

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de la información geológica,
geofísica e hidrogeológica en la
evaluación de un acuífero profundo
(Caso Santa Catarina 3A)**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Daniela Santiago López

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Francisco Alejandro Arroyo Carrasco



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., noviembre 2018



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN
CIENCIAS DE LA TIERRA
OFICIO FING/DICT/1065/2018

SRITA. DANIELA SANTIAGO LÓPEZ

Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento que la opción de titulación: **POR TESIS**, así como el tema y contenido propuestos por el **Ing. Francisco Alejandro Arroyo Carrasco** en calidad de **Director de Tesis**, han sido aprobados por el comité de titulación de la carrera de **Ingeniería Geológica** y se muestran a continuación

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN GEOLÓGICA, GEOFÍSICA E HIDROGEOLÓGICA EN LA EVALUACION DE UN ACUÍFERO PROFUNDO (CASO SANTA CATARINA 3A)

- I INTRODUCCIÓN
- II MARCO FÍSICO
- III ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN GENERADA EN LA PERFORACIÓN DEL POZO
- IV CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFÍA
- ANEXOS

Por otra parte, le comunico que le ha sido asignado el siguiente jurado que tendrá como función básica, avalar su trabajo escrito y autorizar la réplica oral requerida para la obtención del título profesional, de acuerdo al Reglamento de Opciones de Titulación vigente.

PRESIDENTE: M.C. ELISEO VÁZQUEZ SÁNCHEZ
VOCAL: ING. FRANCISCO ALEJANDRO ARROYO CARRASCO
SECRETARIO: ING. ALBERTO ARIAS PAZ
1ER. SUPLENTE: ING. MARTÍN CARLOS VIDAL GARCÍA
2DO. SUPLENTE: ING. GABRIEL SALINAS CALLEROS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de Administración Escolar, en el sentido que se imprima en lugar visible de cada ejemplar del trabajo escrito, el título de este.

Asimismo, le recuerdo que para optar por el título profesional, es necesario haber acreditado el 100% de los créditos establecidos en el plan de estudios, haber realizado el Servicio Social de acuerdo con la Legislación Universitaria y haber aprobado el examen de comprensión de lectura de un idioma extranjero, en términos de lo dispuesto por el Consejo Técnico.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria, Cd. Mx., 19 de septiembre 2018

El Presidente del Comité de Titulación de Ingeniería Geológica

DR. ENRIQUE ALEJANDRO GONZÁLEZ TORRES

ccp Coordinador de la Carrera
ccp Interesado

Ciudad de México, viernes, 12 de octubre de 2018

Oficio Número: GCDMX-SEDEMA-SACMEX-DG-DEPP-DT-SPI-UDG-1050738/2018
Asunto: AUTORIZACIÓN

**C. DANIELA SANTIAGO LÓPEZ
PASANTE DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNAM**

P R E S E N T E

En atención a su escrito de fecha 24 de septiembre del presente año, en el cual solicita disponer de los datos generados en la exploración de los acuíferos profundos en la cuenca de México, al respecto le comento que **SI SE AUTORIZA** acceder a los datos antes mencionados.

Es importante mencionar, que la información solicitada es de **ACCESO RESTRINGIDO** en su modalidad de **RESERVADA** por lo que el mal uso o difusión de la misma, es motivo de su responsabilidad administrativa o violación a diversas disposiciones legales.

Por otra parte, al término de su tesis en cuestión solicito envíe un ejemplar con los resultados a los que llego y se de crédito a este Órgano Desconcentrado.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

**A T E N T A M E N T E
DIRECTOR TÉCNICO**



ING. MAURICIO J. HERNÁNDEZ GARCÍA

Copias:
Ing. Ramón Aguirre Díaz - Director General - SACMEX
Ing. Federico Mosser H.
Lic. Antonio Carrillo Chirinos - Subdirector de Planeación de Inversión - SACMEX
Ing. Alejandro Escobedo Ramírez - Jefe de la Unidad Departamental de Geohidrología - SACMEX
Archivo de la Dirección Técnica En atención al DG/6369/2018
Archivo de la UDG

MJHG*ACCH*AER*CHR/pihg



Sistema de Aguas de la Ciudad de México
Dirección General
Dirección Ejecutiva de Programación y Proyectos
Dirección Técnica
Subdirección de Planeación de Inversión
Unidad Departamental de Geohidrología

Nezahualcóyotl No.109, 5to. Piso,
Col. Centro, Deleg. Cuauhtémoc C.P. 6080
Tel. 5130 4444 Ext. 1530

AGRADECIMIENTOS

Mi profundo agradecimiento al Servicio de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) por proporcionarme y dejarme usar los valiosos datos que se obtuvieron del pozo profundo Santa Catarina 3A, a través del Ingeniero Federico Mooser y la Maestra Margarita Cruz Almanza para la realización de este trabajo de Tesis. Gracias por el valioso apoyo recibido en este camino y por fortalecerme para empezar un camino lleno de éxito.

Consecuentemente quisiera demostrar mis más sinceros agradecimientos a mi director de tesis Ingeniero Francisco Alejandro Arroyo Carrasco por su inigualable apoyo en la realización de este trabajo de tesis, una persona realmente entregada y paciente en lo que se propone, su conocimiento y guía fue una pieza fundamental para que pudiera desarrollar este trabajo, este trabajo es suyo.

A mis profesores, por ser parte de mi inspiración y alimentar mi pasión geológica e ingenieril día a día durante toda la carrera.

Mis más sinceros agradecimientos al programa de excelencia bécalos y a la beca del Comité de Damas de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México por haberme brindado apoyo económico durante toda la carrera.

A mis amigos, con quienes compartí momentos entrañables a lo largo de la carrera, gracias por tantas prácticas de campo juntos, risas, tareas en "equipo" y los repastos de estudio previo a cualquier examen, gracias a todos, pero en especial a Moni, Martha, Gis, Sandra, Zara, Román, Yael, Gabo y Rodrigo por ser mis mejores amigos y apoyarme siempre.

A mi Familia, Antonia, Pedro, Jorge, Anita y Carlos por todo su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, me dieron el apoyo suficiente para no declinar cuando todo parecía complicado e imposible, gracias por creer en mí, son mi mayor inspiración y motivo para seguir dando lo mejor de mí día a día. Mamita Toña y Papito Jorge todo mi amor y agradecimiento por permitirme llegar hasta aquí.

A mi alma máter la UNAM y en especial a la Facultad de ingeniería.

Gracias Dios

Por mi raza hablará mi espíritu.

Daniela

RESUMEN

Se presenta una nueva área de oportunidad en la evaluación de acuíferos profundos. Para su conocimiento es necesario conjuntar además de los conceptos tradicionales de la hidrogeología, el concepto de petrofísica, ya que es necesario evaluar propiedades como la porosidad, permeabilidad y conductividad hidráulica.

Los acuíferos profundos requieren cambiar la forma tradicional de la interpretación hidrogeológica, al tener que considerar un análisis de mayor detalle de la geología y de la petrofísica. Es necesario conocer o identificar el tipo de ambiente de depósito ya que es parte importante para determinar la porosidad y por ende la capacidad de almacenamiento de agua que pueda tener un acuífero.

En este trabajo se hace la reconstrucción de la columna litológica de un pozo profundo con apoyo de los registros de pozos de resistividad y radiactividad natural, tomando en consideración el contexto geológico regional de la zona evaluada (estratigrafía), así como también se obtuvieron parámetros como Factor de Formación para estimar la porosidad y permeabilidad de las rocas volcánicas.

El trabajo que se realizó tomó como base la necesidad de evaluar las condiciones hidrogeológicas del acuífero intermedio de la Cuenca del Valle de México, específicamente en el Acuífero de la Zona Metropolitana Ciudad de México. El pozo se ubica en las inmediaciones del vivero Nezahualcóyotl en la alcaldía de Xochimilco y tuvo una profundidad de 2 030 m; a partir de los 1 080 m el pozo presentó pérdida total de lodo. Ante esto, el reto de este trabajo fue desarrollar una metodología que permitiera estimar las condiciones litológicas de lo que correspondería al acuífero intermedio, así como también y con base en la respuesta de los registros de resistividad estimar la productividad del pozo.

Con este tipo de análisis los responsables de la toma de decisiones tendrán más elementos para justificar la exploración y obras que se vayan a realizar en el acuífero intermedio.

En la medida que se integre mejor la información hidrogeológica y se consideren otras áreas de conocimiento el éxito exploratorio será más favorable y la inversión económica de nuevas perforaciones será justificada.

ABSTRACT

Nowadays a new field of opportunities for the evaluation of deep aquifers has been created. For its knowledge, is necessary to combine, in addition to the traditional concepts of hydrogeology, the concept of petrophysics, due to it is necessary to evaluate properties such as porosity, permeability and hydraulic conductivity.

The deep aquifers require to change the traditional form of hydrogeological interpretation, having to consider a more detailed analysis of geology and petrophysics. It is necessary to know or to identify the kind of deposit environment due to is an important part to determine the porosity and therefore the storage capacity of water that an aquifer could have.

In this work the reconstruction of the lithological column of a deep well supported by the wells logs of resistivity and natural radioactivity, taking into consideration the regional geological context of the evaluated area (stratigraphy), as well as parameters such as Formation Factor to estimate the porosity and permeability of volcanic rocks.

The work that was performed was based on the need to evaluate the hydrogeological conditions of the medium or second aquifer of the Valley of Mexico Basin, specifically in the Aquifer of the Metropolitan Zone of Mexico City. The well is located in ide of the Vivero Nezahualcóyotl in the municipality of Xochimilco and had a depth of 2 030 m; from 1 080 m the well presented total mud loss. Given this, the challenge of this work was to develop a methodology that would allow us to estimate the lithological conditions of what would correspond to the second aquifer, as well as, based on the response of the resistivity log, estimate the productivity of this well.

With this type of analysis the decision-makers will have more elements to justify the exploration and the develop of new of engineering projects that will be carried out in the second aquifer in the Valley of Mexico Basin.

As soon as more hydrogeological information will be integrated and other fields of knowledge will be considered, exploratory success will be more favorable and the economic investment of new drilling will be justified.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE	1
1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Objetivos	5
1.3. Alcance	5
2. CAPÍTULO. MARCO FÍSICO	6
2.1 Margo geográfico	6
2.1.1. Localización	6
2.1.2. Fisiografía.....	6
2.1.3. Hidrología de la zona de Xochimilco	9
2.1.4. Clima.....	10
2.2 Marco geológico.....	10
2.2.1. Marco geológico regional.....	10
2.2.2 Marco geológico local	12
2.2.3 Estratigrafía.....	13
2.2.4 Geología estructural	19
2.3 Marco geofísico regional	23
2.3.1 Antecedentes de los estudios geofísicos	23
2.4 Marco hidrogeológico.....	25
2.4.1 Antecedentes hidrogeológicos de la cuenca.....	25
2.4.2 Calidad del agua de la cuenca	28
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN GENERADA EN LA PERFORACIÓN DEL POZO SANTA CATARINA 3A	30
3.2. Columna litológica basada en la descripción de muestras de canal	31
3.3. Análisis de los registros geofísicos del pozo	34
3.3.1. Registro de resistividad con arreglo inductivo AIT	34

3.5.3. Obtención de valores de saturación y resistividad del agua de formación.....	56
3.5.4. Obtención de valores de permeabilidad (estimada)	58

CAPÍTULO 4. CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS 62

4.1. Definición de unidades hidrogeológicas en la columna litológica	62
.....	71
4.2. Correlación estratigráfica con pozos profundos cercanos.....	72
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	74
5.1. Conclusiones	74
5.2. Recomendaciones	78

BIBLIOGRAFÍA 79

ANEXOS 81

□ Diseño del pozo.....	81
□ Primer aforo realizado en el Santa Catarina 3A	82
□ Segundo aforo Pozo SC3A.El segundo aforo del pozo SC3A realizado del 08 al 09 de marzo de 2018, obteniendo los siguientes datos durante su operación:	83

1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Hace 60 años explotó el crecimiento demográfico la Ciudad de México, convirtiéndola en el año 2018 en la novena urbe más poblada del mundo con 8.851 millones de habitantes. Como consecuencia de la explosión demográfica y desde el punto de vista hidrogeológico, las zonas de recarga han sido cubiertas por grandes extensiones de asfalto y concreto reduciendo la capacidad de infiltración de agua al subsuelo; asimismo, su acuífero ha reducido su capacidad de almacenamiento.

