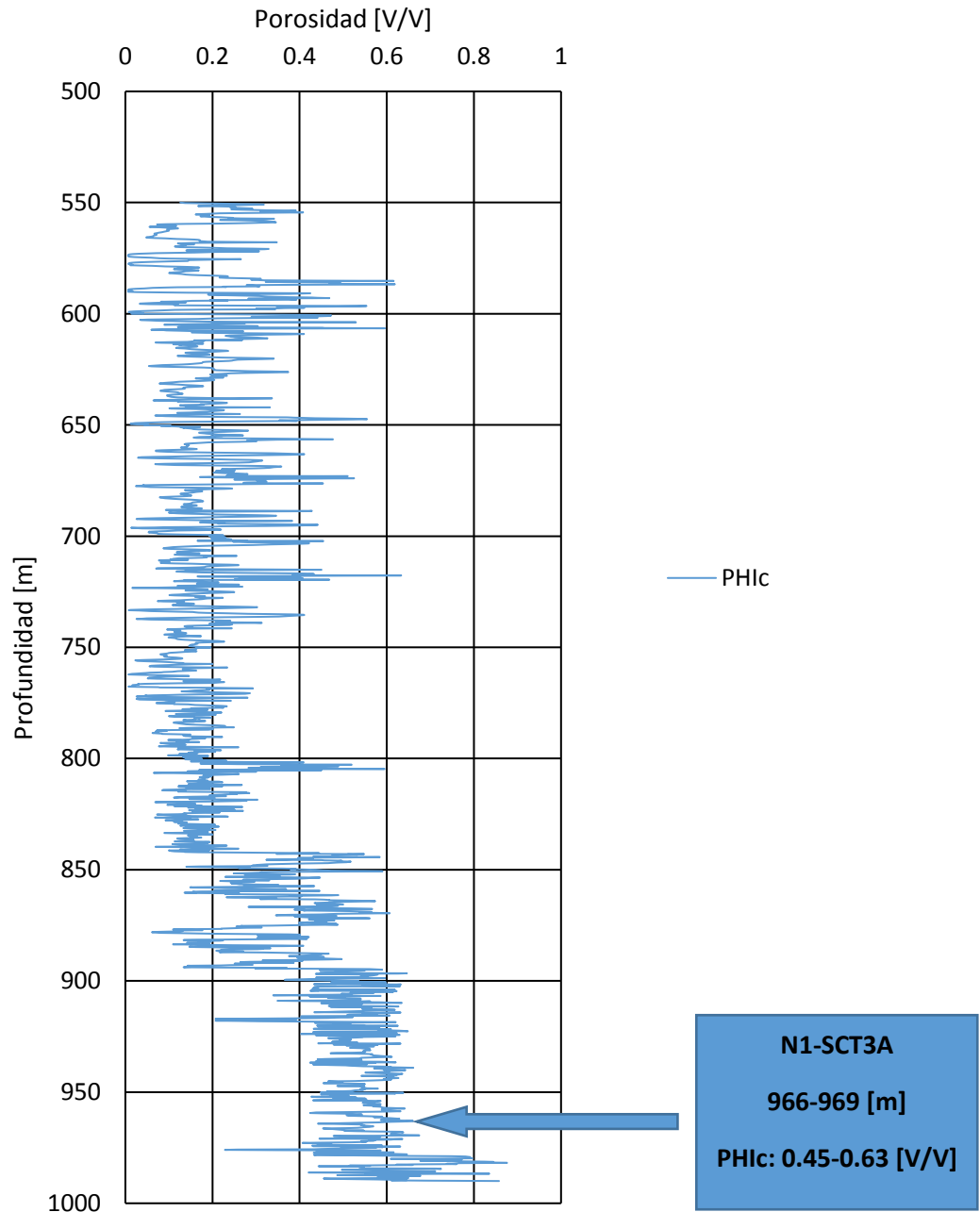


Figura 3. NPHI calculada para Santa Catarina 3A. Primera etapa.

La curva de NPHI calculada a partir de la resistividad profunda (AT90) del pozo Santa Catarina 3A y de los valores de la [tabla 6](#), presenta valores de 0.63 a 87.61 [%] en el intervalo de 550 a 990 [m].

**Porosidad calculada. Segunda etapa.
Santa Catarina 3a.**

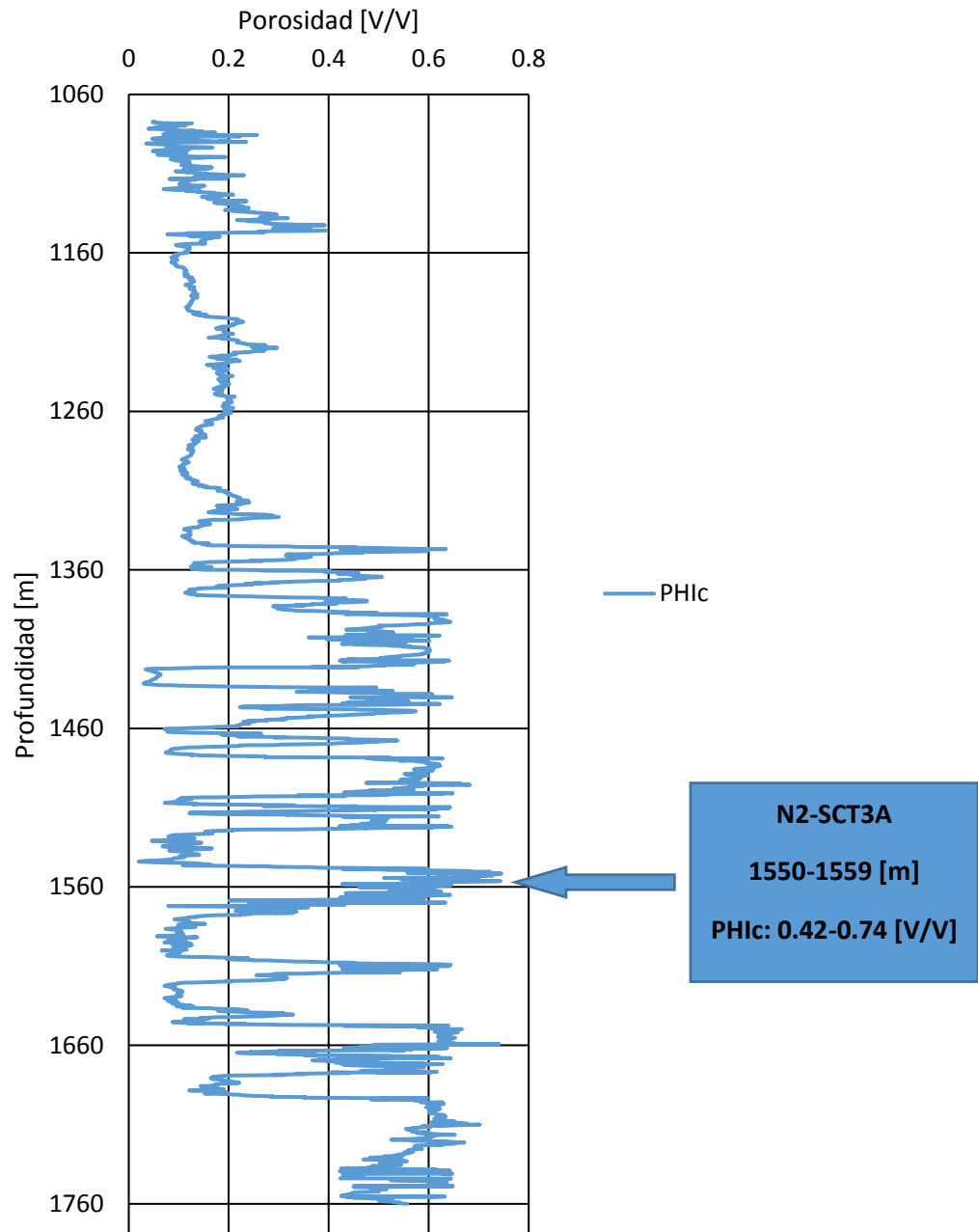


Figura 4. NPHI calculada para Santa Catarina 3A. Segunda etapa.

La curva de NPHI calculada a partir de la resistividad profunda (AT90) del pozo Santa Catarina 3A y de los valores de la [tabla 6](#), presenta valores de 1.97 a 74.55 [%] en el intervalo de 1077a 1760 [m].

Durante la perforación del pozo Santa Catarina 3A y del pozo Agrícola Oriental 2B se obtuvieron núcleos a diferentes profundidades, algunos fueron enviados al Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) en donde se midieron, entre otras propiedades físicas, la densidad, porosidad y permeabilidad al gas.

La curva de porosidad (PHI_c) calculada se calibró utilizando el tramo de la curva NPHI, que va de los 690 a los 1140 [m], medida en el pozo AO2B. Uno de los núcleos analizados en el INEEL fue obtenido a una profundidad entre los 913.79 y 913.92 [m], es decir, este núcleo se extrajo del rango de profundidades en los cuales se realizó la calibración. La porosidad medida en laboratorio, para este núcleo, fue de 28.7 [%]. Analizando la curva NPHI medida, en la misma profundidad de la cual se extrajo el núcleo, se tiene un valor promedio de porosidad de 42.05 [%], mientras que la curva PHI_c calculada, tiene un valor promedio de 27.6 [%]. De acuerdo a estos valores, la porosidad calculada se aproxima más a la porosidad medida en laboratorio, que la porosidad medida con el registro geofísico.

Lo anterior puede ser indicativo de que la calibración se realizó de manera adecuada; sin embargo, se debe ser cuidadoso con este cálculo y su interpretación, ya que para tener una mayor certeza se debe realizar esta comparación de valores de porosidad en más núcleos.

Una vez obtenidos los parámetros de calibración a partir del pozo AO2B, se calculó la curva de porosidad NPHI para el pozo SCT3A, en este último se obtuvo un núcleo entre los 1556.7 y 1156.85 [m]. La porosidad medida en laboratorio para este núcleo fue de 20.6 [%], mientras que la porosidad promedio calculada, para esa misma profundidad, fue de 67.75 [%].

A pesar de que la calibración se haya realizado en una litología similar a la encontrada en el pozo SCT3A, las propiedades físicas (temperatura, densidad, resistividad, etc.) no son las mismas en ambas formaciones, por lo cual es posible que se presente esta discrepancia de 40 [%] aproximadamente.

Los registros geofísicos se presentan de la siguiente manera:

- Carril uno: Profundidad [m]
- Carril dos: Registros de correlación (Rayos Gamma [API], Potencial espontáneo [mV])
- Carril tres: Diámetro del agujero [in]
- Carril cuatro: Resistividad [Ohm · m]
- Carril cinco: Volumen de arcilla [Dec]
- Carril seis: Porosidad [V/V]
- Carril siete: Aproximación de la permeabilidad [mD]
- Carril ocho: Facies

Con el fin de determinar las facies presentes en el pozo se realizó un análisis de grupos para clasificar estratos con propiedades físicas similares. Para el registro R2-SC3, al cual se hará referencia como primera etapa, se utilizaron recortes de perforación ([Anexo 1](#)) con los cuales se corroboraron algunos contactos litológicos, y se identificaron zonas de alteración, así como roca sana.

La primera etapa se midió de los 550 a los 990 [m]. El registro de rayos gamma (GR) va de 23.404 – 92.31 [GAPI]. El potencial espontáneo (SP) tiene una media de -169.65 [mV]. En esta etapa se perforó con una barrena de 17 [in], en la curva de diámetro del agujero (HDAR) se pueden observar zonas en las que el diámetro es mayor, alcanzando hasta las 31 [in]. Por otra parte, las curvas de resistividad AT10 y AT20 (cuya profundidad de investigación es menor a las otras curvas de resistividad) no fueron de utilidad para

el análisis en ciertos intervalos, ya que había derrumbe de las paredes del pozo y la herramienta no fue capaz de medir resistividades correspondientes a la formación para estas curvas, por lo que se decidió emplear las curvas AT90 (cuyos valores oscilan entre 0.76 y 1960 [Ohm · m]) y AT60 (cuyos valores van de 0.73 a 99.61 [Ohm · m]) en lugar de las AT10 y AT20. Adicionalmente, para determinar los intervalos con propiedades físicas similares, se utilizaron las curvas de (SP), (GR), AT60 y AT30.

En esta etapa se utilizaron las curvas GR, AT90 y SP para calcular el volumen de arcilla. Las curvas de permeabilidad calculadas con los modelos de [Tixer](#), [Timur](#) y [Coates-Dumanoir](#) presentan un comportamiento y valores similares, que fluctúan entre 4.133×10^{-9} y 710 980 [mD] a diferencia de [Coates](#), la cual presenta valores entre 3.2408×10^{-10} y 32 462 [mD]. Se descarta la estimación con la ecuación de [Coates](#) para esta litología y este sitio en particular, debido a la discrepancia en los valores de permeabilidad calculados.

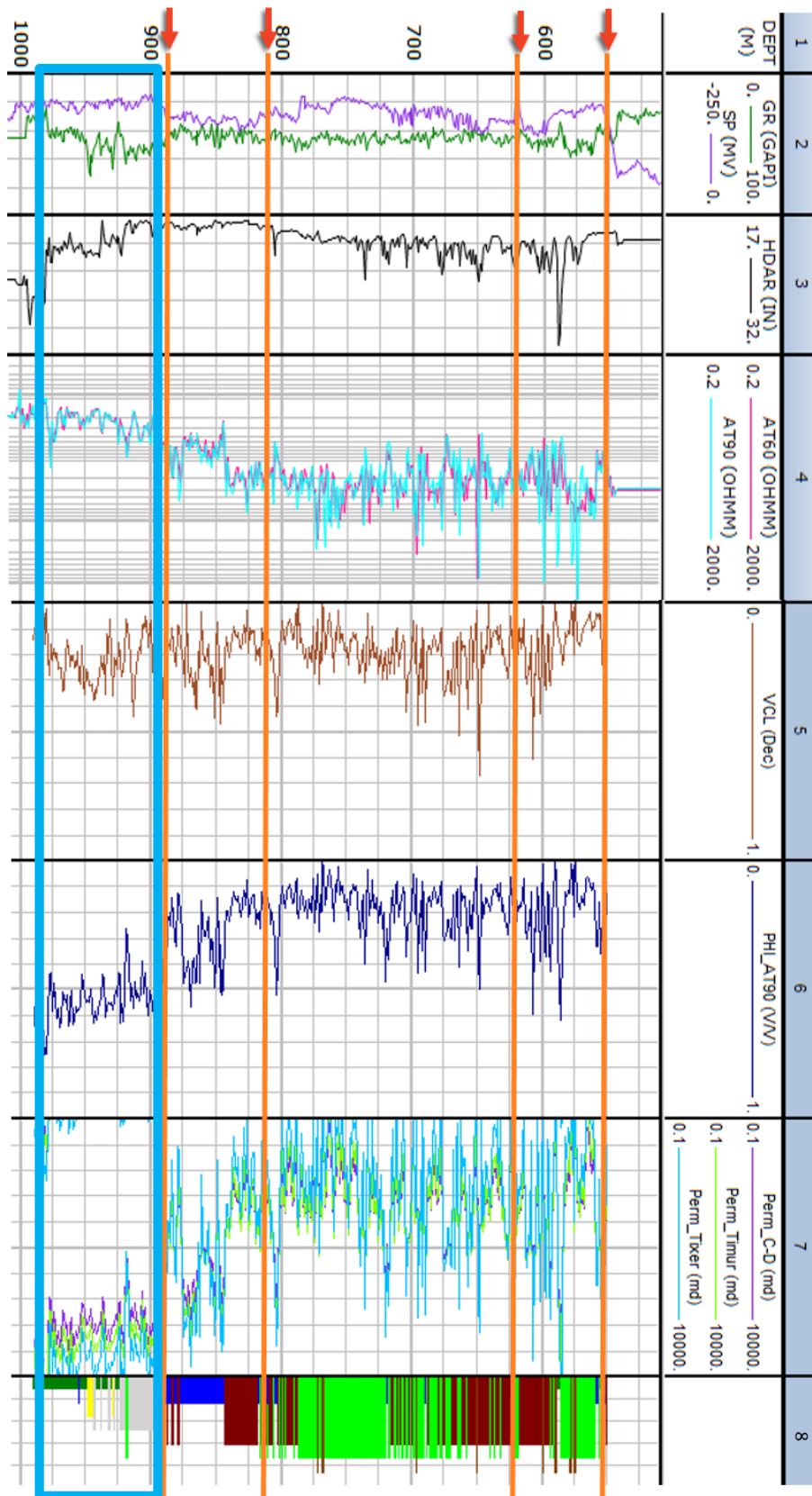


Figura 5. Registros geofísicos del pozo Santa Catarina 3A. Primera etapa. Se marcan con una línea anaranjada los contactos litológicos identificados. Se resalta en azul un estrato identificado como posiblemente saturado.

Realizando una inspección más detallada de los recortes o muestras de canal, recuperados en la primera etapa de perforación, se identificaron 6 contactos litológicos ([Anexo 1](#)). El primer contacto se ubicó a una profundidad de 547 [m], el segundo a 620 [m], el tercero a 820 [m], el cuarto a 880 [m], el quinto a 980 [m] y el sexto a 1040 [m]. En las curvas de los registros ([figura 5](#)), se marcan los contactos identificados. En la curva de Potencial espontáneo (SP) y en la del Diámetro de agujero (HDAR) se puede observar el contacto de los depósitos de lahar con las andesitas a los 547 [m], el cual se refleja como una disminución de los valores de ambas curvas. El contacto de 620 [m], se refleja en el SP como una disminución abrupta de sus valores que llega hasta -233 [mV]. En las curvas de resistividades hay una disminución en los valores, aproximadamente a los 820 [m], denotando así el contacto entre las andesitas y un bloque de ceniza. Las resistividades mayores a 2000 [Ohm m] probablemente se deben a que la herramienta de medición no estaba en contacto con la formación, esto se puede verificar observando la curva diámetro del agujero, la cual tiene valores mayores al diámetro de la barrena que es de 17 [in]. Posteriormente se observa otra disminución en los valores de resistividad a los 880 [m], los cuales coinciden con el contacto identificado en los recortes de perforación.

Continuando con el análisis de las curvas de resistividad, se puede apreciar un descenso conjunto de todas las curvas a una profundidad de 843 [m] y una disminución mayor en los 895 [m]. En las muestras de canal no se observa, a esta profundidad, un cambio de litología; así mismo, en las curvas SP, GR y HDAR no hay variación abrupta en su comportamiento. Lo anterior, podría indicar que el cambio en la resistividad no es debido a un cambio en la litología, sino a la presencia de agua en la formación, ya que las curvas de resistividad media, somera y profunda tiene un comportamiento similar, y valores de resistividad muy cercanos. A partir de los 843 hasta los 895 [m], las resistividades varían entre 2.12 y 81.6 [Ohm m]; de los 895 a los 1000 [m], las resistividades varían entre 0.93 y 29.5 [Ohm m], según [Orellana \(1985\)](#) la resistividad de las rocas ígneas saturadas varía entre 10^2 y 10^5 [Ohm m].