La cuenca del Valle de México está dividida en tres acuíferos: el superior, fuente actual de abastecimiento de agua, compuesto principalmente de material aluvial y derrames de rocas volcánicas; un intermedio, compuesto de rocas volcánicas de origen riolítico; y el profundo por rocas sedimentarias. La caracterización anterior se basa en la descripción de cortes litológicos de pozos realizados a raíz de los terremotos del 19 y 20 de septiembre de 1985, que si bien su perforación fue con fines geotécnicos y además, con exploración geofísica aplicando la técnica sísmica de reflexión, que se usa en la industria petrolera, dieron la pauta para que en el año 2013 se iniciara un proyecto de investigación, con fines hidrogeológicos profundos a través de la ejecución de nuevas campañas de exploración sísmica de reflexión y perforación de cuatro pozos profundos con profundidades de más de 1 800 m. El objetivo de dichos pozos fue caracterizar hidrogeológicamente las condiciones de los acuíferos medio y profundo. En esta etapa, además de cambiar la forma tradicional de perforación, también se cambió la forma de adquisición de información e interpretación de la información hidrogeológica.

A la fecha, la extracción de agua en el primer acuífero ha superado a la recarga provocando una sobre explotación y necesidad de importar agua para el abastecimiento de la población de otras cuencas.

La escasez y el suministro de agua son algunas de las problemáticas más importantes que se enfrenta la ciudad. En las alcaldías más pobladas (Iztapalapa con una población de más de 1 827 868 de habitantes y Gustavo A. Madero con 1 164 477 habitantes) este problema se agrava al presentar poca disponibilidad el acuífero, mala calidad y una pobre infraestructura hídrica, solucionando parte de la problemática a través del abastecimiento por tandeo y con pipas, lo que incrementa también el costo del agua. El agua está en el epicentro del desarrollo sostenible y es fundamental para el desarrollo socioeconómico,

la energía y la producción de alimentos, los ecosistemas saludables y para la supervivencia misma de los seres humanos, (ONU 2018). La disponibilidad de agua potable de un país está íntimamente relacionada al desarrollo económico del propio, el agua de calidad es sinónimo de progreso, salud y calidad de vida.

El caudal actual de agua en la Cuenca del Valle de México es de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ y la demanda se incrementa cada día. (Mazari 1993). Para abastecer a la población que se asienta en el territorio del acuífero Ciudad de México, se necesita un caudal promedio de $32 \text{ m}^3/\text{s}$. Las fuentes externas de abastecimiento al Valle de México son el sistema Cutzamala que provee el 25%; el sistema Lerma el 12% y el 8% se obtiene del acuífero Cuautitlán-Pachuca, el caudal restante se obtiene de fuentes superficiales y subterráneas dentro de la Ciudad de México. Debido a que la infraestructura de abastecimiento es antigua y las condiciones del suelo en los primeros metros presenta compactación y movimientos diferenciales del terreno; esta se ve dañada con roturas lo que origina que más del 40% del agua que se distribuye se pierda por fugas. Alrededor del 70% de la ciudad tiene menos de 12 horas de agua disponible por día. Según datos de SACMEX, una persona de la CDMX gasta alrededor de 300 litros por día, tres veces más de lo que recomienda la ONU. Tomando en cuenta la cantidad de habitantes en la ciudad y el gasto promedio, en la ciudad se necesitan al menos: 2 655 300 000 de litros por día ($2\,655\,300 \text{ m}^3/\text{día}$), sin tomar en cuenta la población flotante. El suministro es de $2\,764\,800 \text{ m}^3/\text{día}$, sin tomar en cuenta las pérdidas por la falta de mantenimiento a la infraestructura hidráulica.

Es un hecho que la ciudad necesita más agua, pero esta no debe de venir de un acuífero en sobreexplotación ya que, además genera grietas, hundimientos y subsidencias (caso de la Ciudad de México) que ponen en riesgo la vida de los habitantes. El riesgo geológico de la extracción de agua en un acuífero más profundo se minimiza dadas las condiciones geológicas que se presentan. Lo anterior, ha dado motivo a buscar nuevas alternativas de abastecimiento de agua para depender en menor medida de las fuentes externas y sustente su crecimiento socioeconómico con sus propios recursos naturales.

La idea de los pozos profundos para abastecimiento de agua no es nueva, Israel cuenta con un pozo profundo a 1 500 m de profundidad; en Texas también se presenta un pozo con 1 722 m de profundidad; en México se han perforado pozos a más de 1 800 m en la región de Monterrey y recientemente en la Ciudad de México, a raíz del programa

de exploración, se tiene un pozo de 2 030 m de profundidad (Santa Catarina 3A) y provee un gasto de 125 lps; suministra 10 800 m³/día, (10 800 000 lts/día) beneficiando alrededor de 36 000 personas. Con el pozo Santa Catarina 3a la alcaldía de Iztapalapa aportará sólo un 1.9% del total del agua que demanda para satisfacer las necesidades de la población.

Sólo con fines de comparación y ver la magnitud de la obra este pozo equivale a 11 edificios de la torre Latinoamericana.

El agua es el motor que mueve el desarrollo de una ciudad y un país; su disponibilidad es garantía de prosperidad por lo que el conocimiento hidrogeológico, en este caso del acuífero de la Ciudad de México es de vital importancia al ser el motor principal del desarrollo del país. Con base en lo anterior y con la disponibilidad de información se abre un área de oportunidad en la hidrogeología para evaluar las condiciones que presenta el acuífero de la Ciudad de México a profundidades superiores a los 1 000 m, proponer una metodología de análisis de la información que permita aprovecharla de mejor y sobre todo incrementar el éxito exploratorio en nuevas perforaciones profundas que se realicen en este acuífero.

1.2. Objetivos

Geológico

Validar la columna geológica propuesta por varios autores.

Hidrogeológico

Definir las condiciones hidrogeológicas que se presentan en el acuífero de la Ciudad de México por debajo de los 1 000 m de profundidad, a través de una nueva metodología de evaluación.

Geofísico

Proponer una metodología de análisis de información de los registros geofísicos de pozos en rocas volcánicas.

1.3. Alcance

Al contar con información actualizada y validada permitirá tomar decisiones técnicas y económicas en cuanto a la extracción de agua subterránea del acuífero intermedio de la Ciudad de México.

2. CAPÍTULO. MARCO FÍSICO

2.1 Margo geográfico

2.1.1. Localización

El pozo Santa Catarina 3 se ubica en la alcaldía de Xochimilco, de la Ciudad de México, en las coordenadas 14Q 491371.00 E, 2133584.00 N en las inmediaciones del vivero Nezahualcóyotl. El acceso al sitio del pozo se encuentra por la avenida Canal de Chalco en dirección Sur. Figura 1.



Figura 1 Localización del área de estudio (Imagen tomada de Google Earth)

2.1.2. Fisiografía

La Cuenca de México se ubica en la Provincia Fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) considerado un arco volcánico continental, dentro de la subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac. La cuenca es una extensa planicie lacustre con altitud promedio de 2 240 msnm rodeada por sierras volcánicas. Se trata de una cuenca endorreica o cerrada como es perceptible en la Figura 2; al norte está limitada por la Sierra de Pachuca, al este por la Sierra Nevada, al oeste por la Sierra de las Cruces

y al sur por la Sierra Chichinautzin. Abarca parte del estado de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, México y la Ciudad de México.



Figura 2 Límites de la Cuenca del Valle de México (Wikimedia Commons, 2018)

El área de estudio se encuentra en la Ciudad de México y topográficamente hablando en un sistema de tofoformas de llanura lacustre.

Sobre la superficie resaltan en el relieve elementos volcánicos, tales como el Cerro de la Estrella con una altura de 2 450 msnm (metros sobre el nivel del mar), la Sierra de Santa Catarina con una altura de hasta 2 820 msnm, Sierra de Guadalupe con una altura de 2 730 msnm, Peñón de los Baños y Cerro de Chapultepec 2 280 msnm, entre otros. Estas unidades sobreyacen a secuencias alternadas de derrames volcánicos básicos e

intermedios en sus extremos Este, Oeste y Norte, que a su vez sobreyacen a la parte basal que corresponden a calizas cretácicas.

En la zona a evaluar las características geomorfológicas que sobresalen en el área de Xochimilco, Figura 3, están representadas por zonas planas o lacustres, de lomas y de transición. La ubicación del pozo Santa Catarina 3A (SC3A) encuentra sobre una llanura lacustre, cerca del área de estudio también concurren la llanura lacustre salina y la llanura aluvial. Los elementos que sobresalen en zonas cercanas son la sierra de Santa Catarina en dirección Este-Oeste paralela a la sierra Chichinautzin. *La fisiografía de Xochimilco y alrededores se encuentra dada por lomerío de basalto, lomerío de basaltos con cráteres, lomerío de ignimbritas, meseta asociada con malpaís, sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados, vaso lacustre, vaso lacustre de piso rocoso o cementado y vaso lacustre salino.* Figura 4. (Gil Frausto 2015).

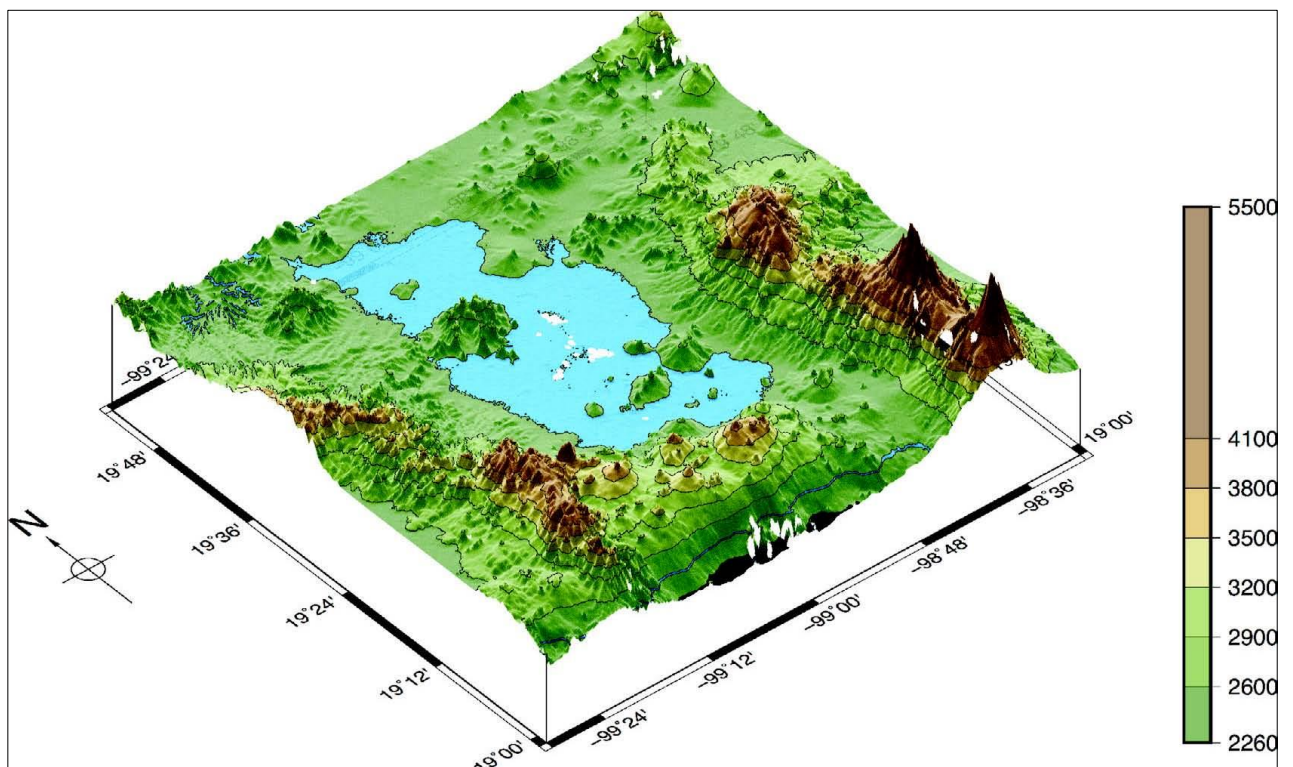


Figura 3 Topografía del Valle de México incluyendo el contorno cerrado a 2258 m correspondiente al cuerpo de agua. La barra de colores muestra la elevación en metros sobre el nivel del mar. (Tomada de Ruiz-Angulo y López-Espinoza, 2015)