En los reportes de perforación de PEMEX indican que a partir de los 843 [m] hubo pérdida de circulación, es decir, el lodo de perforación se fue hacia la formación; aun cuando podría suponerse un estrato saturado a partir de los 843 [m] debido a las bajas resistividades, en la curva HDAR se observa que de 843-895 [m] es un estrato competente ya que hubo muy poco derrumbe de las paredes del pozo. En cambio, a partir de los 895 [m] la curva HDAR presenta diámetros que llegan hasta las 29 [in], este aumento en el diámetro nos indica una litología más deleznable ([figura 22](#) del [Anexo 2](#)) y probablemente más permeable, lo cual es consistente con las curvas de permeabilidad calculada ([figura 5](#), carril 7). Aunque en intervalos superiores también se derrumbó la pared del pozo, la curva de resistividad presenta separación de curvas entre la media y la profunda (con valores entre 9 y más de 200 [Ohm m]). En formaciones sedimentarias, cuando hay separación de las curvas de resistividad somera (media en este caso) y profunda, es un indicativo de una zona permeable ya que la infiltración del lodo de perforación (base agua) en la formación aumenta la conductividad, generando una diferencia entre ambas curvas. En el pozo SCT3A se tienen rocas ígneas por lo que no necesariamente la separación de curvas indica una zona permeable.

Bajo el supuesto de que a partir de los 895 [m] tenemos un estrato saturado se observa que los valores de resistividad medidos no coinciden con los indicados por Orellana; sin embargo, esto puede deberse a diferentes razones. Por ejemplo: la pérdida de circulación del lodo de perforación. Éste lodo está hecho con bentonita y otros solutos que lo hacen más conductivo. Si de manera natural, este es un estrato por el cual el agua circula con mayor facilidad, entonces al momento de la perforación, el lodo utilizado le fue más sencillo penetrar en la formación lo que generó la pérdida de circulación de lodo hacia la superficie. Debido a esto, al momento de correr el registro se midió la resistividad de la roca saturada

con la combinación del lodo y el agua de la formación, disminuyendo así el valor de la resistividad. Sumado a lo anterior, se debe tener en cuenta que las resistividades indicadas por [Orellana \(1985\)](#), corresponden a rocas ígneas, pero en este pozo se identificaron (en esta profundidad) depósitos de ceniza, ignimbrita y depósitos de lahar que, aunque tiene un origen volcánico su proceso de formación difiere al de una roca ígnea intrusiva o extrusiva, lo cual modifica sus propiedades físicas.

El contacto, observado en los recortes de perforación, entre la ceniza y la ignimbrita en los 880 [m], se ve reflejado en las curvas de resistividad a una profundidad de 875 [m] como un aumento en la resistividad y posteriormente una disminución en el rango de variación de la misma. Por otra parte, los depósitos de lahar que inician a los 980 [m], se evidencian en la curva HDAR como un aumento en el diámetro del pozo, indicando así que estos depósitos son menos competentes que la ignimbrita encontrada antes de los 980 [m]. Finalmente, en ninguna de las curvas del registro, fue posible identificar la lava de composición andesítica alterada que se observa en los recortes de perforación a los 1040 [m].

Para el registro R3-SC3, al cual se hará referencia como segunda etapa, no se cuenta con recortes de perforación ya que hubo pérdida de circulación en el pozo (reportado por PEMEX); tampoco se tiene curva de potencial espontáneo.

Para la segunda etapa, el análisis se hizo de 1077 a los 1760 [m]. El registro de rayos gamma (GR) va de 13.3 – 76.1 [GAPI]. En esta etapa se perforó con una barrena de 13 3/8 [in]. En la curva de diámetro del agujero (HDAR) se pueden observar zonas en las que el diámetro es mayor, alcanzando hasta las 25.8 [in]; sin embargo, hay intervalos en los que el diámetro es menor al de la barrena (hasta 9.61 [in]). Por otra parte, las curvas de resistividad AT10 y AT20 registraron valores menores a las curvas AT30, AT60 y AT90; sin embargo, en ciertos intervalos la curva de resistividad somera (AT20) es mayor que la de resistividad profunda (AT90). En el segmento de 1478 a 1502 [m] se observa este comportamiento y al analizar la curva HDAR a esta profundidad, se tiene valores de diámetro mayores a los de la barrena. En el tramo de 1515 a 1599 [m] AT20 también es mayor a AT90 y el diámetro del agujero varía entre 13.5 y 20.4 [in]. Las curvas AT60 y AT90 presentan un comportamiento semejante a lo largo del pozo, al igual que la curva AT30, con excepción del intervalo entre 1421 y 1433 [m], donde AT30 es menor y el intervalo 1526 a 1590 [m], donde es mayor.

Para determinar los intervalos con propiedades físicas similares, se utilizaron las curvas AT20, AT30, AT90, HDAR, HSGR, HTHO, HURA, HFK. Para los contrastes laterales de resistividad se utilizaron las curvas AT10 y AT90. En esta etapa se utilizaron las curvas GR, AT90 y SP para calcular el volumen de arcilla. Las curvas de permeabilidad calculadas con los modelos de [Tixer](#), [Timur](#) y [Coates-Dumanoir](#) presentan un comportamiento y valores similares, que fluctúan entre 3.8×10^{-6} y 34 095 [mD] a diferencia de [Coates](#), la cual presenta valores entre 0 y 2092 [mD]. Se descarta la estimación con la ecuación de [Coates](#) para esta litología y este sitio en particular, debido a la discrepancia en los valores de permeabilidad calculados.

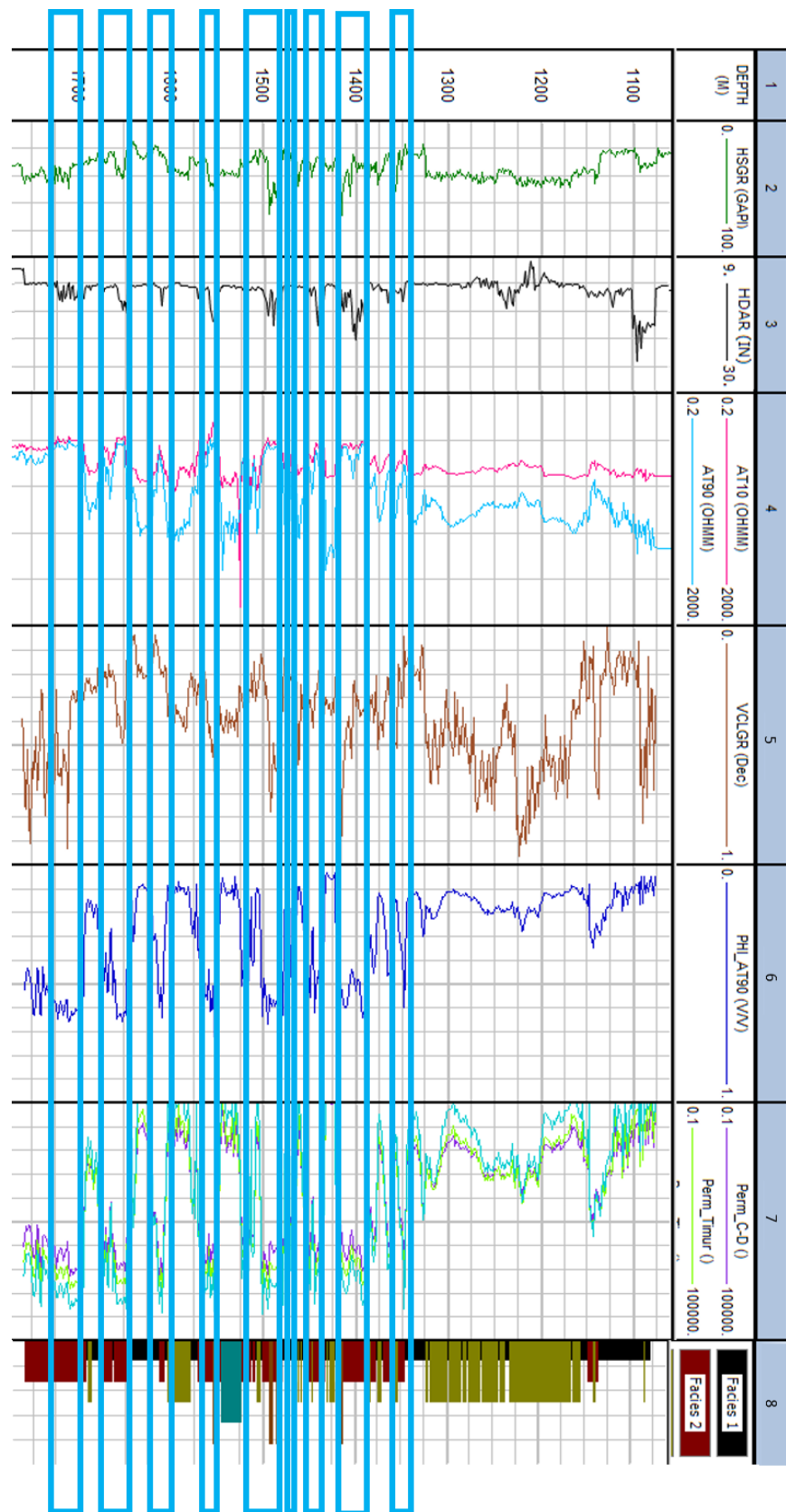


Figura 6. Registros geofísicos del pozo Santa Catarina 3A. Segunda etapa. Se resaltan las zonas con aporte de agua.

Al analizar la segunda etapa de los registros de resistividad, se pueden apreciar diferentes comportamientos entre las curvas de resistividad somera (AT10) y profunda (AT90), es decir hay segmentos en los que las curvas se juntan y en otros se separan. De acuerdo a los reportes de perforación de PEMEX, a partir de los 1067 [m] hubo pérdida total de la circulación del lodo de perforación; dicho comportamiento es indicativo de presencia de fracturas o estructuras por las cuales fluyó el lodo.

Con el objetivo de determinar las zonas en las que hay circulación de agua de la formación hacia el agujero, se analizaron los registros de resistividad poniendo especial atención en donde se juntan las curvas de resistividad somera y profunda, ya que se considera que, si la formación está saturada con agua, se tendría aproximadamente la misma resistividad en las diferentes profundidades de investigación. En los segmentos donde no hay separación de curvas, se registraron resistividades entre 0.62 y 64.7 [Ohm m], la resistividad del agua de formación medida fue de 3.27 [ohm m]. Este rango de resistividades medidas pueden deberse a que la roca estaba saturada con agua de la formación, pero debe tomarse en cuenta que esta muestra de agua fue obtenida meses después de correr el registro geofísico. Dado lo anterior es probable que las resistividades menores a 3.27 [Ohm m] se deban a presencia del lodo de perforación en la formación, a cambios en la concentración de sólidos totales disueltos en el agua y/o a la variación en la composición de las rocas de la formación, como se mencionó anteriormente.

En la siguiente tabla se muestran los intervalos de profundidad y la variación de la resistividad, en los cuales se considera que ocurre circulación de agua de la formación hacia el pozo:

Intervalo de profundidad [m]	Resistividad [Ohm m]
1346 -1349	2.8 - 5.4
1360 - 1366	3.8 - 6
1376 - 1421	1.5 – 34.6
1434 - 1450	1.89 - 7.54
1466 - 1470	3.55 - 5.25
1478 - 1523	1.13 - 64.7
1548 - 1572	0.62 - 5.7
1604 - 1619	1.35 – 17.5
1637 - 1642	6.46 - 18.2
1647 - 1678	1.12 - 13.7
1694 - 1767	1.15 - 4.61

Tabla 8. Estratos propuestos en los que se supone aporte de agua de la formación hacia el pozo.

En los intervalos de profundidad propuestos en la [tabla 8](#), la curva de porosidad calculada presenta valores que van de los 0.42 a los 0.69 [V/V] ([figura 6](#)). De acuerdo a [Sanders \(1998\)](#), la porosidad de las rocas ígneas fracturadas varía entre 0.01 y .1 [V/V]. Es evidente que la porosidad calculada está sobreestimada, ya que los valores obtenidos corresponden a arcillas. Es probable que en algunos estratos existan arcillas generadas a partir de la alteración de las rocas ígneas; sin embargo, éstos estarían presentes sólo en ciertas profundidades y no en todo el registro. Debido a esto, a pesar de que se tuvo una buena aproximación en el cálculo de la curva de calibración, los valores de porosidad calculada para el pozo SCT3A deben tomarse con reservas. Probablemente un mejor ajuste en la calibración arroje valores más confiables.

En estas mismas profundidades ([tabla 8](#)), las curvas de aproximación de la permeabilidad varían entre 122 – 13 710 [mD] ([figura 6](#)), es de esperar que al tener valores altos de porosidad se estime una permeabilidad alta, ya que de acuerdo a las [ecs. 3 a 6](#), estos parámetros son directamente proporcionales. A pesar de que la porosidad sea alta, la permeabilidad no siempre lo es, ya que puede no existir interconexión entre los espacios vacíos. Considerando la presencia de rocas ígneas, se infiere que, en los intervalos anteriormente mencionados, hay circulación de agua debido a la presencia de fracturas. Esta inferencia se refuerza considerando que la permeabilidad de las rocas ígneas fracturadas varía entre 1 y 10 000 [mD] ([Freeze & Cherry, 1979](#)) y los valores de permeabilidad obtenidos a partir de los diferentes modelos, son muy próximos a este rango.

Respecto a la curva de diámetro del pozo (HDAR), hay intervalos en los que ocurrió derrumbe, es decir, el diámetro del pozo es mayor al de la barrena. Al comparar este comportamiento con las curvas de resistividad, es evidente que los derrumbes coinciden, en su mayoría, con las zonas donde las curvas de resistividad se juntan, lo que refuerza la suposición de que en estas profundidades existen fracturas a través de las cuales circula el agua de la formación hacia el pozo, las cuales generaron también mayor facilidad de la roca para derrumbarse. Adicionalmente, el núcleo N2-SC3a, obtenido entre 1550 – 1559, presenta una fractura rellena con material hidrotermal, estas profundidades se encuentran dentro del rango de intervalos propuestos que aportan agua. Este núcleo fue identificado como depósitos de lahar ([Arce et al., 2019](#)), por lo que la facies 2, identificada en la segunda etapa de los registros geofísicos, puede ser denominada como depósitos de lahar.

Después del análisis de los registros se consideran como intervalos saturados de 895 a 990 [m] y de 1346 a 1767 [m] (en los intervalos mostrados en la [tabla 8](#)); sin embargo, la tubería ranurada se encuentra a partir de los 1168.31 [m], por lo que se presume que el agua que se está extrayendo del pozo proviene a partir de los 1346 [m] aproximadamente.

4.2 Determinación de parámetros hidráulicos

Para determinar los parámetros hidráulicos, se empleó la prueba de aforo del 1 al 4 de septiembre del 2017, la cual inició el 1 de septiembre a las 21:10 hrs. y terminó el 4 de septiembre a las 12:25 hrs. ([Anexo 3](#)). En dicha prueba se tuvieron 2 recuperaciones y 8 escalones ([figura 8](#)). Con el fin de determinar la transmisividad se empleó el primer intervalo de recuperación, el cual tuvo una duración de casi 3 horas, de las 9:10 – 11:57 hrs. del 2 de septiembre. Pevio a la recuperación se registró un caudal de 57.9 [L/s].

A continuación, se presentan la gráfica de abatimiento residual vs tiempo, la cual fue auxiliar para el cálculo de la transmisividad. De igual manera, se muestra la simulación de la prueba de aforo de septiembre ([figura 8](#)) así como los parámetros hidráulicos obtenidos a partir de su análisis ([tabla 9](#)).

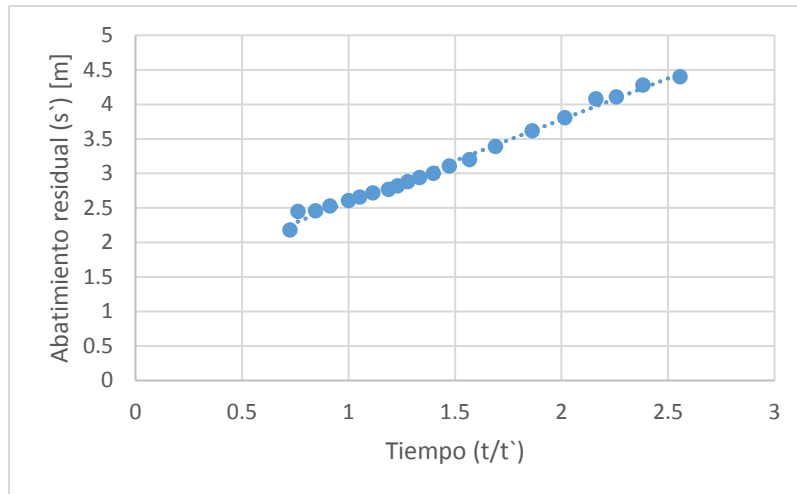


Figura 7. Gráfica de abatimiento residual Vs. tiempo.

La siguiente ecuación es el resultado del ajuste lineal a la gráfica de la [figura 7](#), obteniendo así una manera de calcular el abatimiento residual.

$$s' = 1.1929 \left(\frac{t}{t'} \right) + 1.3934 \quad (25)$$

Para determinar los parámetros hidráulicos de la formación de interés, se realizó una simulación en el software AQTESOLV®, donde se resolvió la ecuación modificada de Theis ([ec. 15](#)) con el método linealizado de Gauss-Newton. No fue posible utilizar el método de las derivadas del abatimiento para identificar los efectos de la geometría del flujo, ya que hubo fluctuaciones del caudal durante la prueba; dichas fluctuaciones fueron consecuencia de la utilización de un motor de combustión interna para operar la bomba con la que se realizó el aforo.

En la [tabla 9](#) se muestran los parámetros calculados mediante ecuaciones y la simulación en AQTESOLV©. Inicialmente, se encuentran los valores de abatimiento residual (s') con los cuales se calculó el cambio del mismo ($\Delta s'$). Para el caudal (Q) se utilizó el valor correspondiente al caudal extraído del pozo antes de detener el bombeo en la primera etapa de la prueba. En cuanto al cálculo de la transmisividad, se realizó a partir del primer ensayo de recuperación. Para el espesor (b) se tomó la longitud de tubería ranurada en el pozo. La conductividad hidráulica promedio (\bar{K}) se obtuvo al dividir la transmisividad entre el espesor (T/b). De acuerdo con [Domenico y Schwartz \(1998\)](#), la conductividad hidráulica de las rocas ígneas o metamórficas fracturadas varía entre 6.9×10^{-4} y 25.9 [m/día], como se observa en la [tabla 9](#), el valor calculado de (\bar{K}) se encuentra dentro del rango para rocas ígneas fracturadas, lo cual concuerda con los recortes de perforación.