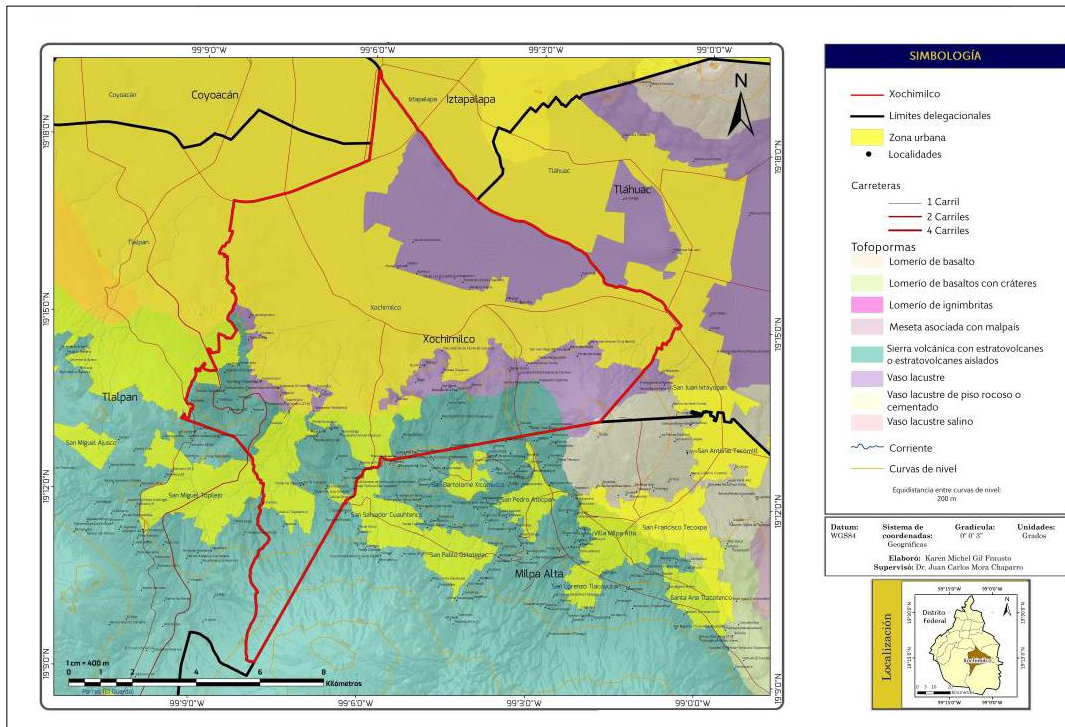


Figura 4 Fisiografía de la Delegación Xochimilco. (Gil Frausto, 2015)

2.1.3. Hidrología de la zona de Xochimilco

La Ciudad de México pertenece a la región Hidrológica No. 26 Alto Pánuco. Se encuentra dividida por zonas:

- I. Xochimilco
- II. Churubusco
- III. Ciudad de México
- IV. Texcoco (De manera parcial)

La zona hidrológica I, Xochimilco, abarca los ríos que descienden de la sierra de Chichinautzin, la cual presenta formaciones basálticas de gran permeabilidad. Los principales ríos de la zona son: San Gregorio, Santiago, San Lucas y San Buenaventura. Tiene una superficie aproximada de 522 km², la longitud de las corrientes es de 46.0 km. En esta zona se carece de información de escurrimientos, los datos disponibles de las dos estaciones hidrométricas consisten básicamente en medición de niveles en las lagunas de Xochimilco y Tláhuac, las corrientes mencionadas tienen un régimen perenne,

sus cauces son estables. Los principales canales que se encuentran dentro de esta zona son: Cuemanco, Nacional, Bordo, Apatlaco, Chalco y De Garat, los canales Cuemanco y Apatlaco no se encuentran entubados. (CONAGUA 2015).

La estación meteorológica El Guarda que es la que se encuentra más cercana a la zona de estudio, se reportan 1 254.4 milímetros de precipitación promedio por año, 901.0 mm en el año más seco y 2 873.0 mm del año más lluvioso, con datos recopilados de 1965-2009, siendo julio el mes con más lluvias y diciembre con el menor número de precipitaciones.

2.1.4. Clima

El clima predominante de la zona de estudio en Xochimilco es templado subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura promedio es de 16°C, la temperatura mínima de 14°C y la máxima de 17.6°C.

2.2 Marco geológico

2.2.1. Marco geológico regional

La evolución geológica de la Cuenca de México se describe a partir del Cretácico, los primeros en hacer una descripción completa fueron F. Mooser, Vásquez-Sánchez y Jaimes-Palomera en sus trabajos de 1989. Debido a la reciente información recabada en las perforaciones de los pozos profundos que se realizaron después del terremoto de 1985, para tener mayor conocimiento del subsuelo de la ciudad de México, en dos pozos se encontraron unidades cretácicas a profundidades que van desde los 1 500 hasta los 2060 m (Pozo Mixhuca), las calizas encontradas corresponden a las formaciones Morelos, Cuautla y Mexcala, cuyas características corresponden a facies de cuenca, gracias a los fósiles que han encontrado en ellas las han podido colocar en edades que van desde el Albiano hasta Maastrichtiano. Esto implica que los mares epicontinentales del Cretácico llegaron hasta la parte central de lo que ahora es México. Estas secuencias fueron plegadas en el transcurso del Maastrichtiano al Eoceno Temprano, como consecuencia de la orogenia Laramide. (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera 1989)

Consecuentemente, sobre las calizas se encuentran discordantemente una sucesión clástica continental del Eoceno-Oligoceno denominada Formación Balsas, después vinieron los primeros depósitos volcánicos compuestos por intercalaciones de flujos de

coladas basálticas y andesíticas con edades que van de 19.6 a 16.3 ± .3 Ma (Ferrari, y otros 2003) fechadas en los pozos Copilco, Tulyehualco y Mixhuca. Esta información infiere que la actividad volcánica empezó a partir del Mioceno Inferior y no en el Oligoceno como varios autores habían propuesto previamente, después en el Plioceno Inferior fue el segundo episodio de acreción de la sierra Chichinautzin y la génesis del Popocatepetl e Iztaccíhuatl, todas estas unidades presentan una variación composicional. En la actualidad han originado una morfología de “abanicos”, debido a la actividad de las estructuras volcánicas y debido a la erosión de estas mismas. Con este evento la Cuenca de México se cerró por completo permitiendo así el acumulamiento de agua para formar la zona lacustre donde tuvo origen la gran Tenochtitlan actual Ciudad de México.

Sobre la superficie descansan depósitos aluviales y lacustres. Los últimos corresponden a lagos en la parte centro y sur de la cuenca. El depósito lacustre fue provocado por el azolve de dos antiguos flujos que drenaban hacia el sur, uno hacia al valle de Cuernavaca y el segundo al valle de Cuautla (Mooser y Molina, Nuevo Modelo Hidrogeológico para la Cuenca de México 1993), este azolve de la cuenca tuvo dos episodios de cierre, el primero ocurrió en el Mioceno Inferior por las emisiones volcánicas que conforman la formación Tepozteco, ocurridas desde Tepoztlán por el sur hasta Malinalco en el poniente. La segunda ocurrió en el Pleistoceno Superior por la acreción de la sierra de Chichinautzin, los estudios en rocas volcánicas arrojan edades de 600 000 años, ambos cierres produjeron su propia cuenca lacustre al norte con arcillas, el primero de ellos produjo las arcillas conocidas como Taximay y el en el segundo cierre las arcillas y arenas fluviales sobre las cuales está edificada la Ciudad de México, la Figura 5 ejemplifica la configuración geológica de la Cuenca hecha por F. Mooser en 2013.

El conocimiento de la geología de la Cuenca del Valle de México establece las bases, con otras herramientas hidrogeológicas, la naturaleza, distribución y funcionamiento de los acuíferos (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera 1989)

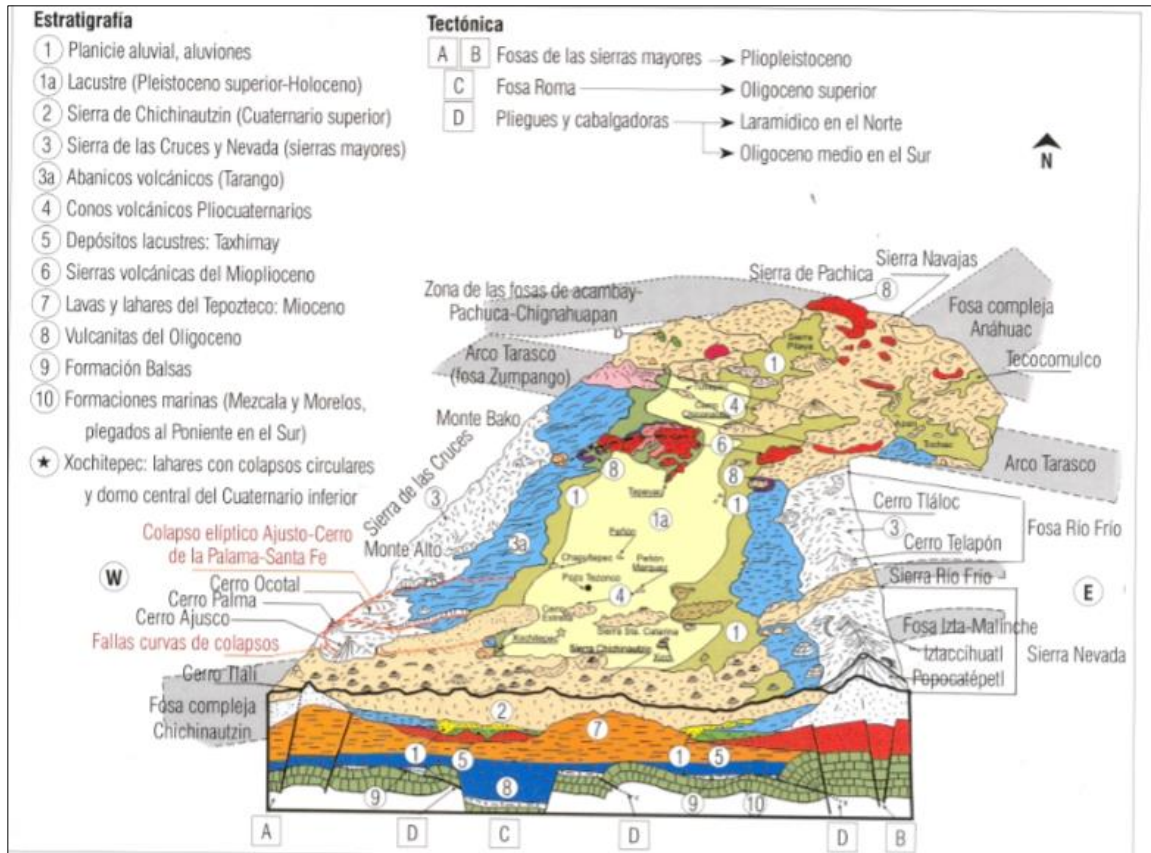


Figura 5 Geología de la Cuenca de México. (Mooser, 2013)

2.2.2 Marco geológico local

La alcaldía Xochimilco posee una superficie de 122 km², su altitud media es de 2 275 msnm. Al sur de la planicie lacustre se encuentran los cerros de Xochitepec, Tzompol, Tlacuallelli y Teuhtli, los cuales forman parte de la sierra Chichinautzin e impiden que el flujo de agua superficial sea drenado hacia el sur.

En las cartas geológicas disponibles de la Ciudad de México E14-A39 y en la publicada en nuevo mapa de 1996 de F. Mooser (Mooser, Montiel y Zúñiga, Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla. 1996); clasifican la mayor parte de la superficie del área de estudio como Depósitos Lacustres Cuaternarios, a pie de monte de los cerros pertenecientes a la sierra Chichinautzin, se encuentran Depósitos Aluviales; por su parte los cerros corresponden a material volcánico como basaltos y también más ácidos como las riolitas del cerro Xochitepec, a su vez existen diversos trabajos que aportan en detalle el conocimiento de la superficie de la alcaldía Xochimilco; en la Figura 6 se encuentra un mapa geológico a nivel regional de Gil Fausto en 2015.