Una vez calculados estos parámetros se realizó la simulación. En la [figura 8](#) se muestra el ajuste entre los datos medidos y los calculados. Los cuadrados negros indican los valores de abatimiento y recuperación medidos, línea azul representa el abatimiento y recuperación simulada.

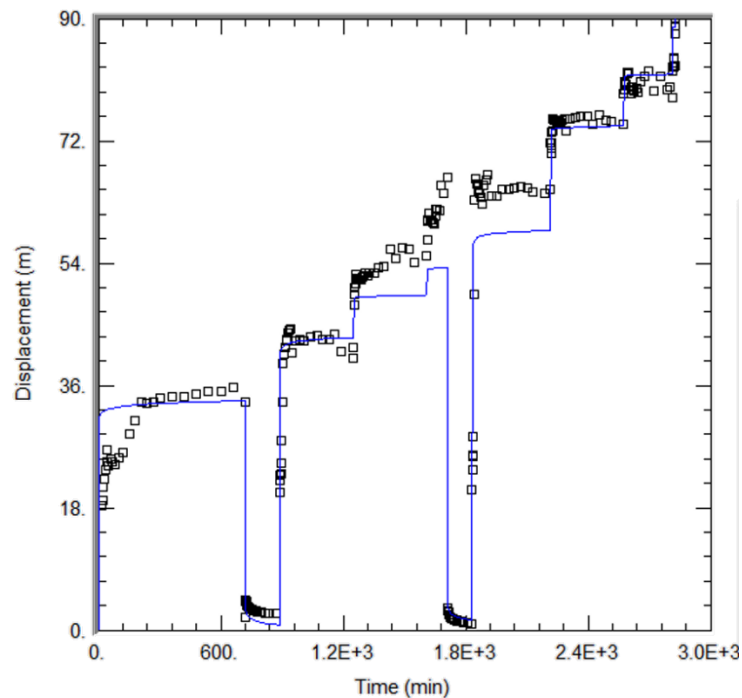


Figura 8. Simulación de la prueba de aforo de septiembre.

El almacenamiento (S), el factor de daño (S_w), el coeficiente de pérdidas de pozo (C) y el exponente de pérdidas no lineales (n) fueron determinados mediante regresión no lineal implementada por Duffield en el software AQTESOLV©. Inicialmente, se fijó el valor de la transmisividad y se calcularon los parámetros. Después de la primera regresión se fijó el valor de S para ajustar la curva calculada del aforo con la medida. Esta simulación se realizó hasta lograr el mejor ajuste de la curva simulada con la medida (la valoración del ajuste se realizó de manera visual). Así mismo se calculó un factor de daño de -5 , un factor negativo, de acuerdo a [Horne \(1995\)](#), indica que la conductividad hidráulica es mayor alrededor de la tubería del pozo en comparación a la de la formación. Este aumento en la conductividad hidráulica

puede deberse a fracturas existentes en la formación, fracturamiento hidráulico o al desarrollo del pozo. El coeficiente de pérdidas (C) también fue calculado mediante regresión lineal obteniéndose un valor de 3.11 [min^2/m^5], lo que acuerdo a [Walton \(1962\)](#), indicaría que el pozo tiene un deterioro severo o que está obstruido. El exponente de pérdidas calculado resultó de 2, como el propuesto por [Jacob \(1947\)](#). Finalmente, el almacenamiento específico promedio (\bar{S}_s) se calculó dividiendo el almacenamiento entre el espesor (S/b). El almacenamiento específico (\bar{S}_s) para rocas fisuradas, de acuerdo a [Batu \(1998\)](#), varía entre 6.9×10^{-5} y 3.3×10^{-6} . El \bar{S}_s calculado es de 3.11×10^{-6} [m^{-1}] y se encuentra dentro del rango que corresponde con las rocas fisuradas. Ambos resultados, tanto \bar{K} como \bar{S}_s arrojan resultados correspondientes con rocas ígneas fracturadas, lo que lleva a pensar que la estimación de parámetros se realizó de manera adecuada.

Al analizar los valores de C y S_w , se observa que corresponden con interpretaciones contrarias. Se realizaron varias simulaciones, obteniendo siempre resultados similares; sin embargo, el mejor ajuste que se pudo obtener conlleva asociado el error en estos parámetros, y como se observa en la [figura 8](#) el ajuste no es muy bueno en la cuarta y quinta etapa de bombeo (al centro de la figura). Se piensa que esta contradicción entre C y S_w está asociada a las variaciones del caudal durante el bombeo, es decir, los datos obtenidos en las pruebas de aforo tienen un error asociado debido a que el motor utilizado en la prueba no permitía tener un caudal constante. Esto se trató de subsanar en campo instalando un vertedor triangular para medir el caudal; sin embargo, ocurrieron problemas asociados a la instalación y no se pudo utilizar, por lo que para calcular el caudal se siguió leyendo la altura de la columna de agua del piezómetro (la cual no era constante) instalado en el tren de descarga.

Parámetro	Valor	Unidades
$s'1$	3.77	[m]
$s'2$	2.58	[m]
$\Delta s'$	1.19	[m]
Q	57.9	[L/s]
T	768.55	[$\text{m}^2/\text{día}$]
b	867.69	[m]
\bar{K}	0.885	[m/día]
S	0.0027	Adimensional
S_w	-5	Adimensional
C	3.1128	[min^2/m^5]
n	2	Adimensional
\bar{S}_s	3.11×10^{-6}	[m^{-1}]

Tabla 9. Parámetros hidráulicos del pozo Santa Catarina 3A.

4.3 Análisis hidrogeoquímico

En este apartado se presentan los resultados de la composición química e isotópica del agua del Pozo Santa Catarina 3A y del pozo Tláhuac, así como la interpretación hidrogeoquímica. Todas las muestras del pozo SCT3A corresponden a la misma profundidad (1168-1992 [m]). Los elementos mayores y elementos traza fueron analizados, respectivamente, en los laboratorios cromatografía y de espectroscopía atómica del Instituto de Geología. Para los elementos mayores, se analizaron muestras de 100 [ml] sin filtrar, mientras que para el análisis de elementos traza se analizaron muestras de 50 [ml], las cuales se filtraron (0.45 micras) y acidificaron (ácido nítrico). En el [Anexo 4](#) se presenta el procedimiento para la preparación de las muestras.

Es importante señalar, que el agua del pozo Tláhuac (200 [m] de profundidad) fue incluida en los análisis ya que con ésta se realizó el lodo de perforación del pozo y debido a que durante la perforación este fluido no regresó a la superficie (se quedó en el subsuelo), se consideró de importancia identificar si las muestras de agua obtenidas del pozo SCT3A corresponden al agua de la formación o si se encuentran “contaminadas” con agua del lodo de perforación.

En las [tablas 10](#) y [11](#) se presentan los resultados obtenidos de los análisis químicos para elementos mayores y traza.

Fecha y hora	Muestra	Concentración [mg/L]							
		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
21/07/2017 09:42	6	398.7	61.5	67.1	46.8	240	788.2	4.7	3.06
25/07/2017 12:14	7	379.8	55.8	62.1	43.2	234.5	757.3	4.9	4.2
30/07/2017 16:05	9a	357.2	51.7	58.4	42.3	219.1	706.1	6.9	3.3
01/09/2017 23:21	SC3MA-01	347.9	52.2	54.2	37.9	246.1	632.1	15.8	ND
02/09/2017 08:38	SC3MA-02	338.7	48.9	56.7	38.1	228.8	615.3	14.5	ND
02/09/2017 17:20	SC3MA-03	343.6	49.7	53.4	37.9	241.6	655.2	17.2	ND
02/09/2017 23:20	SC3MA-04	337.8	49.8	52.1	37.1	228.9	621.7	19.9	ND
04/09/2017 02:00	SC3MA-05	343.1	50.6	52.9	38.6	231.5	630.3	17.2	ND
04/09/2017 07:53	SC3MA-06	348.6	50.8	53.1	37.5	230.6	629.4	17.7	ND
04/09/2017 12:00	SC3MA-07	342.5	50.2	52.5	37.1	222.6	610.3	18.8	ND
25/07/2017 12:23	Tláhuac "7a"	82.6	9.05	19.6	27.7	233.3	91.7	2.03	3.1

Tabla 10. Resultados de los análisis químicos para elementos mayores y nitratos, de las muestras del pozo Tláhuac y Santa Catarina 3A para los meses de julio y septiembre.
(ND= no detectado)

Fecha y hora	Muestra	Concentración [mg/L]						
		As	Fe	Cu	Zn	Ba	Al	Mn
21/07/2017 09:42	6	0.031	0.24	0.24	0.014	1.03	0.04	0.39
25/07/2017 12:14	7	0.030	0.15	0.06	0.027	0.87	0.01	0.23
30/07/2017 16:05	9a	0.031	0.26	0.07	0.012	0.82	0.04	0.49
01/09/2017 23:21	SC3MA-01	0.045	0.07	0.009	0.009	0.7	0.05	0.30
02/09/2017 08:38	SC3MA-02	0.049	0.41	0.04	0.009	0.68	0.03	0.33
02/09/2017 17:20	SC3MA-03	0.052	0.35	0.04	0.008	0.67	0.01	0.33
02/09/2017 23:20	SC3MA-04	0.053	0.22	0.03	0.018	0.69	0.08	0.32
04/09/2017 02:00	SC3MA-05	0.051	0.14	0.06	0.012	0.71	0.05	0.33
04/09/2017 07:53	SC3MA-06	0.055	0.30	0.02	0.014	0.73	0.25	0.33
04/09/2017 12:00	SC3MA-07	0.051	0.23	<LOD	0.014	0.71	0.03	0.33
25/07/2017 12:23	Tláhuac "7a"	<LOD	0.13	0.01	0.02	0.06	0.01	0.2

Tabla 11. Resultados de los análisis químicos para elementos traza, de las muestras del pozo Tláhuac y Santa Catarina 3A para los meses de julio y septiembre.
(<LOD= menor al límite de detección)

En la [tabla 12](#) se muestran los límites permisibles de características químicas, en agua para uso y consumo humano, de elementos mayores y traza medidos en las muestras del pozo SCT3A y Tláhuac ([NOM-127-SSA1-1994](#)).

Característica	Límite permisible [mg/l]	Característica	Límite permisible [mg/l]
Na ⁺	200	As	0.025
K ⁺	s.l.m.p	Fe	0.3
Ca ²⁺ (Dureza total CaCO ₃)	500	Cu	2
Mg ²⁺ (Dureza total CaCO ₃)	500	Zn	5
HCO ₃ ⁻	-	Ba	0.7
Cl ⁻	250	Al	0.2
SO ₄ ²⁻	400	Mn	0.15
NO ₃ ⁻	10		

*Tabla 12. Límites permisibles de características químicas en el agua para uso y consumo humano según la NOM-127-SSA1-1994.
(s.l.m.p = sin límite máximo permisible)*

De acuerdo a estos límites permisibles, se puede observar en las [tablas 10](#) y [11](#) que para todas las muestras del pozo SCT3A, los valores de sodio (Na⁺) y cloruro (Cl⁻) están varias centenas arriba del límite, mientras que el arsénico (As) y el manganeso (Mn) están, máximo, un par de centésimas por encima del límite. Para el bario (Ba), las muestra 6, 7, 9a, SC3MA-01, SC3MA-05, SC3MA-06 y SC3MA-07, también superan el límite. Solamente la muestra SC3MA-06 supera el límite permisible de aluminio (Al). La muestra del pozo Tláhuac sólo excede el límite para el Mn, adicionalmente a diferencia del pozo Santa Catarina, tiene menor contenido de Ba y el As fue menor al límite detectable. Dado lo anterior es recomendable someter el agua del pozo SCT3A a tratamientos de potabilización antes de que sea introducida a la red de agua potable.

En los resultados presentados en la [tabla 10](#), salta a la vista la presencia de nitratos (NO₃⁻) en las muestras del pozo SCT3A, para el mes de julio, en un rango entre 3.063 y 4.2 [mg/l], mientras que, para las muestras de septiembre, éste no fue detectado. Así mismo, se detectaron 3.15 [mg/L] de NO₃⁻ en la muestra del pozo Tláhuac. A continuación se presentan tres gráficas en las cuales se observa la evolución en la concentración de iones sodio (Na⁺), potasio (K⁺), calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺), bicarbonato (HCO₃⁻), cloruro (Cl⁻), nitrato (NO₃⁻) y sulfato (SO₄²⁻) y elementos traza arsénico (As), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), bario (Ba), aluminio (Al) y manganeso (Mn), en el pozo SCT3A del 21 de julio al 4 de septiembre (sin muestras en agosto).

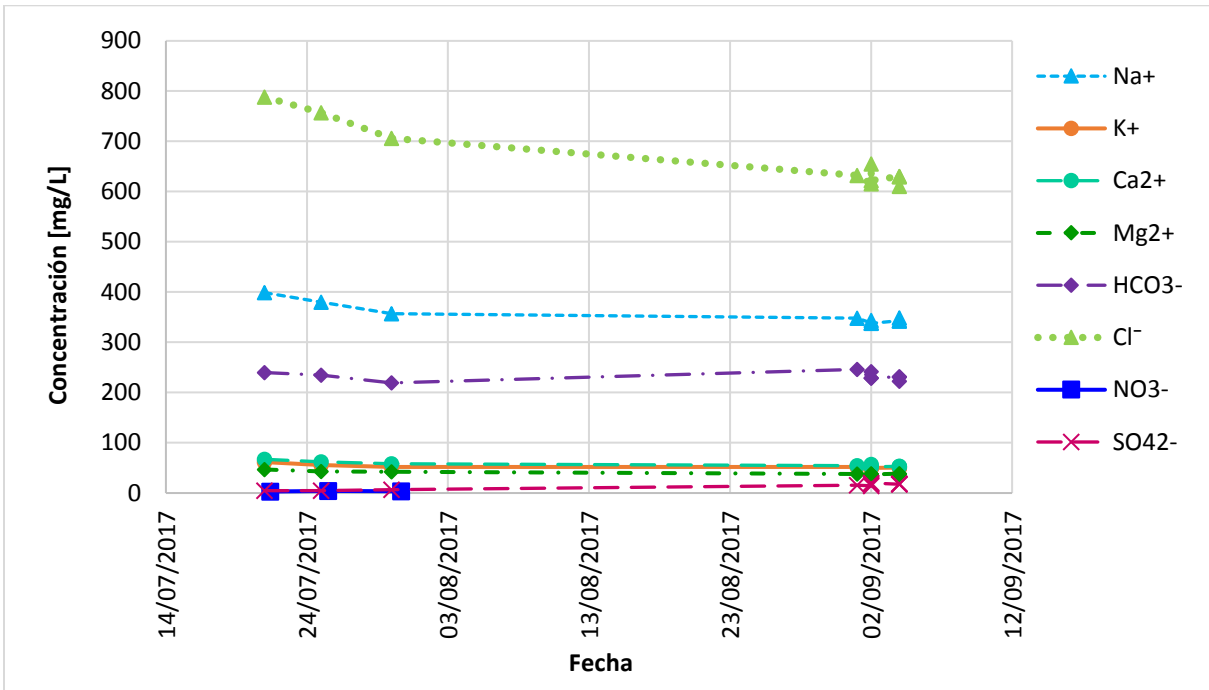


Figura 9. Gráfica de tiempo vs concentración de iones en la primera y tercera etapa de bombeo para el pozo Santa Catarina 3A.

En las gráficas de tiempo vs concentración de iones se puede observar que los iones cloruro, sodio y bicarbonato presentan una concentración mayor a 100 [mg/L] de julio a septiembre del 2017 y se aprecia una disminución de cloruro y sodio. A continuación, se muestra la misma gráfica, pero con el eje vertical en escala logarítmica para apreciar mejor las variaciones en la concentración de los iones con menor concentración.

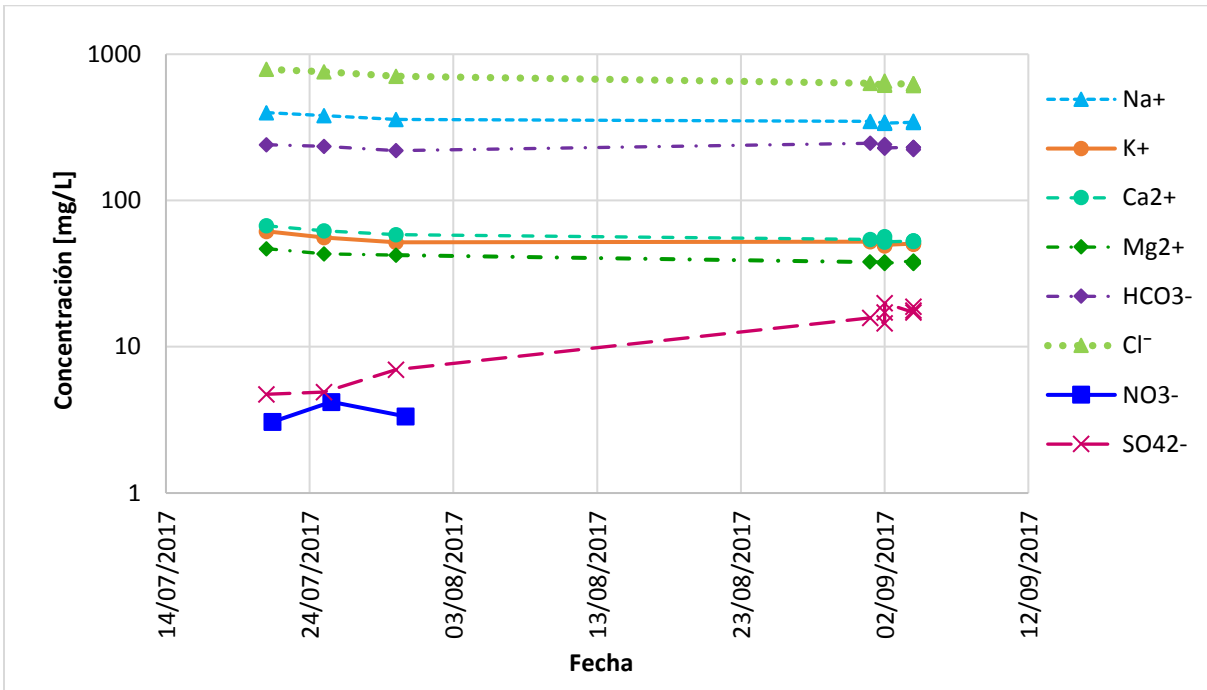


Figura 10. Gráfica de tiempo vs concentración en escala logarítmica de iones en la primera y tercera etapa de bombeo para el pozo Santa Catarina 3A.