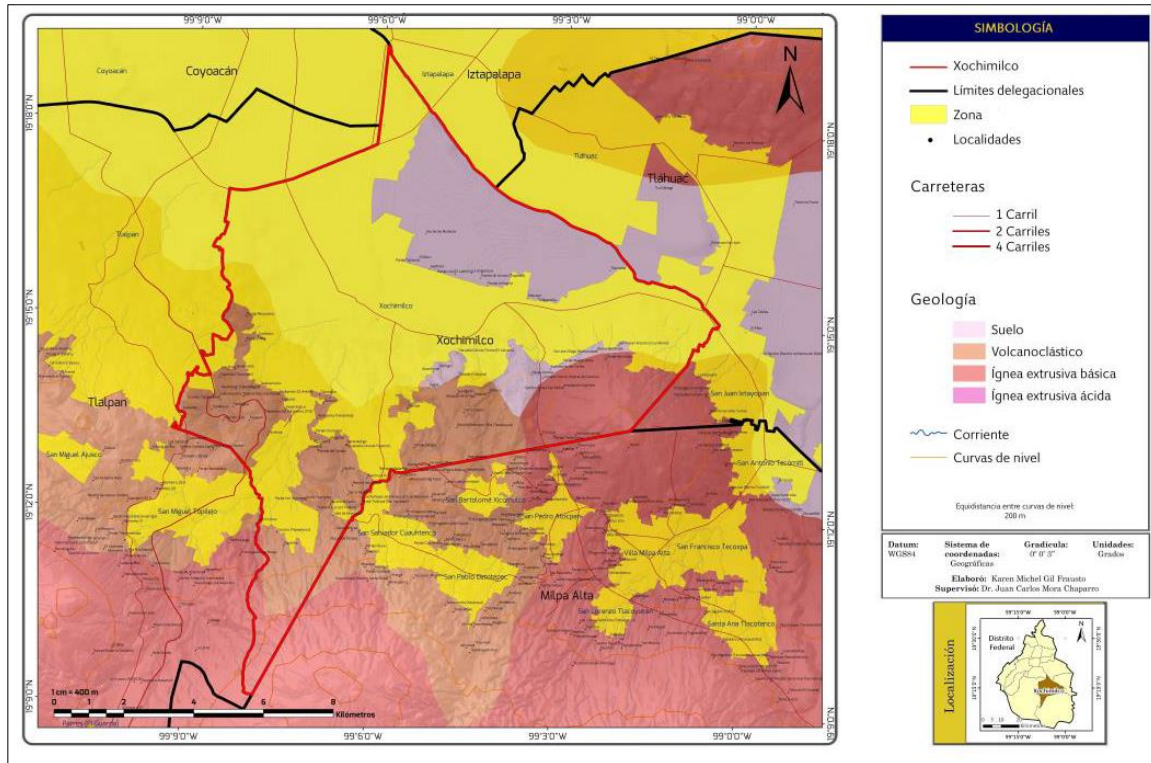


Figura 6 Geología del área de estudio. (Gil Frausto, 2015)

2.2.3 Estratigrafía

Se han elaborado múltiples trabajos con el fin de proponer una estratigrafía de la Cuenca de México, uno de los primeros en elaborar un trabajo complejo de este tipo fue Fries en 1956, describiendo la geología de la porción sur de la Cuenca de México y estado de Morelos, consecuentemente en su trabajo de 1960 formalizó varios nombres de las formaciones abajo mencionadas de acuerdo al código estratigráfico de la Comisión Americana sobre la Nomenclatura Estratigráfica, agregando sólo a la formación Acahuizotla, también existieron otros autores como Schalaepfer, Geyne, Vázquez-Sánchez, Jaimes-Palomera y F. Mooser quienes hicieron aportaciones importantes en el conocimiento de estratigrafía de la Cuenca de México. A continuación, las unidades litológicas que corresponden o se encuentran en el Valle de México.

Formación Xochicalco, Kx (*Cretácico Temprano, Aptiano*) Propuesta por Fries en 1960, se trata de una sucesión de calizas de color gris a negro en capas que van de delgadas a medianas, con superficies de estratificación planas, hacia la cima de la formación se encuentran en mayor cantidad lentes de pedernal, corresponde a depósitos de turbiditas, su espesor excede los 500 m, su base no está expuesta.

Formación Morelos, Km (*Cretácico Temprano Tardío, Albiano-Cenomaniano*) Propuesta por Fries en 1960, se compone de una interestratificación de calizas microcristalinas ligeramente margosa de estratos gruesos y masivos propios de un ambiente de plataforma somera, también se encuentran estratos de dolomía con nódulos de pedernal y fósiles silificados. En la base de esta formación se encuentra anhidrita laminada, su contenido faunístico radica en equinoideos, esponjas, corales, gasterópodos, ostras, biostromas de rudistas y material biogénico fragmentado. Su espesor varía de 250 a 1 000 m.

Formación Cuautla, Kc (*Cretácico Tardío, Cenomaniano-Coniaciano*) Cuenta con tres facies de cuenca, banco y litoral del Cenomaniano Tardío al Coniaciano, las facies de banco domina en la región de la Cuenca de México, las líneas sísmicas realizadas después del 85 revelan que la cima de esta unidad se encuentra distribuida junto con la formación Morelos en el sector meridional de la cuenca, la litología de esta facies se caracteriza por ser una sucesión gruesa de capas de caliza de estratificación mediana a gruesa de tipo "bahamita". La formación Cuautla fue identificada en los pozos de Mixhuca-1 y Tulyehualco-1 en profundidades de 1 575 y 2 100 m respectivamente.

Formación Mexcala, Kmx (*Cretácico Tardío, Cenomaniano-Maastrichtiano*) Propuesta por Fries en 1960, la define como una interestratificación de lutita, limolita y calizas basales de color gris oscuro con estratos de 10-20 cm, hacia la cima de esta unidad se encuentran interestratificados grauvacas o areniscas y conglomerado fino con líticos de calizas y también cuarzo y otros minerales de origen ígneo, sobre los planos de estratificación de las areniscas se encuentran algunas estructuras como *ripples*, y marcas o huellas irregulares, en las capas superiores de la unidad disminuyen los granos carbonatados, tiene una variedad de fósiles en los que resaltan la presencia de amonoideos, pelecípodos y microfauna, Ontiveros-Tarango en 1973 sugiere un ambiente de depósito en cuencas marginales de profundidades

moderadas, diversos autores han reportados distintos espesores, que varían desde los 67 m hasta los 2 000 m.

Granito Colotepec, Tgc (*Paleógeno, Eoceno*) Se encuentra en el extremo sudoccidental intrusionando a la formación Xochicalco en el núcleo de un anticlinal de Colotepec. (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera 1989). Descrito como una monzonita cuarcífera con una edad de +- 50 MA por De Cserna en 1974.

Grupo Balsas, Teob (*Paleógeno, Eoceno-Oligoceno*) Propuesta por Fries en 1960. Este grupo corresponde a un conjunto de rocas con litología clástica muy variada que se presentan en la cuenca del río Mezcala-Balsas ubicada en el centro sur y suroeste de México, consiste de un conglomerado oligomítico calizo compacto con matriz limo arcillosa cementada por calcita y óxido de hierro, de estratificación masiva y espesor máximo de 500 m cubiertas por una secuencia de hasta 2 000 m de espesor de arcillas, lodolitas y arenas delezables, localmente incluye depósitos clásticos que contienen yeso y caliza lacustre lenticular además de derrames basálticos y en la parte superior se presentan intercalación de tobas riolíticas, esta unidad fue descrita en el pozo Texcoco-1 y en el Roma-1, las formaciones Atzala, Chontalcuatlán, Cuayuca, Huanjtlán, Pie de Vaca, Tepetlapa, Toba Teacalco y Toba Piedras negras constituyen este grupo.

Rocas volcánicas del Mioceno temprano, Tomv (*Neógeno, Mioceno*) Antes rocas volcánicas del oligoceno Tardío-Mioceno Temprano. Se agrupan las secuencias volcánicas que por sus características se diferencian de las rocas extrusivas del Grupo Balsas y del Mioceno Medio-Tardío, dichas rocas afloran profundamente erosionadas y fracturadas en la sierra Xochitepec, en los pozos Copilco-1, Mixhuca-1, Roma-1 se encontraron derrames basálticos con espesores entre 390 y 1 750 m. *La composición varía de basalto a ríodacita, constituyen secuencias de tobas líticas, cristalinas y vítreas, brechas tobáceas y aglomerados. Estos depósitos piroclásticos están en la parte superior interestratificados y/o cubiertos por derrames lávicos. Estas secuencias volcánicas contienen capas de clásticos aluviales de espesor promedio de 6 m lo que indica un tiempo de reposo en la actividad volcánica.* (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera 1989)

Rocas extrusivas del Mioceno Tardío, Tmv (*Neógeno, Mioceno*) Se les llama así a las rocas volcánicas de composición ácido e intermedia en su mayoría, sus

cuerpos originales son domos, conos o calderas, esta unidad revela una afección tectónica con orientación W-E, su espesor máximo oscila los 1 000 m. En la porción sur de la cuenca, se encuentran principalmente en los cerros El Elefante, El Judío, Los Remedios y la base de la sierra de Guadalupe, la base de la sierra de las Cruces, el Cerro Patlapiche y en algunos otros afloramientos en el norte de Texcoco, en el norte la base de la sierra de Tepoztlán, están constituidos por tobas, brechas volcánicas y lavas predominantemente andesíticas que en algunos lugares se encuentran interestratificadas con brechas volcánicas, esta unidad aflora en el pozo Texcoco-1, en el Pozo Roma-1, Mixhuca-1, en el Tulyehualco y en el pozo Copilco-1 en profundidades que van entre los 633 y 1 740 m de profundidad.

Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano, Tpv (Neógeno, Plioceno) Una multitud de productos del Plioceno dominan la Cuenca de México, En esta unidad se encuentran las Andesitas Ixcalco con un control tectónico N-NW que ayuda a colocarlas en esta edad, durante ese periodo se desarrollaron cuencas endorreicas someras las cuales permitieron el depósito de lacustres en Tlaxcala, Tula, San Juan del Río, debajo del Tepozteco en Morelos y en Chalma estado de México, posiblemente estos depósitos están inter digitados con los cuerpos volcánicos de andesitas oscuras en la fosa de Acambay, basaltos de Olivino situados en los núcleos de las sierras de Tepoztlán, Xochitepec y de Guadalupe, sobre ellos se desarrollaron numerosos estrato-volcanes pequeños a medianos andesíticos y dacíticos que cargan generalmente domos ácidos; constituyen lo que nombran sierras Menores, destacan las sierra de Tepoztlán, Guadalupe, Patlapiche, Pitayas y Xochitepec, los elementos dómicos de esta última son cerros el Mirador, Xicalco y Tlalpuente, sepultadas en su mayor parte por la unidad cuaternaria de lavas del Chichinautzin. Esta unidad termina con la emisión de poderosas secuencias de flujos piroclásticos Tepozteco, elementos andesíticos a menudo porfiríticos con fragmentos de pómez, proveniente de distintos centros eruptivos, este último fue reconocido por Mooser en 1989 en las líneas sísmicas con espesores de 600 m debajo de Xochimilco.

Formación las Otomí, Tpo (Neógeno, Plioceno) Vázquez-Sánchez y James Palomera (1989) propusieron agrupar con esta formación a los productos volcánicos emitidos durante principios del Plioceno Tardío que se encuentran en el occidente de la Cuenca de México, en lo que se conoce como la sierra de Monte Alto, se caracteriza por estar formada mayormente por depósitos piroclásticos principalmente de ceniza

en secuencias de surges de cristales seguidas por flujos piroclásticos de ceniza ya sea cristalina o vítrea en ocasiones de apariencia lenticular, en menor proporción afloran lavas de composición andesítica a dacítica únicamente en las partes altas de la sierra Monte Alto, intercalada con brechas volcánicas con texturas que varían desde faneríticas a porfíricas de grano fino, a esta unidad se le estima un espesor de 1 300 m.

Rocas volcánicas máficas del Plioceno tardío, Tpb (Neógeno-Cuaternario, Plioceno- Pleistoceno) Esta unidad la representan rocas máficas cuyos afloramientos se encuentran ampliamente distribuidos en la región septentrional formando mesetas de lava y conos aislados. Esta unidad está constituida por derrames de lava interestratificados con capas de poco espesor de brechas volcánicas y/o con piroclastos que se consideran como depósitos piroclásticos y clastos aluviales del plioceno. La composición de las lavas varía de basáltica a andesítica, fueron fechadas por el método K-Ar por Cantagrel y Robin y les asignaron una edad entre 2.5 y 1.5 Ma.

Formación las Cruces, Tpc (Neógeno, Plioceno) La sierra de las Cruces alcanzó su máximo desarrollo en el Pleistoceno pero empezó su actividad desde el Plioceno (Mooser, Montiel y Zúñiga, Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla. 1996), a esta unidad se le solía incluir las rocas volcánicas de la sierra Monte Alto, pero debido a que Sánchez y Palomera (1989) propusieron la Formación Otomí para dichas rocas, estas no se incluirán más en la formación las Cruces. Se encuentra distribuida en el límite sudoccidental de la cuenca de México, esta unidad fue denominada antes como Formación Tarango para referirse a las secuencias aluviales con productos piroclásticos, los depósitos piroclásticos que identificaron Vázquez-Sánchez y James Palomera (1989) fueron *pómez plinianas, secuencias de surges ya sean planares o masivos, cristalinos, vítreos y en ocasiones con pómez cubiertas por flujos piroclásticos generalmente no soldados de cenizas cristalinas con o sin fragmentos y bloques accidentales y/o juveniles, de composición heterogénea, en algunos casos estos piroclastos se encuentran cubiertos o interestratificados de material aluvial y paleocanales fluviales* (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera 1989) las lavas de esta unidad se encuentran intercaladas con brechas en las partes altas de la sierra de las Cruces, en algunos casos culminadas con domos, consisten de andesita de textura afanítica-porfírica, dacitas de lamprobolitas o pigeonita de textura

afanítica-porfirítica, esta unidad fue identificada en el pozo Copilco-1 entre las profundidades 25 y 510 m.

Depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno, Tppc (*Neógeno, Plioceno*)
Nuevamente Vázquez y James Palomera (1989), propusieron esta unidad, para designar a los depósitos no diferenciados relacionados genéticamente con la actividad piroclástica y fluvial de todo el Plioceno, forman extensas llanuras y piedemontes aluviales, en el subsuelo de la porción meridional de la cuenca dichos depósitos constan de tobas, brechas volcánicas y aglomerados, con horizontes de conglomerados, arenas y arcillas y están acumulados en fosas tectónicas (graben de Chalco) y rellenando amplios valles surcados en rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno.

Formación el Pino, Qpp (*Cuaternario, Pleistoceno*) Con este nombre, Vázquez Sánchez y Jaimes Palomera (1989) propusieron llamar a las rocas volcánicas principalmente máficas que forman los cerros la Estrella, el Pino, Chimalhuacán, Chiconautla, Gordo y otros aislados, así como los campos volcánicos de Tezontepec-Otumba. Todos los anteriores con geoformas correspondientes a conos cineríticos terminales, volcanes escudo y de amplias coladas lávicas principalmente en bloques, con espesor del orden de 750 m. Estas rocas están constituidas por flujos de lavas intercalados con delgadas capas de tefra no consolidada de un tipo de volcanismo estromboliano, los derrames tienen una composición de basaltos a andesitas de grano fino a medio con textura afanítica-porfirítica, también consta de traquitas porfiríticas.

Formación Tláloc, Qt (*Cuaternario, Pleistoceno-Holoceno*) La formación Tláloc son sucesiones de composición preferente andesítica, latítica y dacítica, principadas por pómez de caída, "surges", flujos de ceniza, de pómez y de bloques, intercalados y/o cubiertos por derrames lávicos y que finalizan con efusiones dómicas que forman parte de la sierra de Río Frío.

Formación Iztaccíhuatl, Qi (*Cuaternario, Pleistoceno-Holoceno*): Son sucesiones principalmente efusivas iniciadas por derrames lávicos y finalizando en domos de composición que varía de basáltico-andesítico a dacítico, el espesor total

se desconoce, pero en el volcán Iztaccíhuatl expone un espesor aproximado de 2 500 m.

Formación Popocatepetl, Qp (*Cuaternario, Pleistoceno-Holoceno*): Edifica al estratovolcán Popocatepetl, en el extremo sudoriental de la Cuenca de México, está compuesto por un *blast* piroclástico, brechas de avalancha cubiertas por una alternancia de lavas con pómez pliniana, flujo de ceniza, piroclásticos de caída y de surges. La composición varía de andesítica-basáltica a dacítica, el espesor total se desconoce, pero con base en las altitudes de los afloramientos, se le infiere un espesor máximo del orden de 3 500 m.

Formación Chichinautzin, Qc (*Cuaternario, Pleistoceno-Holoceno*): Sánchez Vázquez y Jaimes Palomares (1989) proponen aplicar este nombre a todo el volcanismo monogenético principalmente estromboliano con características y edad similar en la región de la Cuenca de México y sus alrededores, se compone por derrames lávicos conteniendo tefra de caída y de "surges" piroclásticos, la composición es principalmente andesítica-basáltica. El espesor de esta unidad varía de un sitio a otro, no obstante, el espesor máximo se le ha asignado de 1 800 m.

Depósitos aluviales, Qal (*Cuaternario, Holoceno*). Material clástico aluvial con lentes locales de piroclásticos interdigitado con formaciones del Cuaternario, afloran en las llanuras aluviales al norte y sur de la cuenca, se encuentran ampliamente distribuidos rellenando amplios valles socavados en depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno, sus espesores máximos son alrededor de los 500 m.

Depósitos lacustres, Qla (*Cuaternario, Holoceno*). Son los sedimentos lacustres, arcillas mismas y arenas, con lentes locales de piroclastos interdigitados con formaciones cuaternarias que están relacionados con la actividad volcánica del estrato volcán Popocatepetl y de la sierra Chichinautzin que se depositaron en un ambiente lacustre, extendida con una altitud promedio de 2 200 m, los espesores varían desde 30 a 300 m

2.2.4 Geología estructural

La Cuenca del Valle de México evidencia una fuerte influencia estructural ya que se necesitan una dinámica de tipo extensional para que el magma pueda surgir, por lo tanto, las fallas superficiales en la cuenca se extienden a profundidad.

Durante el Maastrichtiano al Eoceno, la Orogenia Laramide dejó sobre las rocas cretácicas lineamientos y pliegues recostados al oriente y poniente, algunos con cabalgaduras, los ejes de los pliegues están orientados hacia el N-NE, los esfuerzos laramídicos estaban dirigidos hacia el oriente, en el Oligoceno se tienen registradas algunas estructuras como fosas, la fosa Mixhuca, que aflora en el poniente de la Cuenca de México, corta la mitad Oriental de la caldera del cerro del Tigre, es probable que se extienda debajo de la sierra Chichinautzin, más al sur adquiere un rumbo SSW, y la fosa Texcoco, su límite oriental es una falla que afecta la caldera de Tlaixpan, las cuales definió Mooser en 1991; se infieren fueron producto de la subducción en el Pacífico oriental de la placa Farallón entre el Oligoceno y principios del Mioceno; en la Cuenca de México debido a la gran diferencia de altitud de la cima de rocas cretácicas que se manifiestan en los pozos Mixhuca-1 y Roma-1 sugieren la presencia de una falla normal con el bloque de techo hundido hacia el poniente, inferida con un rumbo NW (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera 1989), para el oligoceno tardío sitúan una falla normal localizada en el norte de Ticomán con un rumbo N45°W, y una falla del mismo sistema cerca de Xalostoc con rumbo al NE, temporalmente coinciden con la orogenia manifestada en la Sierra Madre Occidental por el plegamiento de la secuencia andesita inferior del Paleoceno-Eoceno.

En el Mioceno, Mooser resalta que los fracturamientos y fallas tienen una dirección W-E, destacan las fosas de Pachuca, Zempoala y Barrientos y varios sub arcos volcánicos como el de Barrientos-Patlapiche, el de Zempoala-Singuilucan y el de Ajacuba-Pachuca, todos estos obedecieron un arreglo W-E subparalelo a la placa de Cocos en el Pacífico Sur de México, Fries (1960) también cartografió fallas normales con el mismo patrón, dirección W-E que cortan desde rocas del Cretácico y Oligoceno; del Plioceno hasta el Cuaternario las sierras de Guadalupe, Tepoztlán y Chimalhuacán son afectadas por fallas normales que cortan a las formaciones del Mioceno al Cuaternario con direcciones indefinidas pero con un rumbo preferencia E-W y otras NE-NW formando una especie de par conjugado, existen también fallas normales sepultadas que se infieren a los alineamientos de conos cineríticos monogenéticos de la formación Chichinautzin y el Pino, también tienen alineaciones el Peñón del Marqués y Chimalhuacán, esto corresponde a zonas tensionales propias de un ambiente volcánico, las unidades antes mencionadas se alinean en superficie con la falla inferida de la sierra de Santa Catarina (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera 1989)

Una falla normal que cruza la Ciudad de México con dirección preferencial NW-SE, a la que se ha denominado Falla de Mixhuca, cuyo bloque caído corresponde al segmento poniente, y un sistema de fallas y lineamientos regionales con orientación NE-SW denominado zona de cizallamiento Tenochtitlan, del que forma parte del sistema Chichinautzin – Santa Catarina. El entorno estructural de la Cuenca de México, así como los pozos profundos perforados, permiten inferir que la Cuenca de México está constituida por un amplio sistema de pilares y bloques escalonados, que definen la base de la depresión como una superficie irregular Figura 7. (González Torres, y otros 2015).