Analizando ambas gráficas se observa una disminución en la concentración de cloruros de julio a septiembre, es probable que esto se deba a la presencia de lodo de perforación en la formación, ya que a este se le agregaron cloruros, de acuerdo a reportes de PEMEX. Las concentraciones de sodio, bicarbonato, calcio, potasio y magnesio permanecen casi constantes. En cuanto al sulfato, cuyo origen pueden ser los depósitos de yeso en fracturas o la oxidación de la pirita (Clark, 2015), se aprecia un aumento en su concentración. Finalmente, es notoria la presencia de nitratos en el mes de julio; sin embargo, en septiembre ya no fueron detectados. Estos nitratos también se encuentran en la muestra del pozo Tláhuac, cuya profundidad es de un par de cientos de metros, aproximadamente en el mismo rango de concentración. De acuerdo con Montiel Palma et al. (2014), los nitratos en el agua subterránea pueden relacionarse con procesos de consolidación de sedimentos, actividad volcánica o actividad antrópica (agricultura y excretas animales). La presencia de nitratos en muestras del pozo SCT3A, las cuales provienen de profundidades mayores a 1100 [m], indican que el agua con la que se realizó el lodo de perforación se mezcló con el agua de la formación y que después de continuar con el bombeo en julio y parte del mes de agosto, se pudieron conseguir, en septiembre, muestras más representativas del agua que circula en formaciones de gran profundidad.

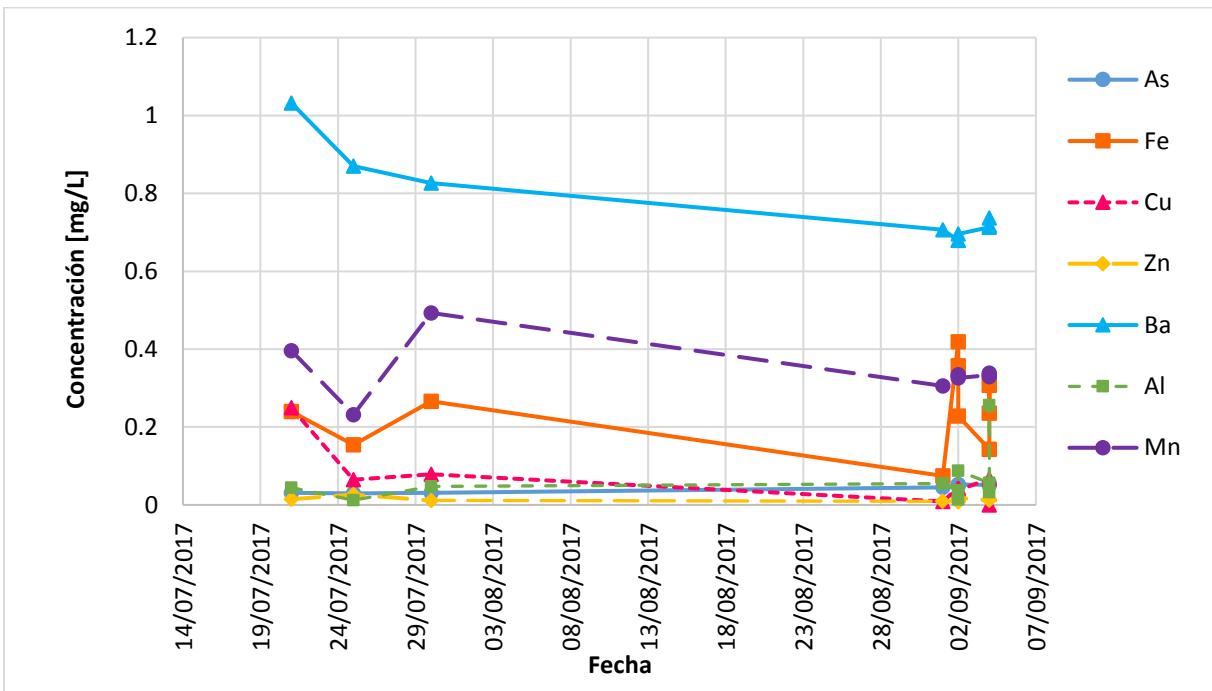


Figura 11. Gráfica de tiempo vs concentración de elementos traza en la primera y tercera etapa de bombeo para el pozo Santa Catarina 3A.

Al observar la gráfica de elementos traza se aprecia principalmente bario (el cual disminuye de julio a septiembre), seguido de manganeso y hierro. Se sospecha que el bario tiene un origen hidrotermal, mientras que el manganeso y el hierro pueden provenir de la disolución de minerales asociados a las rocas volcánicas por las que circula el agua, tales como biotita, anfíboles y piroxenos (Clark, 2015).

A continuación, en la [tabla 13](#), se indican los resultados del balance iónico para todas las muestras obtenidas del pozo Santa Catarina 3A, la muestra del pozo Tláhuac y la del San Lorenzo Tezonco (SLT). A partir de este punto se integra el pozo SLT al análisis hidrogeoquímico e isotópico, esto con fines comparativos, ya que es un pozo de 2008 [m] de profundidad y se desea analizar el comportamiento de este frente a las muestras del SCT3A cuya profundidad es de 1992 [m] proyectados verticalmente. Los datos del pozo SLT corresponden a los reportados en [Morales-Casique et al. \(2014\)](#).

Muestra de agua	Balance iónico [%]
SCT 3a-6	0.42
SCT 3a-7	1.58
SCT 3a-9a	1.01
SC3-MA-01	0.16
SC3-MA-02	1.19
SC3-MA-03	1.83
SC3-MA-04	0.24
SC3-MA-05	0.17
SC3-MA-06	0.61
SC3-MA-07	1.33
Tláhuac	4.29
San Lorenzo Tezonco	0.02

Tabla 13. Resultados del balance iónico.

*(*Nota: La muestra SCT 3a-8a fue enviada a análisis isotópicos y fue tomada el mismo día y al mismo caudal que la SCT 3a-9a)*

Los resultados del balance iónico son menores al 5%, lo cual es indicativo de que el análisis se llevó a cabo de manera adecuada y que los iones mayores son los predominantes en las muestras, por lo cual se pueden clasificar utilizando el diagrama de Piper y el diagrama de Stiff.

Dada la presencia de nitratos en las muestras de julio en el pozo SCT3A, se desea determinar, a través del diagrama de Piper, si la familia de agua a la que pertenecen las muestras de julio es la misma que la de las muestras de septiembre. Se comparan estas muestras con las del pozo Tláhuac y las de 26 pozos de [Edmunds et al. \(2002\)](#), cuyas profundidades varían entre 70 y 406 [m], esto con el fin de observar si existe alguna tendencia de las muestras de julio que sea similar a la de alguno de estos pozos de menor profundidad.

En la [figura 12](#) se muestra el diagrama de Piper con la información química de 37 muestras de agua, de las cuales 27 corresponden a pozos cuyas profundidades varían entre 70 y 406 [m] y 10 a las muestras del Pozo SCT3A (todas las muestras caen casi en el mismo lugar, quedando apiladas una encima de la otra, es por eso que sólo se aprecia un cuadro).

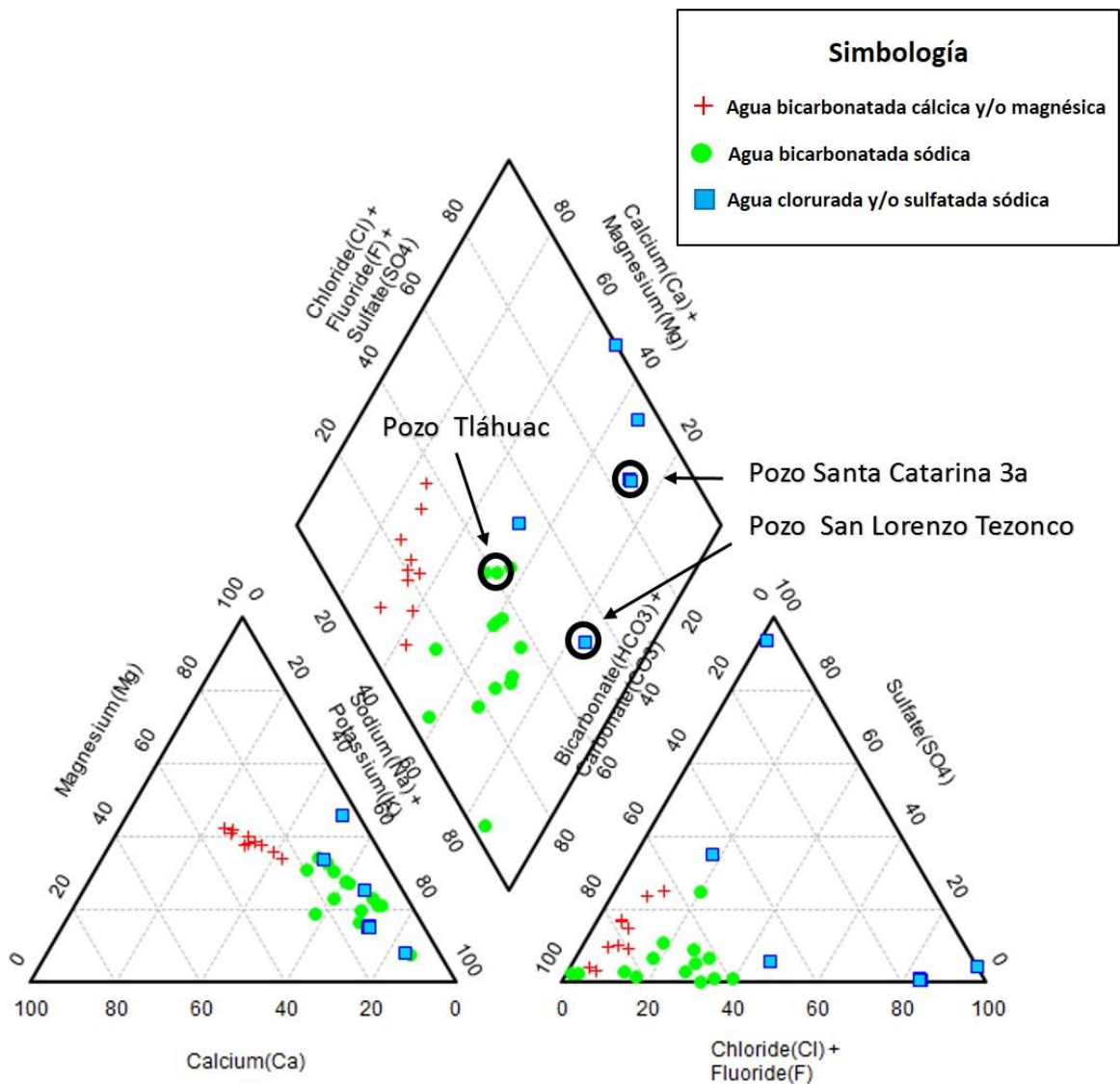


Figura 12. Diagrama de Piper.

Se presentan diferentes muestras de agua en la Cuenca de México. Las muestras encerradas en circunferencias negras pertenecen a los pozos Tláhuac, Santa Catarina 3A y San Lorenzo Tezonco. Las otras muestras pertenecen a las reportadas por Edmunds et al. (2002).

En cuanto al análisis hidrogeoquímico, en el diagrama de Piper se observa que 23 muestras de [Edmunds et al. \(2002\)](#) se pueden clasificar como agua bicarbonatada sódica, cálcica y/o magnésica. El agua del pozo Tláhuac se encuentra en la familia del agua bicarbonatada sódica a diferencia de la del pozo SCT3A y SLT que se encuentran en la familia de agua clorurada y/o sulfatada sódica. Igualmente se aprecia que 3 muestras de [Edmunds et al. \(2002\)](#) también se encuentran en el grupo de agua clorurada-sódica, lo cual puede deberse a que estos pozos se encuentren en zonas de descarga o a flujos ascendentes.

Es claro que, aunque los análisis químicos hayan evidenciado la mezcla de agua del pozo Tláhuac con la del SCT3A, esta mezcla no fue la suficiente como para modificar fuertemente su concentración de iones

mayores, ya que las 10 muestras del pozo SCT3A se encuentran en la misma familia. Esta diferencia entre el pozo Tláhuac y SCT3A también se ve reflejada en los diagramas de Stiff (figuras 13, 14 y 15) que se presentan a continuación.

Para la realización de estos diagramas se emplearon la muestra de agua del pozo Tláhuac, la última muestra de la prueba de aforo en julio (9a), la cual contenía nitratos y la última del ensayo de septiembre (SC3-MA-07). Se tomaron las últimas muestras de cada prueba de aforo ya que estas serían las más representativas del agua de la formación, al momento de ser recolectadas, dado del tiempo de bombeo transcurrido.

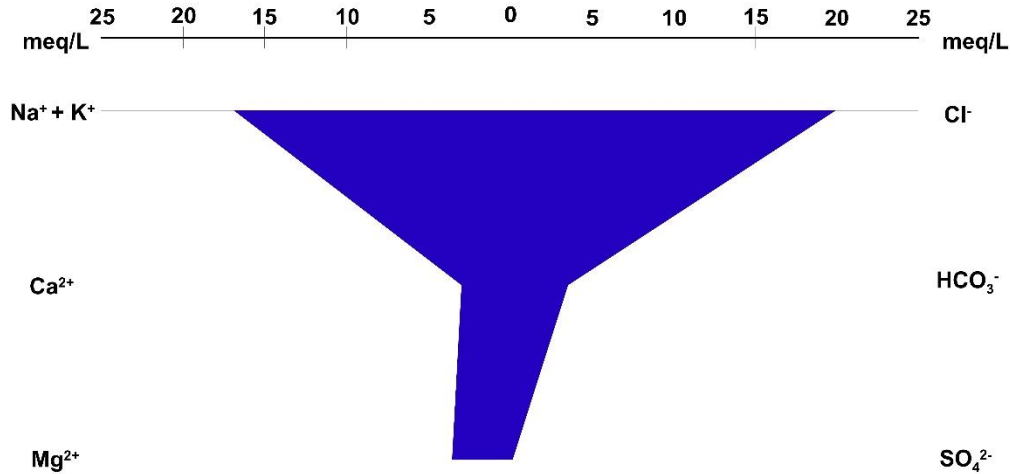


Figura 13. Diagrama de Stiff para la muestra 9a adquirida el 30 de julio del 2017 a las 16:05 hrs.

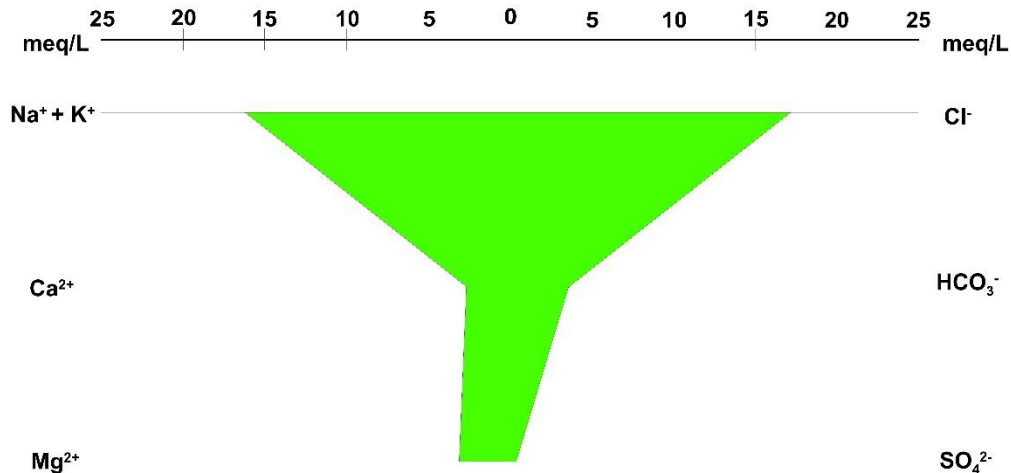


Figura 14. Diagrama de Stiff para la muestra SC3-MA-07 adquirida el 4 de septiembre del 2017 a las 12:00 hrs.

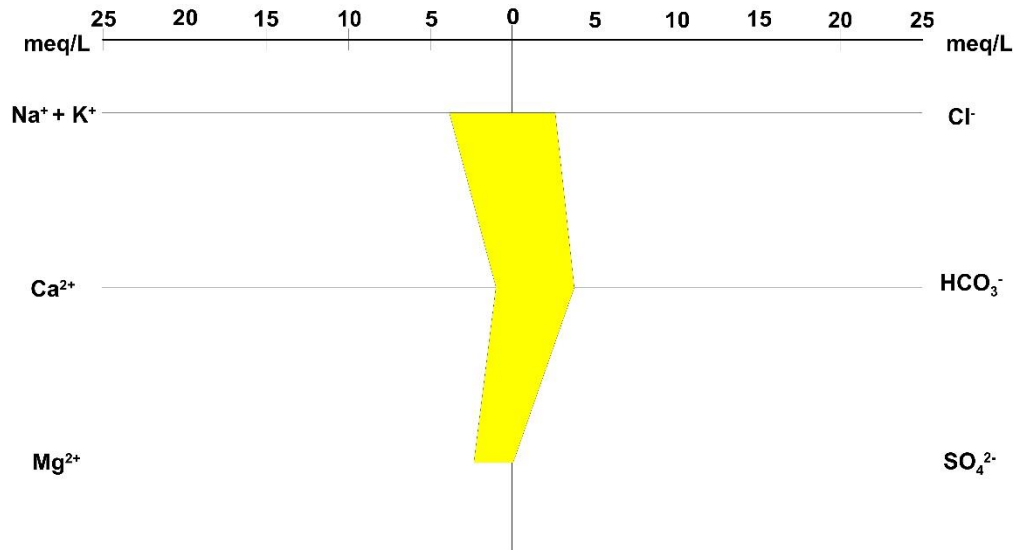


Figura 15. Diagrama de Stiff para la muestra 7a correspondiente al pozo Tláhuac adquirida el 25 de agosto del 2017 a las 12:23 hrs.

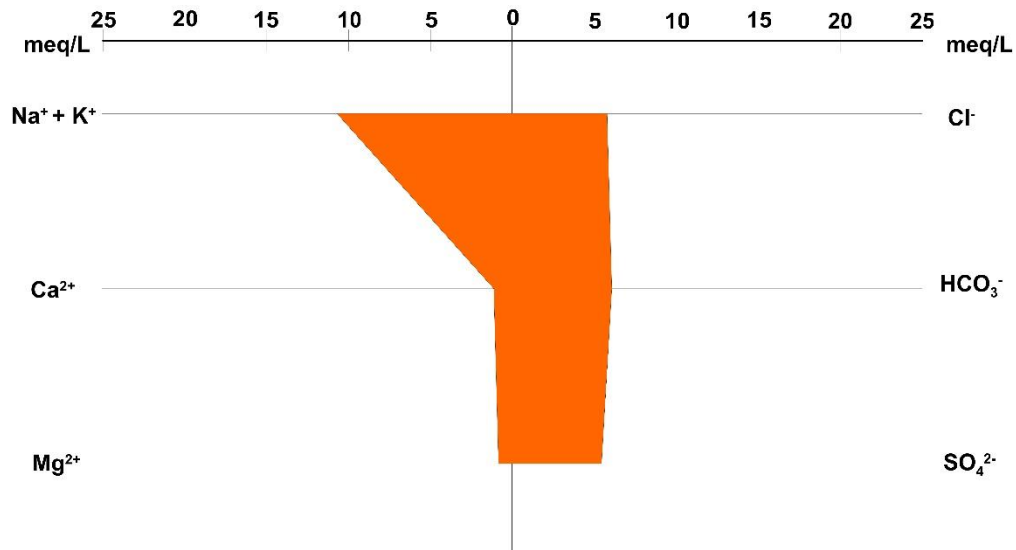


Figura 16. Diagrama de Stiff para la muestra del pozo San Lorenzo Tezonco.