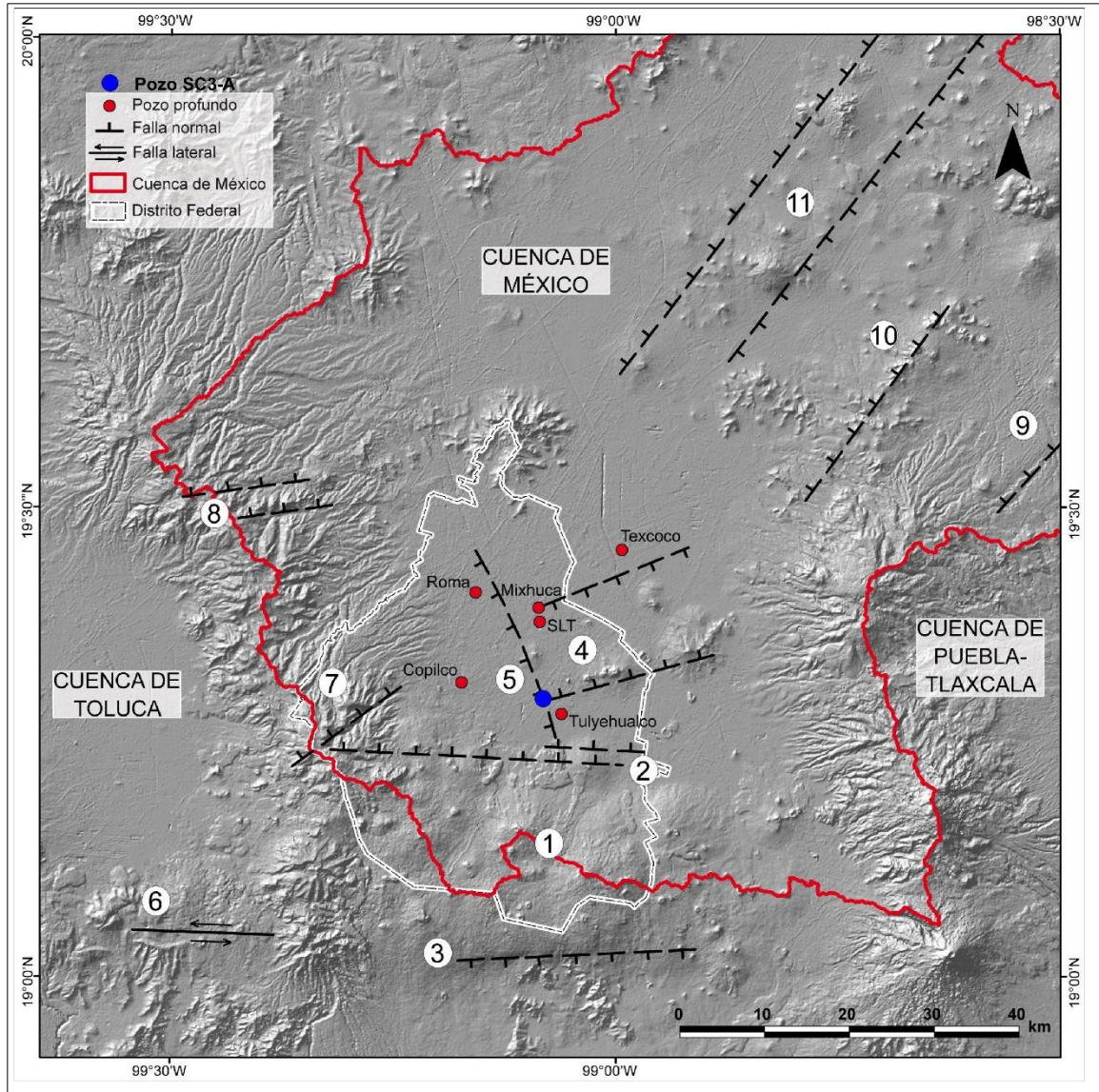


Figura 7 Modelo de elevación de la Cuenca de México en la que se indican con círculos rojos la ubicación y nombre de los seis pozos profundos perforados en la Cuenca de México: Copilco-1; Roma-1; Tulyehualco-1; Mixhuca-1; Texcoco-1 y SLT (San Lorenzo Tezonco). Se muestran algunas de las estructuras geológicas citadas como son: (1) Pilar (*horst*) de Chichinautzin (Siebe *et al.*, 2004b), (2) Sistema de fallas de Xochimilco y Xicomulco (García-Palomo *et al.*, 2008), (3) sistema de Fallas de la Pera (Delgado-Granados *et al.*, 1995; Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2005), (4) Graben de Santa Catarina (Arce *et al.*, 2013a) (5) Falla Mixhuca (Pérez-Cruz, 1988), (6) Sistema de Fallas Tenango (Norini *et al.*, 2006), (7) Falla Contreras (Arce *et al.*, 2015), (8) Sistema de Fallas de Ixtlahuaca y Otomí (García-Palomo *et al.*, 2008), (9) Segmento sur del Sistema de Fallas Apan-Tlálloc, (10) Falla Texcoco y 11) Sistema de fallas Tizayuca (García-Palomo *et al.*, 2002). Modificado de González Torres, Morán Centeno, Mori & Martini, 2015.

2.3 Marco geofísico regional

2.3.1 Antecedentes de los estudios geofísicos

En los años 1950-51 el Instituto Nacional de la Investigación Científica encargó al Ing. Guillermo Hernández Moedano los estudios gravimétricos del Valle de México (Molina Berbeyer 1957) Con el fin de saber el tipo de roca que se encontraba en el basamento de esta cuenca. El Ing. Hernández Moedano supuso que la roca basal correspondía a andesitas que se localizaban por debajo de los 1 000 m de la superficie en promedio; su topografía es irregular, quedando la Ciudad de México localizada en una de las depresiones subterráneas que forman el fondo rocoso del valle. La empresa COMESA en 2014 reprocesó los datos gravimétricos con una densidad de 1.7 g/cm^3 , los resultados permitieron contrastar las anomalías causadas generalmente por fallas regionales o cuerpos volcánicos en un mapa de la primera derivada de la anomalía de Bouguer. Figura 8.

Después de los sismos de 1985, se vio la necesidad de conocer la configuración del subsuelo de la gran urbe, Pemex realizó 18 líneas sísmicas para conocer la configuración de las estructuras del subsuelo. En el 2013, se realizaron tres más por la empresa COMESA; estas dieron la información interpretada por Pérez Cruz y Mooser que el basamento estaba compuesto por calizas, la existencia de calizas fue confirmada tras la perforación de los pozos Mixhuca-1, Tulyehualco-1. Figura 7

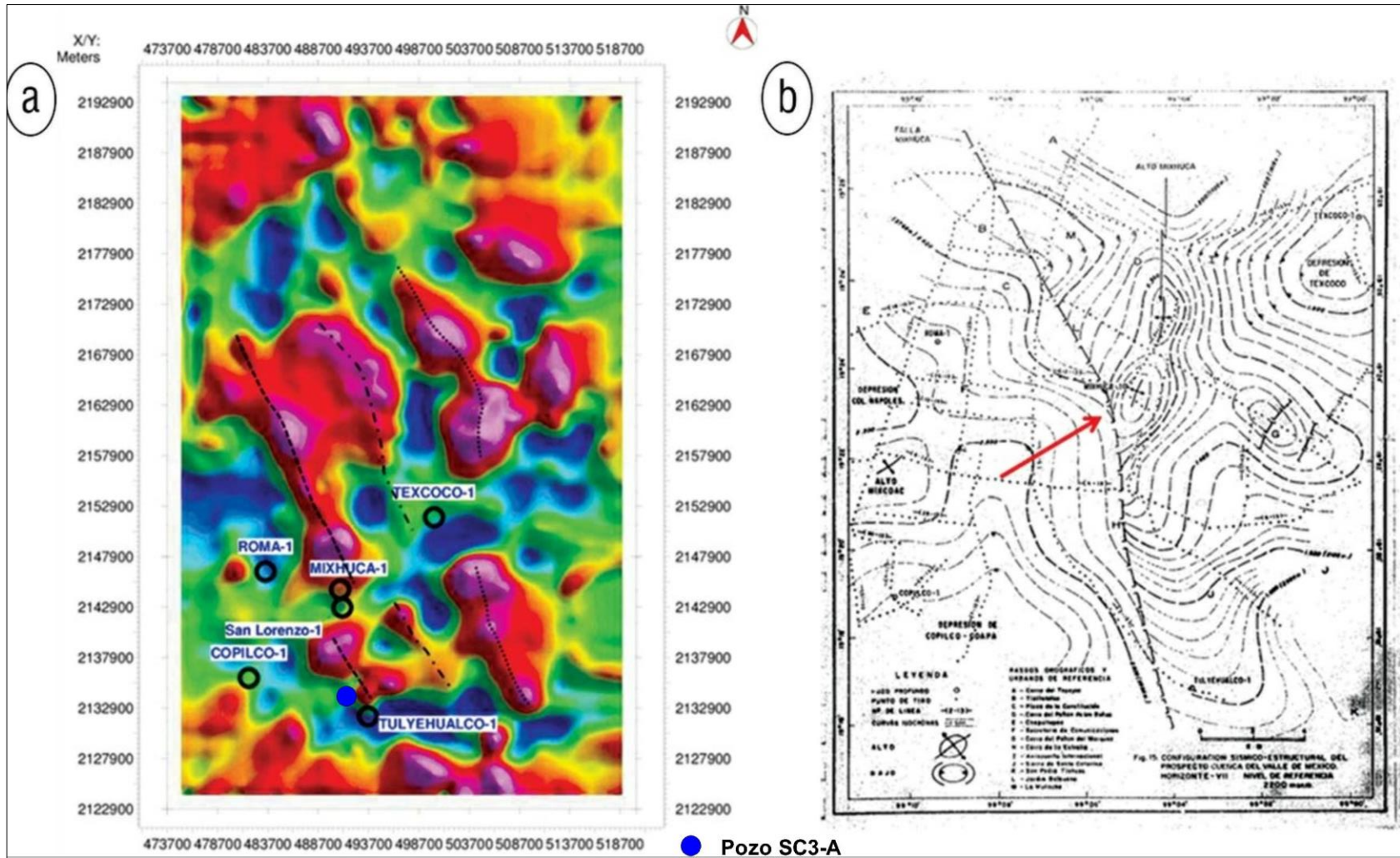


Figura 8 Mapa de la primera derivada de la anomalía simple de Bouguer y configuración sísmico estructural de la Cuenca del Valle de México Tomada de Compañía Mexicana de Exploraciones (2014)

2.4 Marco hidrogeológico

2.4.1 Antecedentes hidrogeológicos de la cuenca

La cuenca del Valle de México se encuentra cubierta por lagos desde su cierre hasta su drene en 1789, el abastecimiento de agua para la ciudad fue mediante manantiales hasta 1847; cuando se tuvo la necesidad de extraer agua del subsuelo, Pane y Molteni perforaron los primeros pozos de hasta 105 m de profundidad, 10 años después se habrían excavado 168 pozos más, que habían resultado artesianos (Santoyo 2005). Varios autores se han dedicado a estudiar las condiciones hidráulicas del subsuelo de la Ciudad de México, entre los primeros en desarrollar una configuración hidrogeológica de las rocas que subyacen a la Ciudad de México fueron Ortega y Farvolden en 1989, Figura 9 y Federico Mooser con Claudio Molina en 1993, Figura 10. A raíz del sismo de 1985, se llevó a cabo la exploración sísmica de reflexión en el sur de la Cuenca de México, antes mencionada; el resultado fueron 18 sismogramas los cuales fueron interpretados primeramente por PEMEX, después en detalle G. Pérez Cruz en su tesis de Maestría y F. Mooser para CFE, en conjunto para la fundación Barros Sierra. Gracias a estas interpretaciones surgió un conocimiento mayor del subsuelo de la Cuenca de México y con ello su comportamiento hidráulico.

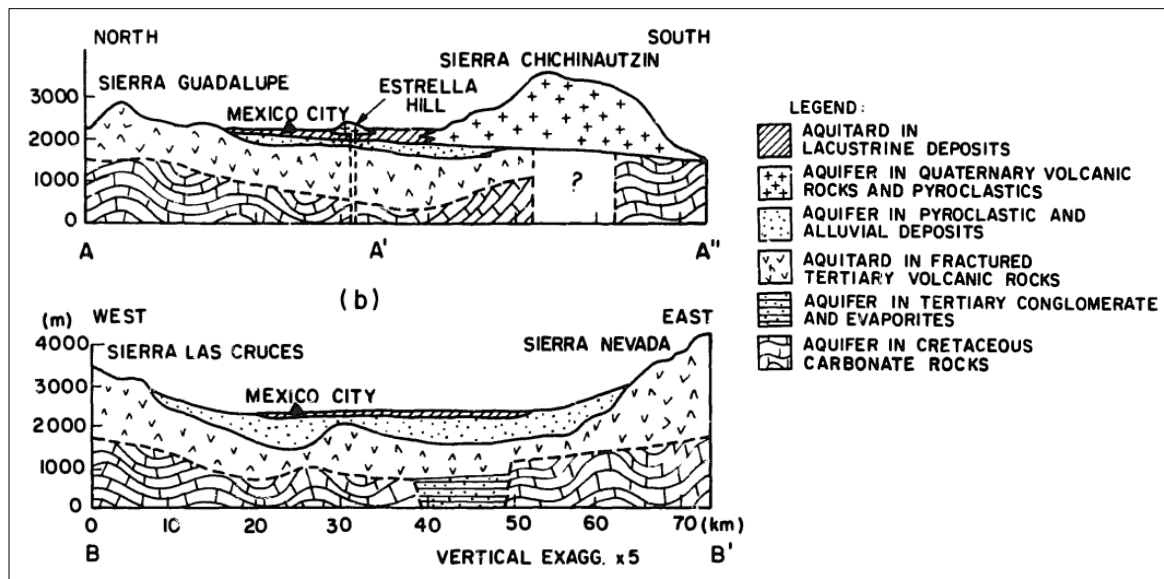


Figura 9 Secciones hidrogeológicas (a) Sierra de Guadalupe-Sierra Chichinautzin, (b) Sierra de Las cruces - Sierra Nevada. Ortega & Farvolden (1989)