Los diagramas de Stiff presentan una forma similar para las muestras de julio y septiembre del Pozo Santa Catarina 3A. Se pueden apreciar valores mayores a 15 [meq/L] de sodio y cloruro seguido de valores menores a 5 [meq/L] de magnesio, sulfato, calcio y bicarbonatos. Para la muestra del pozo Tláhuac el diagrama presenta una forma diferente, en la cual todos los iones presentan concentraciones menores a 5 [meq/L]. Si bien, el agua del lodo de perforación pudo haber aportado algunos compuestos (como nitratos) al agua de la formación, no es posible apreciar una gran influencia sobre los iones mayores ya que éstos se encuentran en menor concentración; sin embargo, no hay que perder de vista

que al lodo de perforación se le agregan diferentes sustancias para modificar su densidad, esto puede explicar el mayor contenido de cloruro y de sodio en julio.

En cuanto a la muestra del pozo SLT, se tiene un comportamiento similar (en los cationes) a las muestras del pozo SCT3A, es decir, altos contenidos de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, lo cual es consistente con agua que no es de reciente infiltración ([Clark, 2015](#)); sin embargo, se tiene casi la misma cantidad de Cl^- que de HCO_3^- , a diferencia del pozo SCT3A, el cual tiene altos contenidos de Cl^- . Comúnmente altos contenidos de cloruro se asocian a tiempos de residencia grandes, la diferencia en contenidos de cloruro entre estos dos pozos profundos, puede deberse a que el agua de ambos pozos ha circulado por formaciones diferentes.

La mezcla de agua del pozo Tláhuac con la de la formación de la cual se extrae el agua del pozo SCT3A, únicamente se ve evidenciada en los análisis hidrogeoquímicos. Los diagramas de Piper y Stiff fueron de ayuda para diferenciar el agua del pozo Tláhuac, presente en estratos más someros (200 [m] aproximadamente) del agua del pozo SCT3A, presente a mucho mayor profundidad (>1100[m]), estos pozos se encuentran a 150 [m] uno del otro.

4.4 Interpretación de las mediciones de isótopos estables e isótopos radiactivos

En esta sección se muestra el Diagrama de [Han & Plummer \(2016\)](#) construido para determinar el modelo de corrección más adecuado, para así calcular la edad del agua de los pozos SCT3A y SLT. Este diagrama es una compilación de diferentes métodos de corrección para el contenido inicial de CID; aunque no contiene todos los modelos existentes, es una buena herramienta para determinar de manera gráfica, un modelo de corrección.

Así mismo, podemos encontrar las tablas de resultados, donde se muestran los parámetros empleados para el cálculo del tiempo de residencia con diferentes modelos de corrección. En esta tesis se utilizó el modelo de Eichinger para la corrección de la actividad inicial del carbono y se realizó una comparación con el modelo de Pearson (ambos modelos suponen condiciones de sistema cerrado). Del mismo modo, se realizó la corrección con el modelo de la IAEA, el cual contempla que el agua estuvo en condiciones de sistema abierto (hasta alcanzar un equilibrio en el intercambio de carbono en la zona no saturada) y después en condiciones de sistema cerrado. Se utilizaron los tres modelos para la corrección de la actividad inicial del ^{14}C , con el fin de comparar los tiempos de residencia calculados.

Finalmente se presenta la información de isótopos estables de las muestras de agua, así como el cálculo de la elevación de la infiltración y el lugar que ocupan en la gráfica de la línea meteórica local dichas muestras. Para los análisis isotópicos se decidió utilizar las muestras recolectadas antes de finalizar los aforos de julio y de septiembre (SCT 3a-8a y SC3-MA-07), esto con el fin de tener una muestra representativa de la formación. También se utilizaron los resultados isotópicos del pozo San Lorenzo Tezonco con fines comparativos.

4.4.1 Información isotópica de las muestras analizadas

Las muestras SCT 3a-8A, SC3-MA-07 y Tláhuac "7a" fueron enviadas al laboratorio Beta Analytic© para realizar los análisis isotópicos de ^{13}C , ^{18}O y ^2H . Así mismo fueron analizadas para ^{14}C , a excepción de la muestra del pozo Tláhuac. En la [tabla 14](#) se muestran, para el pozo Santa Catarina 3A y el San Lorenzo Tezonco, las cantidades detectadas de ^2H , ^{18}O , contenido de ^{13}C y ^{14}C . En la columna de observaciones se especifica el método de detección para cada isótopo.

Isótopo	Unidad	Resultado SCT 3a-8a 30/07/2017 13:20	Resultado SC3-MA-07 04/09/2017 12:00	Resultado SLT 16/07/2013 8:00	Resultado Tláhuac 25/07/2017 12:23	Observaciones
$\delta^2\text{H}$	‰	-75.15	-73.6	-67.3	-71.12	Isotope Ratio Mass Spectrometer (IRMS)
$\delta^{18}\text{O}$	‰	-10.7	-10.6	-9.44	-10.33	Isotope Ratio Mass Spectrometer (IRMS)
$\delta^{13}\text{C}$ CID	‰	-5.4	-5.7	-5.8	-4.23	Isotope Ratio Mass Spectrometer (IRMS)
^{14}C CID	pMC	26.5	12.6	4.4	-	AMS(accelerator mass spectrometry)

Tabla 14. Composición isotópica de las muestras de agua del pozo San Lorenzo Tezonco y Santa Catarina 3A. (‰ = per mil, pMC= porcentaje de carbono moderno)

La cantidad de ^2H en el pozo Santa Catarina 3A disminuyó en 1.55 ‰ en el transcurso de julio a septiembre, mientras que el ^{18}O y ^{13}C se mantuvieron casi constantes; sin embargo, el carbono-14 disminuyó en 13.9 pMC. La desviación estándar del contenido de ^{14}C fue de 0.1 para todas las muestras.

[Clark y Fritz \(1997\)](#) indican que contenidos de ^{13}C cercanos a 0 [‰], corresponden con rocas carbonatadas. Dados los valores de ^{13}C en las muestras del pozo SCT3A y SLT, se sospecha que el agua recolectada en estos pozos, en algún momento circuló a través de las rocas carbonatadas que se encuentran por debajo de la unidad volcánica inferior ([figura 1](#)); sin embargo, el agua del pozo Tláhuac presenta valores de ^{13}C mayores, y ésta fue extraída de ± 200 [m] de profundidad, por lo que es probable que exista otra fuente de ^{13}C en estratos superficiales y los suelos.

4.4.2 Diagrama de Han & Plummer

El diagrama de [Han & Plummer \(2016\)](#) fue de utilidad para determinar el modelo de corrección con el cual se estimó la actividad inicial del ^{14}C . Una vez calculada esta se utilizó la [ec. 18](#) ($t = -\frac{5730}{\ln 2} \ln \frac{{}^{14}\text{C}_{CID}}{{}^{14}\text{C}_0}$) para determinar el tiempo de residencia del agua. Para la construcción de este diagrama ([figura 17](#)) fue necesario calcular los puntos A, A1, A2, O y M'', al punto M se le asignó un valor de 0.8‰, que representa los carbonatos sólidos en el suelo, este valor fue tomado de [Edmunds et al. \(2002\)](#), donde lo emplearon para el cálculo del tiempo de residencia en muestras de agua en la Ciudad de México.

El punto A representa el CO_2 gaseoso; fue calculado a partir del CO_2 gaseoso en equilibrio con el CO_2 disuelto presentes en el suelo ($\delta^{13}\text{C}_{a1}$) y el CO_2 disuelto respecto al CO_2 gaseoso ($\varepsilon_{a/g}$). El punto A1 representa el CO_2 acuoso o disuelto; fue calculado a partir del CO_2 gaseoso en el suelo ($\delta^{13}\text{C}_g$) y el CO_2 disuelto respecto al CO_2 gaseoso ($\varepsilon_{a/g}$). El punto A2 representa el HCO_3^- disuelto, en equilibrio con el CO_2 gaseoso del suelo; fue calculado a partir de CO_2 gaseoso en el suelo ($\delta^{13}\text{C}_g$) y el CO_2 gaseoso respecto al HCO_3^- ($\varepsilon_{g/b}$). El punto O representa el valor isotópico inicial del CID; fue calculado a partir de la composición isotópica del carbonato sólido en el suelo ($\delta^{13}\text{C}_s$) y el CO_2 gaseoso en equilibrio con el CO_2 disuelto presentes en el suelo ($\delta^{13}\text{C}_{a1}$). Finalmente, el punto M'' representa la mezcla de CO_2 acuoso y HCO_3^- en equilibrio con el carbonato sólido presente en el suelo; y fue calculado a partir de la actividad del CO_2 acuoso, la actividad del HCO_3^- , la composición isotópica del carbonato sólido en el suelo ($\delta^{13}\text{C}_s$), el carbonato sólido respecto al CO_2 disuelto ($\varepsilon_{s/a}$) y el carbonato sólido respecto al HCO_3^- ($\varepsilon_{s/b}$).

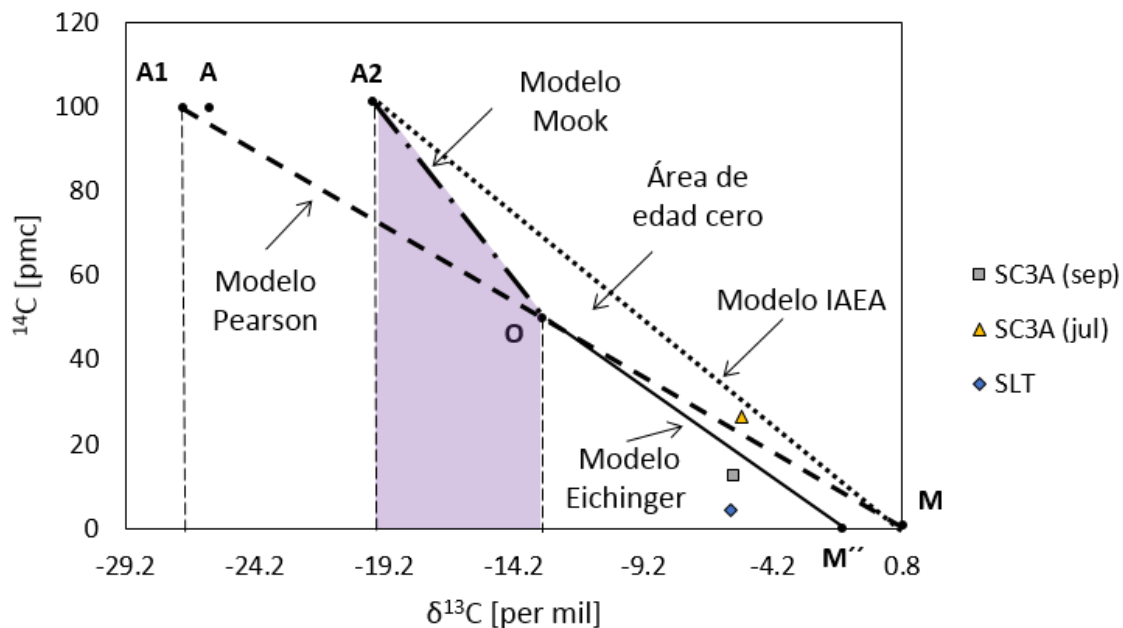


Figura 17. Gráfico de Han & Plummer para el pozo Santa Catarina 3A.

Al analizar el diagrama de Han & Plummer la muestra del pozo San Lorenzo Tezonco [SLT] y la de septiembre del Santa Catarina 3A [SC3A (sep)], caen debajo de las siguientes líneas: O-M'', correspondiente al modelo de Eichinger; A1-M, correspondiente al modelo de Pearson; y A2-M, correspondiente al modelo de la IAEA. Debido a que estas dos muestras caen debajo de estas líneas se les pueden aplicar los tres métodos de corrección.

La muestra de julio del Santa Catarina 3A [SC3A (jul)] cae dentro del área de edad cero y por debajo de la línea del modelo de la IAEA; sin embargo, se decidió utilizar también el modelo de Pearson y de Eichinger para su corrección y así observar la diferencia en el cálculo de la edad al utilizar un modelo inadecuado. Para el pozo SLT se calculó el contenido inicial del ^{14}C , a partir de los datos reportados en [Morales-Casique et al. \(2014\)](#).

4.4.3 Cálculo del tiempo de residencia. Modelo de Eichinger

En la [tabla 15](#) se exponen los valores empleados en el modelo de corrección de Eichinger ([ec. 19](#)). La composición isotópica del carbono inorgánico disuelto ($\delta^{13}C_{DIC}$), se determinó en laboratorio a partir de la muestra. La actividad del dióxido de carbono acuoso (C_a) y de bicarbonatos (C_b), fueron calculados ([Anexo 5](#)) a partir de las constantes de equilibrio y un pH de 7.4 medido de las muestras de agua. El ^{13}C del CID en equilibrio con el carbonato sólido ($\delta^{13}C_E$) y valor isotópico inicial del CID ($\delta^{13}C_i$), fueron calculados como se muestra en el [Anexo 6](#). Finalmente, de acuerdo a [Han & Plummer \(2016\)](#), se adoptó un valor de 100 pMC para el contenido de dióxido de carbono gaseoso en el suelo ($^{14}C_g$).

Parámetro	Muestra y fecha		
	SCT 3a-8a	SC3-MA-07	SLT
	30/07/2017 13:20	04/09/2017 12:00	16/07/2013 8:00
$\delta^{13}C_{DIC}$	-5.4	-5.7	-5.8
C_a	3.25E-04	3.32E-04	5.74E-04
C_b	3.08E-03	3.14E-03	5.43E-03
C_T	3.40E-03	3.47E-03	6.01E-03
$\delta^{13}C_E$	-1.70	-1.51	-1.67
$\delta^{13}C_i$	-14.41	-14.42	-14.41
$^{14}C_g$	100	100	100

Tabla 15. Muestra los valores utilizados en el modelo de corrección de Eichinger.

Basándose en la [ecuación 18](#) (cálculo del tiempo de residencia), en la [tabla 16](#) se muestra el valor de la actividad específica inicial del carbono inorgánico disuelto ($^{14}C_0$), calculada con el modelo de Eichinger. Igualmente se muestra la actividad específica del carbono moderno ($^{14}C_{CID}$) medido en laboratorio a partir de la muestra de agua. En la última fila se muestra el tiempo de residencia calculado para cada una de las muestras del pozo Santa Catarina 3A y para la muestra del San Lorenzo Tezonco.

Parámetro	Muestra y fecha		
	SCT 3a-8a	SC3-MA-07	SLT
	30/07/2017 13:20	04/09/2017 12:00	16/07/2013 8:00
$^{14}C_0$	15.93	17.76	17.74
$^{14}C_{CID}$	26.5	12.6	4.4
t (años)	-4203	2840	11528

Tabla 16. Valores empleados para el cálculo del tiempo de residencia con $^{14}C_0$ calculado acuerdo al modelo de Eichinger.

4.4.4 Cálculo del tiempo de residencia. Modelo de Pearson

A continuación, en la [tabla 17](#), se exponen los valores empleados en el modelo de corrección de Pearson ([ec. 20](#)). El carbono total disuelto (δ_T) se determinó en laboratorio a partir de la muestra de agua. El carbonato en el suelo (δ_c) se supuso de 0.8 ‰, mientras que el contenido de dióxido de carbono en el suelo (δ_g) se supuso de -26 ‰ ([Edmunds et al., 2002](#)). Finalmente, de acuerdo con [Fontes y Garnier \(1979\)](#), se adoptó un valor de 100 pMC para la actividad del dióxido de carbono en el suelo (A_g) y un valor de 0 % para la actividad del carbonato de origen marino (A_c).

Parámetro	Muestra y fecha		
	SCT 3a-8a	SC3-MA-07	SLT
	30/07/2017 13:20	04/09/2017 12:00	16/07/2013 8:00
δ_T	-5.4	-5.7	-5.8
δ_c	0.8	0.8	0.8
δ_g	-26	-26	-26
A_g	100	100	100
A_c	0	0	0

Tabla 17. Muestra los valores empleados para el cálculo de $^{14}C_0$ con el modelo de Pearson.

De acuerdo a la [ecuación 18](#) (cálculo del tiempo de residencia), en la [tabla 18](#), se muestra el valor de la actividad específica inicial del carbono inorgánico disuelto ($^{14}C_0$), calculada con el modelo de Pearson. Igualmente se muestra la actividad específica del carbono moderno ($^{14}C_{CID}$) medido en laboratorio a partir de la muestra de agua. En la última fila se muestra el tiempo de residencia calculado para cada una de las muestras del pozo Santa Catarina 3A y para la muestra del San Lorenzo Tezonco.

Parámetro	Muestra y fecha		
	SCT 3a-8a	SC3-MA-07	SLT
	30/07/2017 13:20	04/09/2017 12:00	16/07/2013 8:00
$^{14}C_0$	23.13	24.25	24.62
$^{14}C_{CID}$	26.5	12.6	4.4
t (años)	-1122	5413	14237

Tabla 18. Muestra los valores empleados para el cálculo del tiempo de residencia con $^{14}C_0$ calculado acuerdo al modelo de Pearson.

4.4.5 Cálculo del tiempo de residencia. Modelo de la IAEA

En la [tabla 19](#) se exponen los valores empleados en el modelo de corrección de la IAEA ([ec. 21](#)). La composición isotópica del carbono inorgánico disuelto ($\delta^{13}C_{CID}$), se determinó en laboratorio a partir de la muestra, el CO_2 gaseoso presente en el suelo ($\delta^{13}C_g$) se supuso de -26 ‰ ([Edmunds et al., 2002](#)), el CO_2 gaseoso respecto al HCO_3^- ($\epsilon_{g/b}$) se calculó a partir de las temperaturas de las muestras. Finalmente, de acuerdo a [Han & Plummer \(2016\)](#), se adoptó un valor de 100 pMC para el contenido de dióxido de carbono gaseoso en el suelo ($^{14}C_g$).

Parámetro	Muestra y fecha		
	SCT 3a-8a	SC3-MA-07	SLT
	30/07/2017 13:20	04/09/2017 12:00	16/07/2013 8:00
$\delta^{13}C_{CID}$	-5.4	-5.7	-5.8
$\delta^{13}C_g$	-26	-26	-26
Temp °C	46.35	40.52	45.4
$\epsilon_{g/b}$	-5.79	-6.34	-5.88
$^{14}C_g$	100	100	100

Tabla 19. Valores empleados para el cálculo de $^{14}C_0$ con el modelo de la IAEA.

De acuerdo a la [ecuación 18](#) (cálculo del tiempo de residencia), en la [tabla 20](#), se muestra el valor de la actividad específica inicial del carbono inorgánico disuelto ($^{14}C_0$), calculada con el modelo de la IAEA. Igualmente se muestra la actividad específica del carbono moderno ($^{14}C_{DIC}$) medido en laboratorio a partir de la muestra de agua. En la última fila se muestra el tiempo de residencia calculado para cada una de las muestras del pozo Santa Catarina 3A y para la muestra del San Lorenzo Tezonco.

Parámetro	Muestra y fecha		
	SCT 3a-8a	SC3-MA-07	SLT
	30/07/2017 13:20	04/09/2017 12:00	16/07/2013 8:00
$^{14}C_0$	27.02	29.36	29.16
$^{14}C_{DIC}$	26.50	12.60	4.40
t (años)	160	6993	15634

Tabla 20. Valores empleados para el cálculo del tiempo de residencia con $^{14}C_0$ calculado acuerdo al modelo de la IAEA.

Al examinar los resultados del cálculo de la actividad inicial del carbono-14 ($^{14}C_0$), podemos observar que para los tres modelos de corrección (Eichinger, Pearson e IAEA), en las muestras SC3-MA-07 y SLT, se tienen un valor mayor de $^{14}C_0$ que de actividad específica del carbono moderno ($^{14}C_{DIC}$). Empleando el modelo de la IAEA para el cálculo de $^{14}C_0$ en la muestra SCT 3a-8a, se tiene el mismo comportamiento, es decir, el $^{14}C_0 > ^{14}C_{DIC}$; sin embargo, al emplear los modelos de Eichinger y Pearson, se tiene que $^{14}C_0 < ^{14}C_{DIC}$. Lo anterior resulta en un problema para el cálculo del tiempo de residencia, ya que al emplear la [ec. 18](#) ($t = -\frac{5730}{Ln 2} Ln \frac{^{14}C_{CID}}{^{14}C_0}$), matemáticamente obtenemos, con los modelos de Eichinger y Pearson, un tiempo de residencia negativo para la muestra SCT 3a-8a, lo cual no tiene una interpretación física.

En el diagrama de Han & Plummer ([figura 17](#)), las muestras SC3-MA-07 y SLT caen por debajo de la línea de Eichinger (O-M''), Pearson (A1-M) e IAEA (A2-M), indicando que son modelos aptos para realizar el cálculo del $^{14}C_0$. La muestra SCT 3a-8a está en el área de edad cero, esto es, encima de las líneas de Eichinger y Pearson y por debajo de la línea de la IAEA. De manera gráfica, esto quiere decir, que no es recomendable utilizar los modelos de Eichinger y Pearson para esta muestra, lo cual se reafirma al obtener tiempos de residencia negativos. Físicamente, el que la muestra esté por encima de las líneas Eichinger y Pearson, nos indica que tuvo un aumento en su porcentaje de carbono-14 moderno ($^{14}C_{pmc}$), lo cual podría dar significado al tiempo de residencia negativo, es decir, el agua se infiltró después de los ensayos nucleares de 1950 ([Mook, W. G., 2000](#)). De acuerdo con [Han & Plummer \(2016\)](#), un aumento en $^{14}C_{pmc}$, podría significar que el agua de la muestra está mezclada con agua cuyo contenido de $^{14}C_{pmc}$ es mayor al del agua propia de la formación de interés. A pesar de lo anterior, de acuerdo con el diagrama de Han & Plummer ([figura 17](#)), el modelo de la IAEA es apto para realizar el cálculo de $^{14}C_0$ en la muestra SCT 3a-8a, esto debido a que a diferencia de Eichinger y Pearson, este modelo considera que el agua alcanza un equilibrio isotópico en la zona no saturada, es decir, contempla condiciones de sistema abierto que después evolucionan a sistema cerrado. Es probable que el modelo de la IAEA sea apto (aparentemente) para esta muestra, si consideramos que el agua con la que se mezcló el agua de formación, pertenece a un sistema abierto, pero no debemos perder de vista que se trata posiblemente de una muestra mezclada, por lo que no se puede realizar un análisis congruente.

A pesar de que el modelo de la IAEA podría parecer apto para calcular el $^{14}C_0$ en las muestras SC3-MA-07 y SLT, estos cálculos se toman con reservas ya que se considera que el agua del pozo SCT3A evolucionó en condiciones de sistema cerrado. Otra consideración en los modelos de corrección, es que sólo el modelo de Eichinger contempla la disolución del CO_2 (g) en el agua, a diferencia del modelo de Pearson y de la IAEA. Para este trabajo no se tenían mediciones de CO_2 , por lo cual éste se determinó a partir de constantes de equilibrio, del contenido de bicarbonatos, pH y temperatura ([Anexo 6](#)), las últimas dos, es recomendable medirlas en campo.

Analizando las muestras del pozo Santa Catarina 3A, observamos una disminución del valor de carbono inorgánico disuelto en las muestras, cambiando de 26.5 pMC en julio, a 12.6 pMC en septiembre. Se considera que inicialmente el $^{14}C_{CID}$ del agua tiene un valor de 100 pMC y conforme el agua se filtra y circula a través de las rocas, la cantidad de CID va disminuyendo a medida que pasa el tiempo. Esta disminución de 13.9 pMC en un lapso de 35 días parece drástico, ya que la muestra se obtuvo del mismo pozo y a la misma profundidad. Isotópicamente, de acuerdo al diagrama de Han & Plummer la muestra de julio está mezclada con agua más moderna, es probable que se encontrara contaminada con agua del lodo de perforación (correspondiente al agua de pozo Tláhuac), ya que durante la perforación del pozo hubo pérdidas de circulación a partir de los 1067 [m] aproximadamente. De acuerdo a los informes de

PEMEX, se perdieron alrededor de 20 mil [m³] de lodo, los cuales hubieran salido en 5 días aproximadamente, extrayendo a un caudal de 60 [L/s]; sin embargo, se debe tomar en cuenta que este lodo de perforación “perdido”, seguramente se alojó en la formación y se mezcló con el agua ahí presente. Esto podría explicar el cambio del porcentaje de carbono moderno (pMC) en tan corto tiempo, ya que el agua del pozo Tláhuac se encuentra a una menor profundidad; por ende, su tiempo de residencia es menor y consecuentemente el ¹⁴C tuvo menos tiempo para decaer. Se piensa que al continuar el bombeo del pozo SCT3A durante el mes de agosto, se fue extrayendo esta agua mezclada, logrando así una muestra más limpia y representativa de la formación, para el mes de septiembre.

En cuanto al cálculo del tiempo de residencia, para la muestra del septiembre (SC3-MA-07) del pozo SCT3A, se tiene una discrepancia de 2500 años aproximadamente, entre el modelo de Pearson y el de Eichinger. Para la muestra del pozo SLT, la discrepancia entre estos modelos es de 2700 años aproximadamente. Teniendo así un tiempo de residencia, para la muestra del pozo SCT3A, de 2840 años con el modelo de Eichinger y de 5413 años con el modelo de Pearson; para el pozo SLT se tienen 11528 años con el modelo de Eichinger y de 14237 años con el modelo de Pearson. Aunque, auxiliados del modelo de la IAEA se tiene una edad de 160 años para la muestra del pozo SCT3A en el mes de julio, este tiempo de residencia no es confiable ya que es altamente probable que esta muestra sea una mezcla de aguas y no agua propia de la formación de interés. Se considera que el modelo más apto para este trabajo es el de Eichinger, ya que contempla un sistema cerrado al igual que Pearson (empleado en [Morales-Casique et al., 2014](#)), pero además contempla el CO₂ acuoso, brindando así más parámetros propios del agua para el cálculo de la actividad inicial del ¹⁴C₀.

4.4.6 Elevación de la infiltración y línea meteórica

Para calcular la altitud de la infiltración se despejó la elevación (Z [Km]) de la [ecuación 24](#) ($\delta^{18}O = -2.13 \cdot Z[\text{Km}] - 3.2$) y se utilizó la cantidad de ^{18}O medido en las muestras SCT 3a-8a y SC3-MA-07, del pozo SCT3A, para la muestra del pozo Tláhuac y para la del pozo SLT ([tabla 21](#)). En la [tabla 22](#), se muestran los resultados de los cálculos, todas las elevaciones están alrededor de 3000 [m].

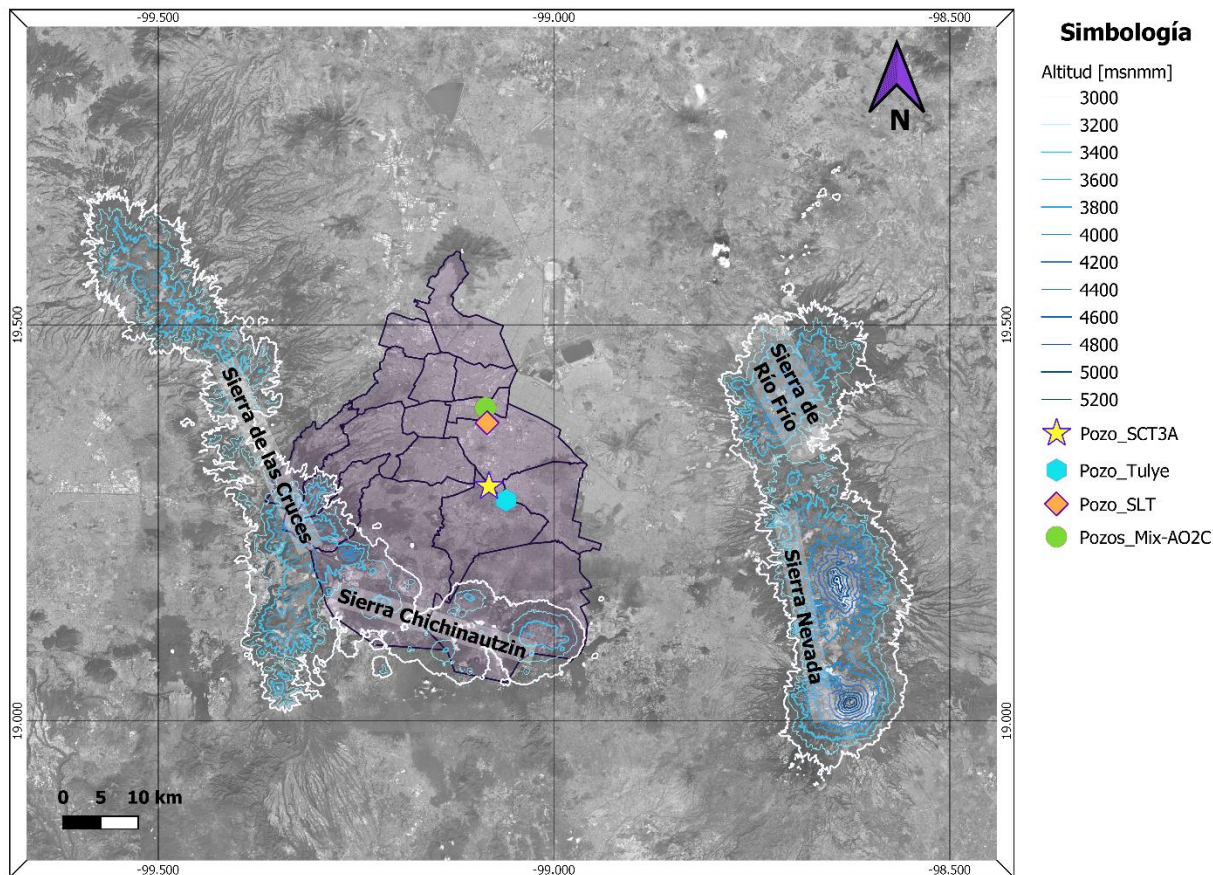
Isótopo	Unidad	SCT 3a-8a	SC3-MA-07	Tláhuac	SLT
δ^2H	‰	-75.15	-73.6	-71.12	-67.3
$\delta^{18}O$	‰	-10.7	-10.6	-10.33	-9.44

Tabla 21. Composición isotópica de las muestras de agua del pozo Santa Catarina 3A, Tláhuac y San Lorenzo Tezonco.

Muestra	Elevación [m]
SCT 3a-8a	3521
SC3MA-07	3474
Tláhuac	3347
SLT	2929

Tabla 22. Resultados del cálculo de la elevación de infiltración del pozo Santa Catarina 3A (SCT 3a-8a, SC3MA-07), Tláhuac y San Lorenzo Tezonco (SLT).

En cuanto al análisis de isótopos estables contenidos en las muestras de julio ($\delta^{18}\text{O}=-10.6$ y $\delta^2H =-73.6$) y septiembre ($\delta^{18}\text{O}=-10.7$ y $\delta^2H =-75.15$) se sugiere que se tiene un origen por infiltración de la precipitación, ya que son valores muy cercanos a lo reportado por [Cortés et al. \(1997\)](#). La elevación aproximada a la que ocurre esta recarga es de 3521 [m] para la muestra de julio y 3474 [m] para la muestra de septiembre, mientras que para la muestra del pozo Tláhuac es de 3347 [m]. Estas cotas corresponden con varias sierras a los alrededores de la CDMX, las más cercanas son la Sierra Chichinautzin (al sur y suroeste de la Ciudad de México), la Sierra de las Cruces (al oeste de la Ciudad de México); un poco más alejadas se encuentran la Sierra de Río Frío y la Sierra Nevada (al este). En el [mapa 3](#) se muestran estas sierras, resaltando las curvas de nivel con valores mayores a 3000 [m], que es la elevación aproximada por encima de la cual se infiltró el agua recolectada en los pozos SCT3A y Tláhuac. La Sierra Santa Catarina se encuentra muy cercana al pozo y aunque es probable que el agua que ahí se infiltra llegue a estratos profundos más allá de 1000 [m]; sin embargo, esto no se ve reflejado al emplear la [ecuación 24](#).



Mapa 3. CDMX y sierras circundantes con altitudes mayores a 3000 [m].

En la [figura 18](#) se representan la línea de agua meteórica mundial ([ec. 22](#)) y la línea de agua meteórica local ([ec. 23](#)). En la misma figura se ubicaron las muestras de los pozos Santa Catarina 3A, Tláhuac y San Lorenzo Tezonco, de acuerdo a los contenidos de oxígeno-18 y ²H indicados en la [tabla 16](#).

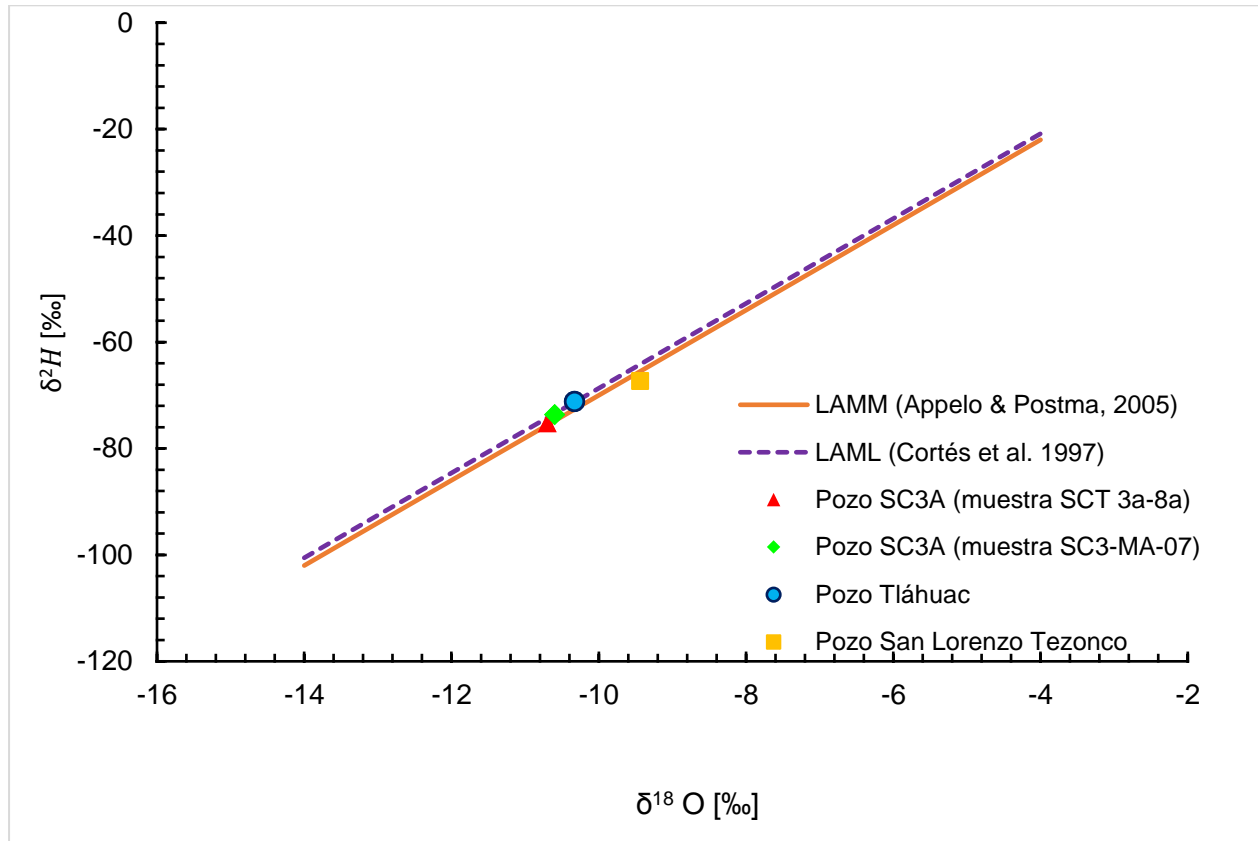


Figura 18. Gráfica de $\delta^{18}\text{O}$ contra $\delta^2\text{H}$ de las muestras de agua de los pozos San Lorenzo Tezonco, Tláhuac y Santa Catarina 3A (SCT3A-8a y SC3-MA-07). Línea meteórica local de Cortés et al. (1997).

En la gráfica de $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ las muestras del pozo Tláhuac, Santa Catarina 3A y San Lorenzo Tezonco se localizan sobre la línea meteórica de México, lo cual indica que el agua de estas muestras se infiltró en la cuenca de México y que no pasó por procesos de evaporación. (Cortés et al., 1997)

Observando la gráfica, podemos agrupar las muestras del SCT3A y Tláhuac, a pesar de que éstas provienen de diferentes profundidades, el que se encuentren cercanas una de la otra, es un indicativo de que las condiciones de temperatura y altitud fueron similares al momento de la recarga. Igualmente, este grupo se encuentra alejado de la muestra del pozo SLT, mientras que las de los pozos Tláhuac y SCT3A tiene un contenido de $\delta^{18}\text{O}$ entre -10.3 y -10.7, la del SLT tiene un valor de -9.4. De acuerdo con Clark (2015), el que la muestra del SLT tenga un valor de $\delta^{18}\text{O}$ mayor a los otros pozos, indica condiciones de mayor temperatura al momento de la infiltración de la precipitación, y una menor elevación de la recarga, lo cual se puede confirmar a través del cálculo de la elevación de la infiltración con la [ec. 24](#).