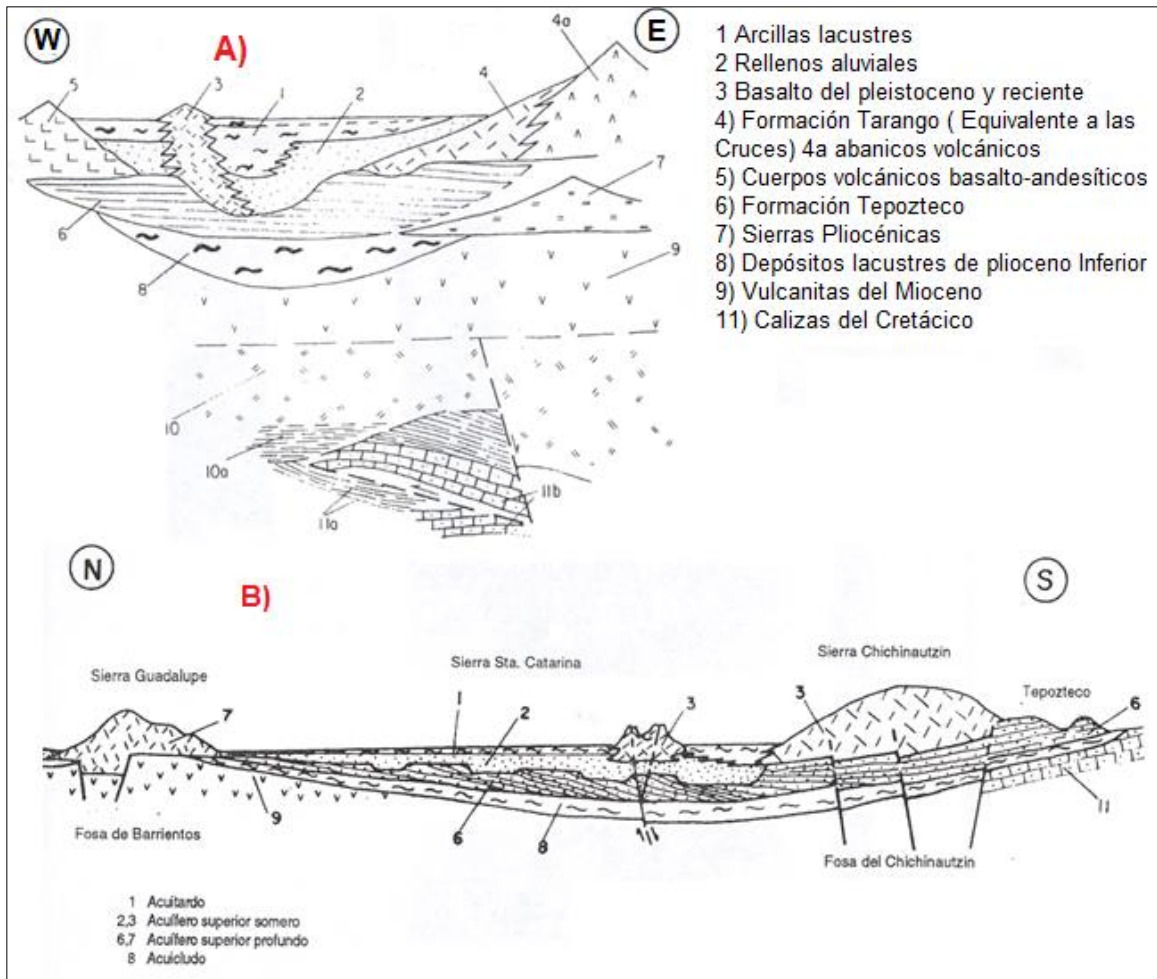


Figura 10 B) Sección Hidrogeológicas Norte-Sur y A)E-O de la Cuenca de México. Tomada de Nuevo modelo hidrogeológico para la Cuenca de México (Mooser y Molina, Nuevo Modelo Hidrogeológico para la Cuenca de México 1993),

La configuración hidráulica del subsuelo de la Cuenca de México revela la existencia de tres acuíferos: el superior, medio y el profundo (Mooser y Molina, Nuevo Modelo Hidrogeológico para la Cuenca de México 1993); Los acuíferos están separados por dos elementos muy poco permeables:

1. Depósitos Lacustres del Plioceno
2. Formación Balsas y las margas y lutitas del Cretácico Superior.

Los depósitos del Plioceno consisten en cenizas volcánicas fenobasálticas oscuras o de pómeceas blancas, como toda pómez emitida por una explosión volcánica consiste tanto de polvo fino, grueso arenas y hasta lapilli, al caer en el agua del lago se transforma con el tiempo mayoritariamente a arcilla, limo o arena fina. Por ello la formación, que por la sucesión de erupciones resulta finamente estratificada. (Mooser , Geología del Valle de México y otras regiones del país, 2018), la segunda capa poco permeable corresponde a la formación Balsas la cual contiene conglomerados cementados y arcillas con grandes espesores que ayudan de capa impermeable junto con las margas cretácicas.

El primer acuífero, que es el que se aprovecha, se encuentra confinado, en su parte superior por las arcillas lacustres superficiales y en su parte inferior por los depósitos lacustres del Plioceno. Está formado, sobre todo por elementos granulares, rellenos aluviales, la formación Tarango, lavas basálticas y andesíticas medianamente permeables, al tener arcillas de manera irregular sobre toda su superficie le sirve como confinante o semiconfinante, se clasifica como semiconfinado o confinado. En 1857, se realizaron mediciones en pozos del centro de la Ciudad de México, los cuales operaban con artesianismo, se encontró que producían un promedio de 1.5 l/s por pozo; posteriormente se intensificó la perforación y se sabe que en 1870 funcionaban unos 1 000 pozos (Santoyo Villa, Ovando Shelley, y otros, Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México 2005) todo este drenaje ha ocasionado una pérdida de presión del agua en los poros e inició el drástico hundimiento en toda la ciudad.

El acuífero superior de la zona metropolitana se encuentra ubicado en el sur poniente de la Cuenca del Valle de México y ocupa el 17% de toda la cuenca. La Ciudad de México depende fundamentalmente del acuífero superior para el abastecimiento del agua potable. Los pozos con los que se extraen agua actualmente oscilan van desde los 100 hasta los 400 m de profundidad

El primer acuífero es conocido formalmente como el Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México es recargado por infiltraciones de la precipitación, actuando como áreas de recargas más importantes las sierras circundantes. La precipitación media anual varía de 400 a 600 mm en la parte baja de la cuenca, en los lomeríos circundantes la precipitación está entre 700 y 1 000 mm y en las sierras que limitan la cuenca las precipitaciones son mayores de 1 000 mm anuales. Por tanto, las entradas de flujo

horizontal son las más importantes, se calcula el volumen de entrada horizontal total de 279 026 000.0 m³/año.

Las salidas corresponden a evapotranspiración, descargas naturales como el manantiales y bombeo. En el último estudio de la disponibilidad de agua en el acuífero de la Ciudad de México publicado por CONAGUA en 2018, se tienen reportados un total de 830 de aprovechamientos con una extracción total de 1,073.858 Mm³/año. El cambio de almacenamiento se calcula mediante la resta de las entradas menos las salidas de los volúmenes de agua, por tanto, el resultado es un déficit de -561.058 Mm³/año. De esta forma numérica se determina que al acuífero se le extrae casi el doble de su recarga natural. El acuífero está siendo sobreexplotado.

El acuífero medio está formado por el conjunto de vulcanitas del Mioceno, para Vásquez-Sánchez las unidades rocas volcánicas correspondientes del Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano, rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío corresponderían al acuífero medio. La fuerte compresión a la cual están sometidas estas formaciones las hace esencialmente impermeables; sin embargo, su falta de permeabilidad primaria se compensa por la permeabilidad secundaria, producida por el tectonismo que las afecta. (Mooser & Molina, Nuevo Modelo Hidrogeológico para la Cuenca de México, 1993). Se clasifica como un acuífero confinado.

El acuífero profundo está conformado por las calizas cretácicas del basamento, las cuales también se encuentran fracturadas y falladas; dichas características propician la creación de carsticidad con buena permeabilidad secundaria.

2.4.2 Calidad del agua de la cuenca

En las zonas de mayor permeabilidad de la Cuenca del Valle de México se requiere mayor atención debido a que representan las zonas de recarga natural y gran cantidad de asentamientos que carecen de recolección de aguas negras; canales de drenaje no revestidos que llevan aguas residuales sin tratar y aguas negras de origen doméstico; basureros mal confinados se encuentran expuestos a introducirse al acuífero mediante la recarga y también mediante las fracturas del subsuelo; desechos generados en la Ciudad de México son alrededor de tres millones de toneladas por año, de las cuales más del 95% son efluentes procesados o efluentes tratados que se arrojan al sistema municipal de drenaje. La parte restante, alrededor de 150 000 toneladas son desechos sólidos que en su gran mayoría son enviados a los basureros municipales o bien basureros ilegales.

(National Research Council 1995), además de antecedentes de contaminación con petróleo en la refinería 18 de marzo en 1991 y algunas industrias.

La calidad del agua del primer semestre del año presente año 2018, Figura 11. Obtenida de la página de monitoreo de calidad de agua de SACMEX , indica que, en la alcaldía de Xochimilco y en la mayoría de los pozos de SACMEX en la ciudad el agua no rebasa ningún límite permitido. En alcaldías como Cuauhtémoc y Gustavo a Madero se encuentran las aguas con menor calidad

Delegación	No. Muestras	Lecturas	Promedio	Concentraciones de cloro			
				Cero	Baja	Norma	Exceso
				0	0.1 a < 0.2	0.2 a 1.5	> 1.5
Álvaro Obregón	55	51	0.7	5		46	
Azcapotzalco	139	127	0.68	13	12	102	
Benito Juárez	55	51	0.95	5		46	
Coyoacán	49	43	0.62	5		38	
Cuajimalpa	35	35	0.97			35	
Cuauhtémoc	36	36	0.86			36	
Estado de México	0	0		0	0	0	0
Gustavo A. Madero	140	140	1.18			121	19
Iztacalco	97	97	0.99			97	
Iztapalapa	182	176	0.72	10	5	161	
Magdalena Contreras	77	77	1.22			61	16
Miguel Hidalgo	33	27	0.75			27	
Milpa Alta	9	9	1.22			9	
Tláhuac	49	42	0.73	10		31	1
Tlalpan	17	20	0.84			20	
Venustiano Carranza	52	49	0.79	10		39	
Villa Carmela	0	0		0	0	0	0
Xochimilco	63	44	0.21	15	2	27	
Totales	1088	1024		73	19	896	36
% de cloro residual libre				7.1	1.9	87.5	3.5

Delegación	N°		Promedio de las concentraciones en red					
	Lecturas Cloro	Muestras	NOM - 127 - SSA1 - 2000 (Modificada)					
			pH	Turbiedad	Dureza Total	Cloruros	Hierro	Manganeso
			6.5 - 8.5	5	500	250	0.3	0.15
		UpH	UNT	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
Álvaro Obregón	27	27	7.70	0.51	105.56	13.32	0.100	0.100
Azcapotzalco	49	49	7.03	0.53	174.17	39.84	0.158	0.123
Benito Juárez	33	33	7.82	0.55	95.87	14.08	0.100	0.100
Coyoacán	24	24	7.84	0.50	153.63	26.40	0.100	0.100
Cuajimalpa	21	21	7.73	0.50	75.03	12.72	0.109	0.100
Cuauhtémoc	18	18	7.65	0.86	229.26	97.06	0.100	0.111
Gustavo A. Madero	58	58	7.80	1.49	211.50	93.81	0.103	0.100
Iztacalco	46	46	6.38	0.57	125.52	111.21	0.167	0.096
Iztapalapa	52	52	6.47	0.62	120.17	99.58	0.110	0.131
Magdalena Contreras	31	31	7.57	0.51	118.21	25.94	0.138	0.105
Miguel Hidalgo	25	25	7.95	0.70	115.96	80.99	0.111	0.100
Milpa Alta	5	5	8.31	0.50	198.00	167.24	0.245	0.169
Tláhuac	23	23	6.18	0.68	161.57	145.14	0.112	0.091
Tlalpan	7	7	7.97	0.50	122.03	28.27	0.104	0.100
Venustiano Carranza	20	20	4.29	0.55	152.99	81.65	0.062	0.060
Xochimilco	21	21	8.06	0.50	153.42	29.73	0.102	0.100
Total	460	460						

Figura 11 Calidad del agua del primer semestre del año en curso, 2018. Obtenida de la página de monitoreo de calidad de agua de SACMEX.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN GENERADA EN LA PERFORACIÓN DEL POZO SANTA CATARINA 3A

3.1. Metodología de análisis

La siguiente metodología propuesta para el análisis de las condiciones hidrogeológicas del pozo Santa Catarina 3a fue resultado de la escasez de información tanto litológica como de registros geofísicos del pozo. Se contaba con un muestreo de recortes de roca discontinuo y los registros en los que se basó el análisis fueron muy pocos en comparación a cualquier análisis convencional de registros de pozos.