Discusión

A partir de los resultados se propone un modelo hidrogeológico local para el pozo Santa Catarina 3A, dominado por la gravedad, como lo indican [Ortega y Farvolden \(1989\)](#), cuya recarga ocurre en las partes altas (> 3000 [m]) de las sierras circundantes a la Ciudad de México (dados los resultados de ^{18}O). El agua que se infiltra circula a través de formaciones volcánicas (como lo muestran los resultados de los elementos traza dada la presencia de Mn y Fe) y formaciones calcáreas (dado los valores negativos cercanos a 0 [‰] de ^{13}C en las muestras de agua). Ambos tipos de formación pueden ser encontrados en la CDMX, y forman parte de las unidades hidroestratigráficas propuestas por [Morales Casique et al. \(2014\)](#). Así mismo, en este trabajo se presentan cinco unidades hidroestratigráficas, las cuales se determinaron a través del análisis lito-estratigráfico de tres pozos perforados gran profundidad, dichos pozos se correlacionaron con el pozo SCT3A, en la [figura 19](#) se marcan en diferente color como UH (unidad hidrogeológica) y un número (del 1 al 5). Se identifican cinco unidades hidroestratigráficas a lo largo de tres pozos profundos (Mix-AO2C, SLT y SCT3A) en el perfil A-A'; sin embargo, en el pozo Tulyehualco sólo se identifican cuatro.

La primera unidad (UH1) corresponde con sedimentos lacustres y depósitos aluviales, los cuales van incrementando su espesor de norte a sur, en el pozo SCT3A no fue posible identificar el límite de esta unidad. La segunda unidad (UH2) corresponde con depósitos de lava andesítico-basálticos, dacíticos, y algunos flujos de bloque, ésta fue identificada en el pozo SCT3A, pero no se encontró continuidad hacia el pozo Tulyehualco siguiendo el perfil A-A'. La tercera unidad (UH3) fue identificada como depósitos de lahar e ignimbritas, esta unidad se extiende a través de los 4 pozos y tiene mayor espesor en los pozos Mix-AO2C y Tulyehualco. En esta unidad fue posible identificar en el pozo SCT3A un espesor (895-990[m]) que probablemente se encuentra saturado, de acuerdo al comportamiento y los valores de las curvas de resistividad de los registros geofísicos de pozo (en la imagen 19 se pueden observar estos registros a un costado del pozo SCT3A, así como la zona probablemente saturada, marcada en azul). La cuarta unidad (UH4) se encuentra presente en los cuatro pozos, presenta intercalaciones de rocas ígneas extrusivas y depósitos piroclásticos, cuya composición varía entre riolitas, dacitas, andesitas y basaltos. Esta unidad es de la cual se extrae agua en el pozo SLT y SCT3A, ambos pozos cuentan con tubería ranurada a partir de los 1100 [m] aproximadamente. La quinta unidad (UH5) identificada como rocas calizas, únicamente fue perforada en los pozos Mix-AO2C y Tulyehualco.

En la hipótesis de este trabajo se planteó que los parámetros hidráulicos de las unidades saturadas en estos los pozos SLT y SCT3A serían similares. En ambos pozos se calculó un coeficiente de almacenamiento específico promedio (\bar{S}_s) del orden de 10^{-6} [m^{-1}], que de acuerdo a [Batu \(1998\)](#) corresponde con rocas fisuradas. El pozo SLT presenta una conductividad hidráulica promedio (\bar{K}) de 0.2 [m/día] y el pozo SCT3A de 0.855 [m/día], lo cual de acuerdo con [Domenico y Schwartz \(1998\)](#) corresponde con rocas ígneas o metamórficas fracturadas. Esto confirma la hipótesis y fortalece la propuesta de la cuarta unidad hidrogeológica. Así mismo se planteó que el agua de ambos pozos pertenecería a la misma familia de agua y así es, el agua de los dos pozos pertenece a la familia de agua clorurada-sódica; sin embargo, en los diagramas de Stiff (representados dentro de los pozos en la [figura 19](#), anaranjado para el pozo SLT y verde para el pozo SCT3A) se aprecia una forma diferente, lo cual se debe a la diferencia en la concentración del cloruro. Otra diferencia notable se refleja en el tiempo de

residencia, la hipótesis era que el agua del pozo SCT3A tendría alrededor de 10 000 años; sin embargo, se calculó un tiempo de residencia de 2840 años a diferencia de los 11 528 años del pozo SLT (en ambos pozos se extrae el agua aproximadamente de la misma profundidad), esto se debe a la diferencia de contenidos de ^{14}C en estos pozos. El pozo SCT3A presentó un contenido (para el mes de septiembre) de 12.6 [pMC] mientras que el SLT tuvo un contenido de 4.4 [pMC]. Analizando la diferencia del tiempo de residencia, aunado a la diferencia en el contenido de cloruros, se piensa que el agua captada en ambos pozos, corresponde a flujos diferentes, ambos circulan a través de la UH4, y se recargan en las sierras circundantes (aunque el SLT a menor altitud y en condiciones diferentes de temperatura como lo indican los valores de ^{18}O y ^2H); sin embargo, éstos se mueven a diferentes velocidades a pesar de que ambos pozos se encuentren dentro del graben Santa Catarina. Es probable que el agua circule de la Sierra de las Cruces hacia el pozo SLT y una parte hacia el pozo SCT3A, dada la cercanía de este último pozo a la Sierra Chihcinautzin se piensa que existe un mayor aporte del agua recargada en esta sierra, pero no se descarta la contribución de las otras. A pesar de ser un flujo profundo, el tiempo de residencia es similar al de pozos someros ([Edmunds, 2002](#)), esto nos puede hablar de una infiltración muy rápida o que el agua de la muestra de septiembre contenía ^{14}C proveniente del agua del lodo de perforación (dado el antecedente de que en julio el agua del pozo estaba “contaminada” con agua del lodo de perforación, lo cual se evidenciaba con la presencia de nitratos). Finalmente, debido al contenido de ^{13}C presente en las muestras de ambos pozos se piensa que el agua se infiltró llegando a las unidades hidrogeológicas 4 y 5, y que en algún momento el agua que circuló por las calizas ascendió a la unidad volcánica. Harían falta nuevos análisis isotópicos para corroborar alguna de estas afirmaciones.

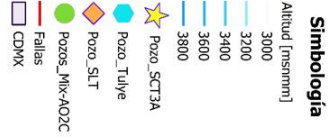
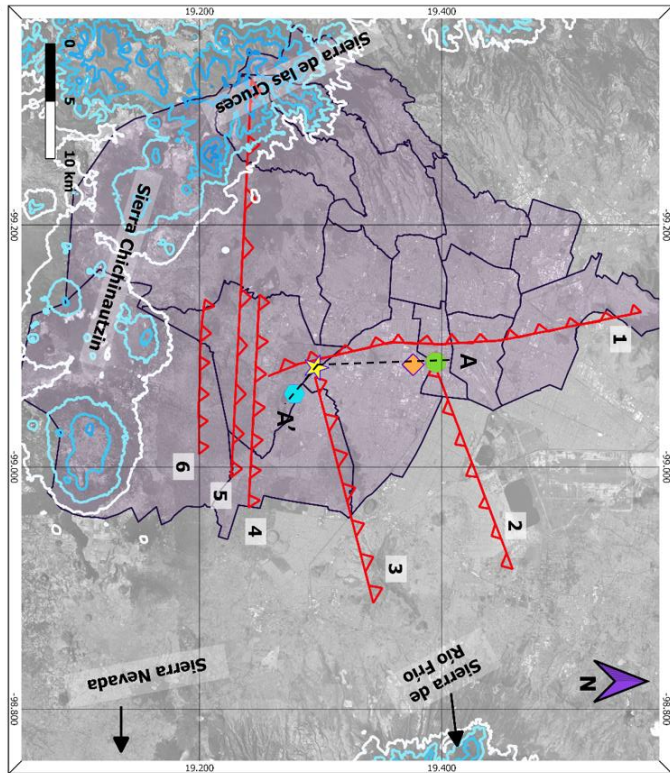
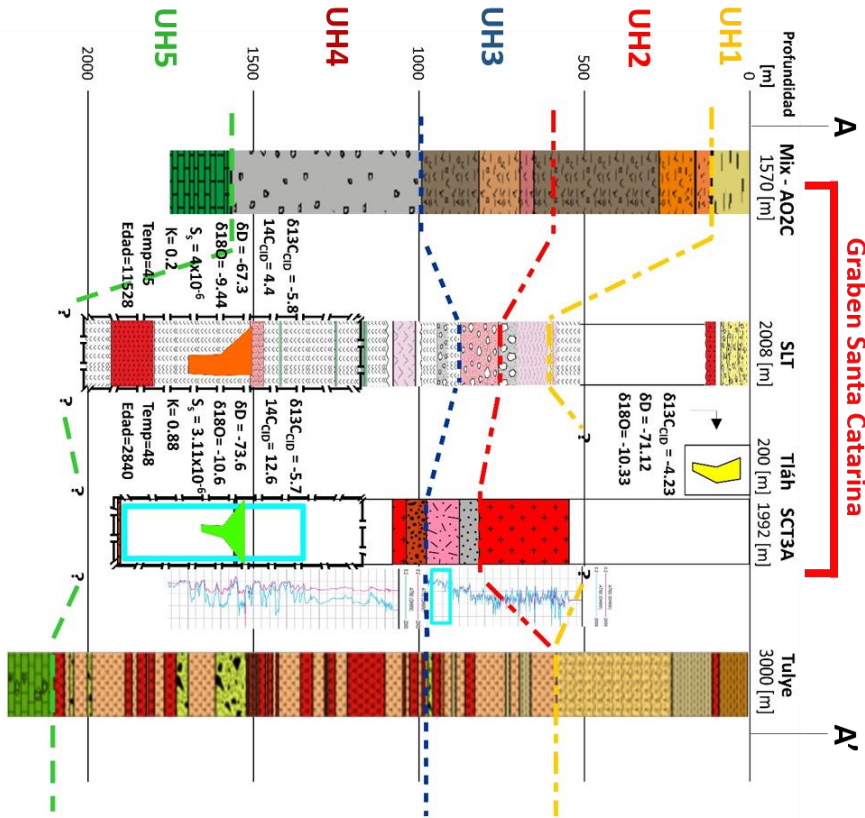


Figura 19. Modelo hidrogeológico local propuesto A-A'. Dirección N-S (aproximadamente), de acuerdo al perfil A-A' en el mapa de la derecha. A la izquierda se muestra una correspondencia de 5 unidades hidrogeológicas (UH1 – UH5) a través de las líneas puntuadas de diferente color. Los signos de interrogación (?) indican el desconocimiento de la profundidad en la cual inicia dicha unidad. Igualmente se presentan los resultados de carbono-13 [‰], deuterio [‰], oxígeno-18 [‰] y los diagramas de Sliff correspondientes a la muestras extraídas de los pozos Tlahuac, San Lorenzo Tezonco y Santa Catarina 3A. Únicamente se presenta el carbono-14 [pMC], almacenamiento específico (Ss [1/ml]), conductividad hidráulica (K [m/día]), temperatura (Temp [°C]) y la edad estimada [años] para el pozo San Lorenzo Tezonco y Santa Catarina 3A. Se representa con una línea discontinua la tubería ranurada en los pozos SLT y SCT3A. Embarcado con un cuadro azul se representa el espesor identificado como saturado, en la tubería ranurada del pozo SCT3A. Con un cuadro azul más pequeño se representa, sobre las curvas de resistividad (lado derecho del pozo SCT3A), el estrato saturado identificado entre 895-990 [m]. En el mapa se muestran algunas fallas presentes en la CDMX: 1) Falla Mixhuca Inferior (modificada de González-Torres et al., 2015) con base en la información de Pérez-Cruz, 1988); 2) Falla Agrícola Oriental (Vásquez-Serrano et al., 2019); 3) Falla Santa Catarina (González-Torres et al., 2015); 4, 5 y 6) Sistema de fallas Xochimilco-Xicomulco (modificado de Arce et al., 2019 y González-Torres et al., 2015). También se presentan las curvas de nivel con cotas mayores a 3000 [m] de la Sierra de las Cruces, Sierra Chichinautzin y parcialmente la Sierra Rio Frio. Así mismo se muestra la ubicación de los pozos Mix-AO2C, San Lorenzo Tezonco, Santa Catarina 3A y Tuluyhuatlco.

Conclusiones

A través de los registros geofísicos de pozo fue posible identificar dos zonas saturadas con facilidad para transmitir agua, la primera de 895 a 990 [m] y la segunda de 1346 a 1767 [m], estas zonas saturadas coinciden con intervalos deleznable que cuyas resistividades están en el rango de 0.73 a 81.6 [Ohm m]. El cálculo de la curva de porosidad a partir de la calibración del factor de tortuosidad y del exponente de cementación, en una litología similar, fue de mucha ayuda en el cálculo de la aproximación de la permeabilidad, teniendo (en estos estratos saturados) valores de 122– 13 710 [mD], propios de rocas ígneas fracturadas ([Freeze & Cherry, 1979](#)). Particularmente, las ecuaciones de [Tixer, Timur](#) y [Coates-Dumanoir](#) fueron de utilidad para el cálculo de esta aproximación en este pozo; sin embargo, los valores de porosidad calculada para el pozo SCT3A deben tomarse con reservas; probablemente un mejor ajuste en la calibración arroje valores más confiables. Teniendo en cuenta que el pozo SCT3A se encuentra ranurado a partir de 1168.31 [m], se presume que el agua que se está extrayendo del pozo proviene de estratos que corresponden con depósitos de lahar (identificadas como facies 2 a través del análisis de los registros geofísicos), a partir de los 1346 [m] aproximadamente. La presencia de fracturas en estos estratos se refuerza mediante el análisis de las pruebas de aforo ya que fue posible calcular un almacenamiento específico promedio de $3.11 \times 10^{-6} [m^{-1}]$ lo que corresponde con rocas fisuradas ([Batu, 1998](#)), así mismo el resultado de la conductividad hidráulica promedio de 0.855 [m/día], también es indicativo de rocas ígneas fracturadas ([Domenico y Schwartz, 1998](#)), una de estas fracturas puede ser observada en un núcleo extraído entre 1558 y 1559 [m], dicha fractura se encuentra rellena de materiales hidrotermales ([Arce, 2019](#)) La semejanza a los resultados del pozo SLT confirma la hipótesis de que ambas formaciones saturadas perforadas con los pozos SLT ([Morales-Casique, 2014](#)) y SCT3A, presentan propiedades hidráulicas similares.

A través de los resultados de los análisis químicos del agua es evidente la presencia de nitratos en el agua en el mes de julio, los cuales ya no son detectados en el mes de septiembre. Esto lleva a pensar que en julio el agua de la formación se encontraba mezclada con agua somera, probablemente de un pozo contiguo (Tláhuac) con el cual se realizó el lodo de perforación. Durante la perforación del pozo hubo pérdida de circulación, generando así la mezcla del lodo de perforación y el agua de la formación. Esta mezcla no es evidente en los diagramas de Piper y Stiff, los cuales indican que las muestras tanto de julio como de septiembre pertenecen a una misma familia de agua (clorurada sódica), mientras que el agua del pozo Tláhuac pertenece a una familia de agua bicarbonatada sódica; sin embargo, aunque en estos diagramas no sea evidente esta mezcla, al realizar el diagrama de Han y & Plummer y calcular el tiempo de residencia se hace más evidente esta mezcla. La diferencia en los diagramas de Stiff entre el pozo SLT y SCT3A indican que probablemente el agua de ambos pertenece a flujos diferentes, evidenciándose esto en el contenido de cloruro. Así mismo se observa una gran discrepancia en el tiempo de residencia, lo cual refuerza esta idea, teniendo una edad calculada de 2840 años para el pozo SCT3A a diferencia de los 11 528 del pozo SLT. El tiempo de residencia negativo nos indica que el agua tiene carbono moderno, el cual es más probable encontrar en aguas someras que en agua a gran profundidad. Una edad positiva, para la muestra de julio, con el modelo de la IAEA, puede llevar a confusiones, por lo cual es muy importante tener en cuenta las condiciones del sistema al momento de realizar las correcciones por contenido inicial de ^{14}C . En este caso se consideró un sistema cerrado, es de suma importancia establecer las condiciones que se van a suponer acerca del medio, para la elección del modelo de corrección, ya que un modelo inadecuado puede llevar a errores de miles de años.

Es altamente probable que el agua presente en el pozo SCT3A se haya infiltrado en cotas mayores a 3000 [m] en las sierras circundantes, especialmente en la Sierra Chichinautzin (dada la cercanía de esta al pozo). Basados únicamente en la gráfica de la línea meteórica local, podría decirse que las condiciones climáticas presentes en el momento de la infiltración del agua del pozo Santa Catarina 3A, son similares a las condiciones climáticas actuales. Después de infiltrarse, el agua pudo aumentar su contenido de ^{13}C (-5.7 [‰]) al estar en contacto con las rocas calizas de la UH5 y posteriormente ascender a las rocas volcánicas, probablemente a través de fracturas.

Finalmente se puede decir que el comportamiento de los flujos a gran profundidad en la Ciudad de México obedece a un comportamiento endorreico y que es muy probable que haya circulación de agua entre las UH5 y la UH4. Dada la evidencia de un estrato saturado entre la UH2 y la UH4, no se descarta la comunicación hidráulica entre estos estratos en algunas zonas de la CDMX.

Referencias

Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. A.A. Balkema Publishers.

Arce, J. L., Layer, P. W., Macías, J. L., Morales-Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, F. J., ... & Vásquez-Serrano, A. (2019). Geology and stratigraphy of the Mexico basin (Mexico city), central Trans-Mexican volcanic Belt. *Journal of Maps*, 15(2), 320-332.

Arce, J. L., Layer, P. W., Morales-Casique, E., Benowitz, J. A., Rangel, E., & Escolero, O. (2013). New constraints on the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and whole-rock chemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 266, 34-49.

Arce, J. L., Layer, P., Martínez, I., Salinas, J. I., Macías-Romo, M. D. C., Morales-Casique, E., ... & Lenhardt, N. (2015). Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 123-143.

Asquith, G. B., Krygowski, D., & Gibson, C. R. (2004). *Basic well log analysis* (Vol. 16). Tulsa: American Association of Petroleum Geologists.

Batu, V. (1998). *Aquifer hydraulics: a comprehensive guide to hydrogeologic data analysis* (Vol. 1). John Wiley & Sons.

Birkle, P., Torres, V., & González, E. (2015). Evaluación preliminar del potencial de acuíferos profundos en la Cuenca del Valle de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(3), 47-53.

Cardona, A., & Hernández, N. (2015). Modelo geoquímico conceptual de la evolución del agua subterránea en el Valle de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(3), 71-90.

Clark, I. (2015). *Groundwater geochemistry and isotopes*. CRC press.

Clark, I. D., & Fritz, P. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. CRC press.

Cortés, A., Durazo, J. 2001. Tendencia del Oxígeno-18 en la precipitación del centro de México. *Ingeniería Hidráulica en México*. XIV, 2: 93p.

Cortés, A., Durazo, J., & Farvolden, R. N. (1997). Studies of isotopic hydrology of the basin of Mexico and vicinity: annotated bibliography and interpretation. *Journal of Hydrology*, 198(1-4), 346-376.

Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465), 1702-1703.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Segunda edición corregida. Ediciones Omega, S. A. – Platón, 26 – Barcelona-6

Del Socorro Lozano-García, M., & Ortega-Guerrero, B. (1998). Late Quaternary environmental changes of the central part of the Basin of Mexico; correlation between Texcoco and Chalco basins. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 99(2), 77-93.

Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). Physical and chemical hydrogeology (Vol. 506). New York: Wiley.

Edmunds, W. M., Carrillo-Rivera, J. J., & Cardona, A. (2002). Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City. *Journal of Hydrology*, 258(1-4), 1-24.

Enciso-De la Vega, S. (1992). Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México. *Revista*, volumen, 10(1), 26-36.

Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 84-92.

Fontes, J. C., & Garnier, J. M. (1979). Determination of the initial ^{14}C activity of the total dissolved carbon: A review of the existing models and a new approach. *Water resources research*, 15(2), 399-413.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater* (No. 629.1 F7).

García-Palomo, A., Zamorano, J. J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., & Macías, J. L. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 25(1), 158-178.

González Torres, E. A., Morán Zenteno, D. J., Mori, L., & Martiny, B. M. (2015). Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 285-297

Han, L. F., & Plummer, L. N. (2016). A review of single-sample-based models and other approaches for radiocarbon dating of dissolved inorganic carbon in groundwater. *Earth-Science Reviews*, 152, 119-142.

Horne, R. N., 1995. *Modern Well Test Analysis: A Computer-Aided Approach*, 2nd. ed., Petroway, Palo Alto, 257p.

Huizar-Alvarez, R., Carrillo-Rivera, J. J., Angeles-Serrano, G., Hergt, T., & huizar, A. (2004). Chemical response to groundwater extraction southeast of Mexico City. *Hydrogeology Journal*, 12(4), 436-450.

Jacob, C.E., 1947. Drawdown test to determine effective radius of artesian well, *Trans. Amer. Soc. of Civil Engrs.*, vol. 112, paper 2321, pp. 1047-1064.

Krygowski, D. A. (2003). Austin Texas USA: Guide to petrophysical interpretation.

Leyva Suárez, Esther sustentante Acuíferos semiconfinados y su modelación : aplicaciones al acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México / 2010

Lezama-Campos, J. L., Morales-Casique, E., Castrejón-Pineda, R., Arce, J. L., & Escolero, O. A. (2016). Interpretación del registro geofísico del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y su correlación litológica en la cuenca de México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 33(2), 198-208.

Mollinedo Jimenez, Ramon sustentante Técnicas computarizadas para la determinación de litología y

saturación de agua a partir de registros geofísicos de pozos petroleros / 1992

Montiel Palma, S., Armienta Hernández, M. A., RODRÍGUEZ CASTILLO, R., & Domínguez Mariani, E. (2014). Identificación de zonas de contaminación por nitratos en el agua subterránea de la zona sur de la Cuenca de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(2), 149-165.

Mook, W. G. (2000). *Environmental isotopes in hydrological cycle. Principles and applications*. IHP-V, Technical Documents in Hydrology.

Mooser, F., & Molina, C. (1993). Nuevo modelo hidrogeológico para la Cuenca de México. *Boletín del Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra*, 3(1), 68-84.

Morales Casique et al. (2018). Informe final. Analizar la estratigrafía y las características hidrogeológicas de los estratos profundos que conforman el subsuelo de la cuenca de México a partir de la perforación a 2000 m del pozo profundo denominado "Santa Catarina 3A". Instituto de geología 2018.

Morales-Casique, E., Arce-Saldaña, J. L., Escolero-Fuentes, O., & Lezama-Campos, J. L. (2016). Análisis de la estratigrafía y las características hidrogeológicas de los estratos profundos que conforman el subsuelo de la Cuenca de México a partir de la perforación de dos pozos profundos, uno a 2000 m y otro a 1570 m denominados Agrícola Oriental 2B y 2C. *Boletín 121 Instituto de Geología*. UNAM.

Morales-Casique, E., Arce-Saldaña, J. L., Lezama-Campos, J. L., & Escolero-Fuentes, O. (2017). Análisis de la estratigrafía y las características hidrogeológicas de los estratos profundos que conforman el subsuelo de la Cuenca de México a partir de la perforación a 2000 m del pozo profundo denominado "Santa Catarina 3A" *Boletín 123 Instituto de Geología*. UNAM.

Morales-Casique, E., Escolero, O. A., & Arce, J. L. (2014). Resultados del pozo San Lorenzo Tezonco y sus implicaciones en el entendimiento de la hidrogeología regional de la cuenca de México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 31(1), 64-75.

Morales-Casique, E., Escolero, O. A., & Arce, J. L. (2015). Estimación de parámetros mediante inversión y análisis de las pérdidas hidráulicas lineales y no-lineales durante el desarrollo y aforo del pozo San Lorenzo Tezonco. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 203-214.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización

Orellana, E. SF 1985 *Prospección Geofísica*.

Ortega, A., & Farvolden, R. N. (1989). Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology*, 110(3-4), 271-294.

Pearson, F. J., & Hanshaw, B. B. (1970). Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effects on carbon-14 dating. *Isotope hydrology*, 1970, 271-285.

Perez Cruz, Guillermo Alejandro sustentante *Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México* / 1988

Ramírez López, Dalia Inés, sustentante *Estimación del coeficiente de almacenamiento efectivo de CO2*

de una formación objetivo con registros geofísicos de pozos / 2016

Roy, K. K., & Dutta, D. J. (1994). Borehole dc resistivity response for a transitional invaded zone. *Geophysics*, 59(12), 1796-1805.

Sánchez Corona, Carlos Yair, sustentante Evolución de los registros de resistividad y su aplicación en la estimación de la saturación de fluidos (agua e hidrocarburos) / 2012

Sanders, L. L. (1998). *Manual of field hydrogeology*. Prentice Hall.

Schlumberger Limited. (1991). *Log interpretation principles/applications*. Schlumberger Educational Services.

Serra, O. (1984). *Fundamental of well-log interpretation: The acquisition of logging data, developments in petroleum science*. 15A-trans. El Sevier Science Publishers BV, Amsterdam, the Netherlands, 1.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E (1990). *Applied Geophysics*. 2nd Ed. Cambridge University Press, U. S. A.

Tiab, D., & Donaldson, E. C. (2015). *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Gulf professional publishing.

Vásquez-Serrano, A., Camacho-Rangel, R., Arce-Saldaña, J. L., & Morales-Casique, E. (2019). Análisis de fracturas geológicas en el pozo Agrícola Oriental 2C, Ciudad de México y su relación con fallas mayores. *REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS GEOLÓGICAS*, 36(1), 38-53.

Vázquez-Sánchez, E., & Jaimes-Palomera, R. (1989). Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2), 133-190.

Villanueva, M., & Iglesias, A. (1984). *Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. IGME. Madrid.

Walton, W.C., 1962. *Selected analytical methods for well and aquifer evaluation*, Illinois State Water Survey Bulletin 49, Urbana, Illinois, 81p.

Wassenaar, L. I., Van Wilgenburg, S. L., Larson, K., & Hobson, K. A. (2009). A groundwater isoscape (δD , $\delta^{18}O$) for Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, 102(3), 123-136.

Wigley, T. M. L. (1975). Carbon 14 dating of groundwater from closed and open systems. *Water Resources Research*, 11(2), 324-328.

Anexo 1



Figura 20. Recortes de perforación de pozo SACT3A correspondientes al inicio y final de la primera etapa.

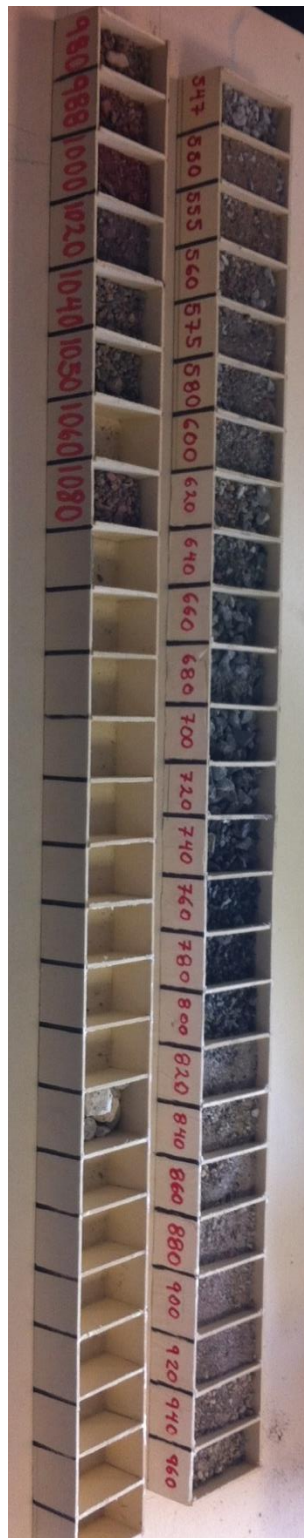


Figura 21. Recortes de perforación de pozo SACT3A de 547 a 1080 [m].

Anexo 2



Figura 22. Segmento del núcleo 2 (N1-SCT3A). Profundidad de extracción: 967-968 [m].



Figura 23. Segmento del núcleo 2 (N2-SCT3A). Profundidad de extracción: 1550-1551 [m].



Figura 24. Segmento del núcleo 2 (N3-SCT3A). Profundidad de extracción: 1901-1902 [m].

Anexo 3

El primer ensayo inició a las 17:00 hrs. del 30 de julio y concluyó a las 2:00 hrs. del 31 de julio. Se midieron 2 escalones con el motor a 1400 y 1500 [rpm], el nivel estático inicial fue de 57.41 [m] desde el suelo.

El segundo ensayo inició a las 8:12 hrs del 2 de agosto y concluyó a las 14:53 hrs del 2 del mismo día. Se midieron 4 escalones iniciando a 1200 [rpm] y finalizando a 1500 [rpm], el nivel estático inicial fue de 65 [m] desde el suelo.

El tercer ensayo se llevó a cabo el 25 de agosto; sin embargo, sólo se pudieron medir 5 horas, ya que el ensayo fue interrumpido debido a fallas en el motor.

El cuarto ensayo de bombeo inició el 1 de septiembre del 2017 a las 21:10 hrs. con 1300 revoluciones por minuto [rpm] y terminó el 4 de septiembre a las 12:28 hrs. con 1900 [rpm], teniendo 2 ensayos de recuperación y 8 etapas o escalones.

Para el ensayo de bombeo del 1 al 4 de septiembre del 2017, se instalaron 59 tubos de 3.05 [m], teniendo una longitud total de 179.95 [m] de tubería.

Metodología del ensayo de bombeo en septiembre del 2017:

- Etapa 1: inició a las 21:10 hrs del 1 de septiembre y terminó a las 9:10 hrs del 2 de septiembre, teniendo una duración de 12 horas. En esta etapa se bombeó a 1300 rpm.
- Ensayo de recuperación 1: inició a las 9:10 hrs de del 2 de septiembre y terminó a las 11:57 hrs del 2 de septiembre, teniendo una duración de casi 3 horas.
- Etapa 2: inició a las 12:01hrs del 2 de septiembre y terminó a las 18:01 hrs del 2 de septiembre, teniendo una duración de 6 horas. En esta etapa se bombeó a 1400 rpm.
- Etapa 3: inició a las 18:02 hrs del 2 de septiembre y terminó a las 00:02 hrs del 3 de septiembre, teniendo una duración de 6 horas. En esta etapa se bombeó a 1500 rpm.
- Etapa 4: inició a las 00:07 hrs del 3 de septiembre y terminó repentinamente a la 1:47 hrs del 3 de septiembre debido a fallas técnicas. En esta etapa se bombeó a 1600 rpm.
- Ensayo de recuperación 2: inició a las 2:08 hrs del 3 de septiembre y terminó a las 4:08 hrs,

teniendo una duración de 2 horas.

- Etapa 4 (repetición): una vez solucionados los problemas técnicos se inició esta etapa a las 19:30 hrs del 3 de septiembre y terminó a la 1:55 hrs del 4 de septiembre, teniendo una duración aproximada de 6 horas. En esta etapa se bombeó a 1600 rpm.
- Etapa 5: inició a las 2:00 hrs del 4 de septiembre y terminó a las 8:00 hrs del 4 de septiembre, teniendo una duración de 6 horas. En esta etapa se bombeó a 1700 rpm.
- Etapa 6: inició a las 8:15 hrs del 4 de septiembre y terminó a las 12:15 hrs del 4 de septiembre, teniendo una duración de 6 horas. En esta etapa se bombeó a 1800 rpm
- Etapa 7: inició a las 12:15 hrs del 4 de septiembre y terminó a las 12:25 hrs del 4 de septiembre, teniendo una duración de 10 minutos. En esta etapa se bombeó a 1900 rpm.
- Etapa 8: inició a las 12:25 hrs del 4 de septiembre y terminó a las 12:28 hrs del 4 de septiembre debido a fallas técnicas, teniendo una duración de 3 minutos. En esta etapa se bombeó a 1900 rpm.

Anexo 4

Para el análisis de los elementos mayores se llevaron muestras de 100 ml sin filtrar al Laboratorio de Cromatografía en el Instituto de Geología de la UNAM donde los expertos llevaron a cabo el análisis.

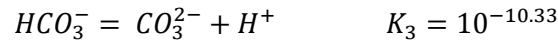
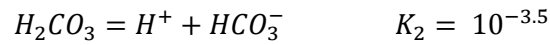
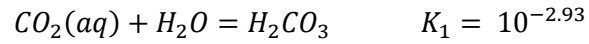
En cuanto al análisis de elementos traza se les realizó el siguiente tratamiento previo a las muestras enviadas al Laboratorio de espectroscopía atómica en el instituto de Geología de la UNAM:

- Lavar con detergente neutro concentrado tubos tipo falcón de 50 ml así como sus tapas.
- Enjuagar con agua destilada.
- Extraer con una jeringa limpia 50 [ml] de agua.
- Pasar las muestras por un filtro de 0.45 micras.
- Acidificar la muestra con ácido nítrico concentrado, hasta llegar a un pH de 2.
- Repetir para cada muestra

Las muestras enviadas al laboratorio Beta Analytic© para el análisis de radiocarbono e isótopos estables pasaron por el siguiente tratamiento:

- Lavar botellas de 500 [ml] y sus tapas con detergente neutro concentrado.
- Enjuagar con agua destilada.
- Dejar reposar las botellas lavada en agua acidulada para lavado de material con ácido nítrico al 2%, durante 24 horas.
- Enjuagar con agua destilada
- Llenar las botellas con la muestra a analizar cuidando que no queden burbujas.

Anexo 5



$$pH = 7.4$$

Desarrollo:

$$100 = (H_2CO_3) + (HCO_3^-) + (CO_3^{2-})$$

$$K_2 = \frac{(H^+)(HCO_3^-)}{H_2CO_3} \quad K_3 = \frac{(H^+)(CO_3^{2-})}{HCO_3^-}$$

Sustituyendo:

$$100 = \frac{(H^+)(HCO_3^-)}{K_2} + (HCO_3^-) + \frac{(K_3)(HCO_3^-)}{H^+}$$

$$100 = \frac{(10^{-7.4})(HCO_3^-)}{10^{-3.5}} + (HCO_3^-) + \frac{(10^{-10.33})(HCO_3^-)}{10^{-7.4}}$$

Despejando HCO_3^- y sustituyendo:

$$HCO_3^- = 99.87\% \quad H_2CO_3 = 0.0126\% \quad CO_3^{2-} = 0.1173\%$$

La muestra SC3-MA-07 contiene 222.6 [mg/L] de HCO_3^- , lo que equivale a 3.65×10^{-3} [mol/Kg]; por regla de tres el contenido de H_2CO_3 es de 0.0281 [mg/L], lo que equivale a 4.53×10^{-7} [mol/Kg].

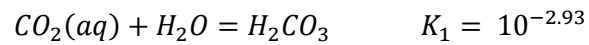
La muestra SCT 3a-8a contiene 219.2 [mg/L] de HCO_3^- , lo que equivale a 3.59×10^{-3} [mol/Kg]; por regla de tres el contenido de H_2CO_3 es de 0.0276 [mg/L], lo que equivale a 4.45×10^{-7} [mol/Kg].

Debido a la alta salinidad, se utiliza la actividad del ácido carbónico para determinar la cantidad de dióxido de carbono acuoso ($CO_2(aq)$). El coeficiente de actividad fue calculado mediante la ecuación de Güntelberg.

Para la muestra SC3-MA-07 se calculó una actividad de 3.14×10^{-3} [mol/L] para el HCO_3^- y 3.9×10^{-7} [mol/L] para el H_2CO_3 .

Para la muestra SCT 3a-8a se calculó una actividad de 3.08×10^{-3} [mol/L] para el HCO_3^- y 3.82×10^{-7} [mol/L] para el H_2CO_3 .

A continuación, se calcula $CO_2(aq)$, a partir de la siguiente ecuación:



$$CO_2(aq) = \frac{H_2CO_3}{K_1}$$

Anexo 6

Las ecuaciones presentadas a continuación fueron implementadas en este trabajo, de acuerdo con Han & Plummer (2016).

$$\delta^{13}C_{\epsilon} = \frac{C_a}{C_T} (\delta^{13}C_s + \epsilon_{s/a}) + \frac{C_b}{C_T} (\delta^{13}C_s + \epsilon_{s/b})$$

$$\delta^{13}C_i = \frac{C_a}{C_T} (\delta^{13}C_{a1}) + 0.5 \frac{C_b}{C_T} (\delta^{13}C_{a1}) + 0.5 \frac{C_b}{C_T} (\delta^{13}C_s)$$

Donde:

$$C_a = CO_2(aq)$$

$$C_b = HCO_3^-$$

$$C_T = C_a + C_b$$

$$\epsilon_{s/a} = \epsilon_{s/b} + \epsilon_{a/g} + \epsilon_{g/b}$$

$$\epsilon_{s/b} = \frac{-4232}{T} + 15.1 \quad ; T[K]$$

$$\epsilon_{a/g} = \frac{-373}{T} + 0.19 \quad ; T[K]$$

$$\epsilon_{g/b} = \frac{-9483}{T} + 23.89 \quad ; T[K]$$

$$\delta^{13}C_{a1} = \delta^{13}C_g + \epsilon_{a/g}$$