Las actividades que se realizaron fueron las siguientes:

Columna litológica	Petrofísica
<ul style="list-style-type: none">• Elaboración de la columna litológica con los registros de recortes de roca	<ul style="list-style-type: none">• Obtención del índice de permeabilidad K con base en la respuesta resistiva
	<ul style="list-style-type: none">• Obtención del Factor de formación en función de la profundidad y respuesta resistiva.
	<ul style="list-style-type: none">• Obtención del índice de porosidad con la fórmula de Humble
	<ul style="list-style-type: none">• Análisis diámetro del pozo
	<ul style="list-style-type: none">• Índice litológico
<ul style="list-style-type: none">• Correlación de la columna litológica con pozos aledaños para completar la columna	<ul style="list-style-type: none">• Afinación de la columna litológica de acuerdo con la geometría del pozo
	<ul style="list-style-type: none">• Obtención de índice de permeabilidad K con la fórmula de Timur
	<ul style="list-style-type: none">• Estimación de la columna litológica en intervalos donde no hubo recuperación de muestras

Estas fueron las dos principales tareas ejecutadas para elaborar una correlación de la columna litológica con la petrofísica y realizar un análisis correcto de las condiciones hidrogeológicas.

3.2. Columna litológica basada en la descripción de muestras de canal

Una columna estratigráfica es la representación de las variaciones verticales y cambios horizontales que presentan los cuerpos rocosos en relación con su profundidad. Durante su realización se obtendrán muestras de rocas que permitan estudiar con mayor detalle las características petrológicas y cualquier otro rasgo de interés de cada unidad litológica, este conocimiento permite su reconocimiento en cualquier afloramiento. (Vásquez 2016)

En los pozos, las columnas se desarrollan mediante la descripción de las muestras de canal recuperadas en el lodo en la perforación, por lo tanto saber los cambios horizontales entre las unidades resulta difícil de identificar, otras veces el cálculo del tiempo de retraso puede variar a la profundidad real de donde pertenece la muestra, por ello, la columna litológica elaborada con los recortes de roca puede no ser la más acercada a la realidad por las variaciones de las profundidades, por esta razón los registros geofísicos de pozo son de gran utilidad para calibrar las profundidades de cada unidad y también para conocer más propiedades como la porosidad y permeabilidad.

El primer paso para la construcción de la columna fue realizar las descripciones de los recortes de roca, las cuales fueron facilitadas para la realización de este trabajo de tesis mediante el equipo de trabajo del Ingeniero Federico Mooser. Cabe resaltar que dichas muestras son propiedad del Servicio de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX); Las descripciones se realizaron mediante la observación con lupa 20X y siguiendo la metodología de descripción y clasificación de las rocas ígneas, el siguiente paso fue agrupar los elementos del mismo tipo y proponer unidades litológicas.

Lamentablemente el muestreo de los recortes no fue continuo, Figura 12. Se tomaron recuperaciones en los siguientes rangos: 76-140 m, y se obtuvieron de nuevo desde los 547 hasta los 1 080 ms, los recortes fueron tomados cada 20 m. A continuación, la primera columna litológica propuesta, muestra muchos vacíos, Figura 13.



Figura 12 Recortes de roca del pozo Santa Catarina 3ª las cuales fueron utilizadas en esta fase de construcción de columna litológica. Muestras propiedad de SACMEX.

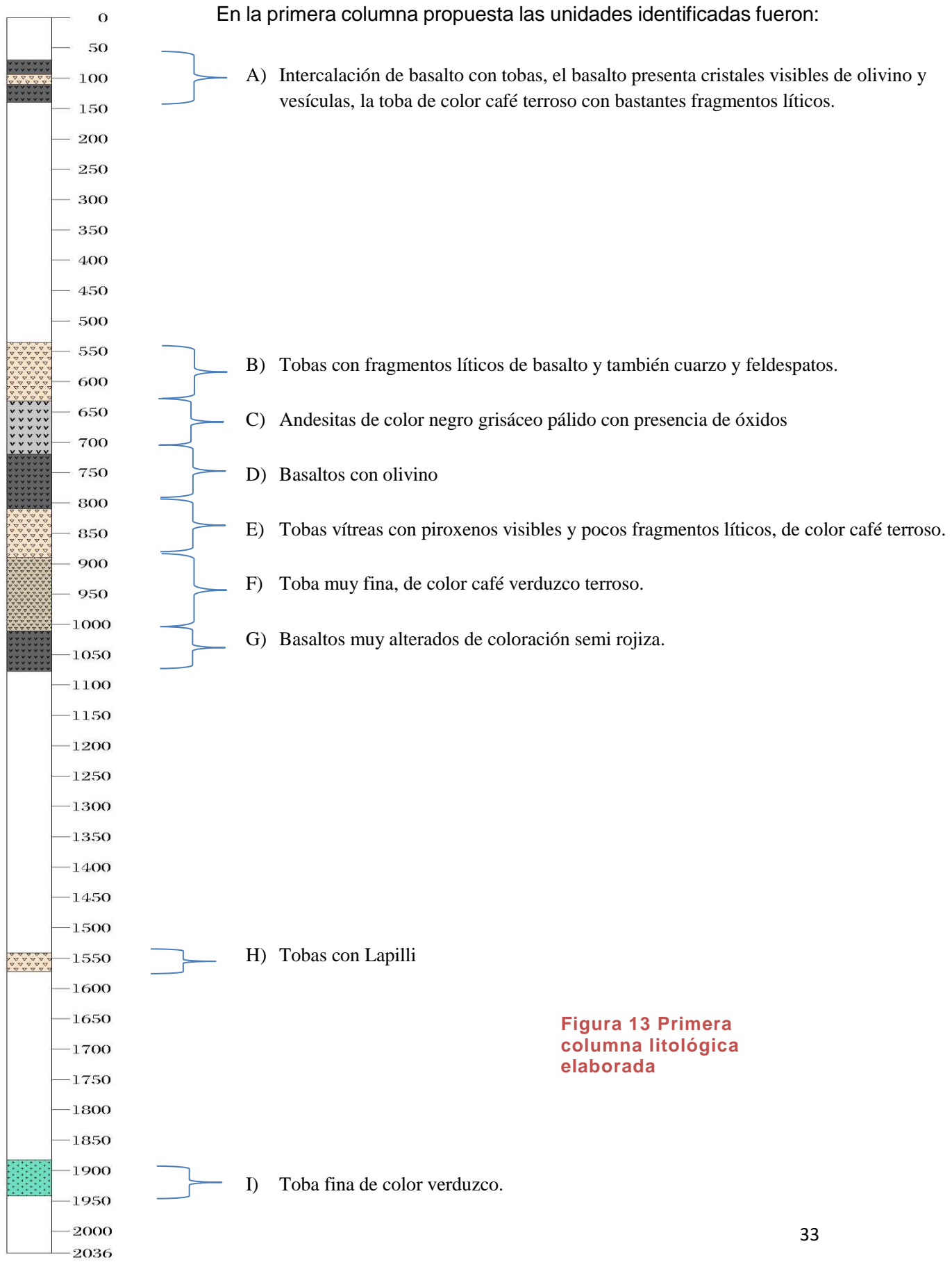


Figura 13 Primera columna litológica elaborada

A simple vista se identifica que esta columna carece de información lo que imposibilita, en primera instancia realizar una interpretación de las condiciones hidrogeológicas por debajo del acuífero superior.

3.3. Análisis de los registros geofísicos del pozo

Los registros geofísicos de pozos son una representación gráfica de la naturaleza de las rocas contra su profundidad. Representa la cuantificación de las propiedades de las rocas, porosidad, densidad, conductividad etc. Los registros fueron grabados digitalmente en archivos en formato *.LAS en donde se guardan valores numéricos que corresponden a distintas profundidades, estos archivos son propiedad del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), y fueron facilitados para la realización de este trabajo a través del Ingeniero Federico Mooser.

En este Pozo se tomaron distintos tipos de registros geofísicos, de resistividad AIT, geometría del pozo GBL, de correlación rayos gamma (Gr), espectrometría de rayos gamma HNGS, registro de temperatura y presión HRT.

La toma de los registros se elaboró en dos sesiones principalmente. La primera tomó lectura en el pozo revestido en el intervalo de 545 md¹ hasta los 1 003 md y la segunda toma de datos fue de 1 074 md hasta los 1 768 md. Por lo tanto, otro reto en la interpretación de los datos fue interpretar el espacio que se presentaba que entre ambas lecturas.

A continuación, una pequeña descripción de las características de los registros anteriormente mencionados que fueron de gran ayuda y que permitieron incluir más unidades a litológicas después de su interpretación.

3.3.1. Registro de resistividad con arreglo inductivo AIT

Tiene cinco curvas de profundidad que van de 10, 20 30 60 y 90 pulgadas de diámetro a profundidad lateral desde el centro del agujero lo que permite identificar la resistividad del lodo, de la zona lavada y de la zona limpia del pozo.

¹(md), metros desarrollados, nomenclatura que utiliza el perforista y equipo de registro de pozo (Pemex)

3.3.2. Geometría de pozo BGL

Como su nombre lo señala obtiene la geometría del agujero y es útil para inferir las condiciones de la roca, esfuerzos, formaciones permeables y no permeables entre otras aplicaciones.

3.3.3. Registro de rayos gamma

Mide la radiación que emana la formación en forma natural. La radiación está asociada a ^{40}K , ^{238}U y ^{232}Th . En las formaciones sedimentarias refleja el contenido de arcilla, es usado como complemento o suplemento del registro de Potencial Natural. En rocas volcánicas el contenido de radiactividad está asociado al tipo (básica, intermedia o ácida); la primera presenta valores bajo y la última valores altos. En este caso, a diferencia de los registros geofísicos que se aplican en rocas sedimentarias, se manejará el concepto de índice litológico, (en vez de volumen de arcilla), a la normalización de la curva de rayos gamma. Hay que mencionar que este registro se considera como un indicador de litología. Su principio de funcionamiento se basa en detectar ondas electromagnéticas de alta energía emitidas espontáneamente por algunos elementos radiactivos.

3.3.4. Registro de espectrometría de rayos gamma

Es una evolución del registro anterior, además de medir la radiactividad de la formación, mide el número de rayos gamma y el espectro o nivel de energía de cada radiación que se produce, permitiendo determinar las concentraciones de Torio, Uranio y Potasio radioactivos.

3.3.5. Registro de temperatura y presión

La temperatura y presión son tomadas por un sensor de presión y temperatura. Se interpreta observando las anomalías o desviaciones con respecto al gradiente de referencia. La mayor parte de anomalías están relacionadas con el ingreso de fluidos al pozo o la salida de fluidos hacia la formación.

3.3.6. Correcciones a los registros geofísicos del pozo

El primer paso para hacer la interpretación de los datos fue efectuar un filtrado en los archivos *.LAS del pozo, la edición de estos archivos se realizó de manera manual en el programa EXCEL ya que se encontraban seccionados y se necesitaba tener un archivo continuo para poder graficarlos y correlacionarlos. Dicho filtrado consistió en promediar

los datos por profundidades ya que por cada metro se tenía alrededor de 8-9 datos y de esta manera se hizo más manejable la información.

En el registro de rayos gamma se realizó un filtrado más, al aplicar un filtro de *Moving Average* con el propósito de eliminar brincos puntuales que presentaba la señal adquirida.

Después de estas adecuaciones se elaboraron las gráficas de todos los registros los cuales serán interpretados a continuación.

3.4. Calibración de la litología con índice de litología de rayos gamma y resistividad

Para calibrar las unidades litológicas y poder incorporar más unidades a la columna litológica se utilizó el registro de rayos gamma junto con los valores de resistividad, apoyado en el trabajo de Caineng Zoe (2013), quien propone graficar la resistividad vs rayos gamma naturales de forma cruzada para identificar la variabilidad de las rocas volcánicas y caracterizar el tipo de evento volcánico. Figura 14. La gráfica cruzada RT-RG permite asociar la distribución de los puntos con base en el tipo de evento volcánico (derrame o explosivo – mayor o menor resistividad) y de acuerdo al origen del tipo de derrame (básico, intermedio, ácido – menor, media y alta radiactividad). Figura 15

El pozo en cuestión fue perforado en rocas volcánicas lo cual favoreció la elección de este método; para realizar la interpretación de este método es necesario tener un registro de inducción (profundidad profunda), más de un metro de penetración en la formación. Se consideró la curva R90 (dato del registro). Este análisis no considera la arcillosidad ya que en algunas rocas volcánicas al ser de composición más ácida presentan mayor cantidad de feldespatos incrementan la radiactividad natural de la roca.

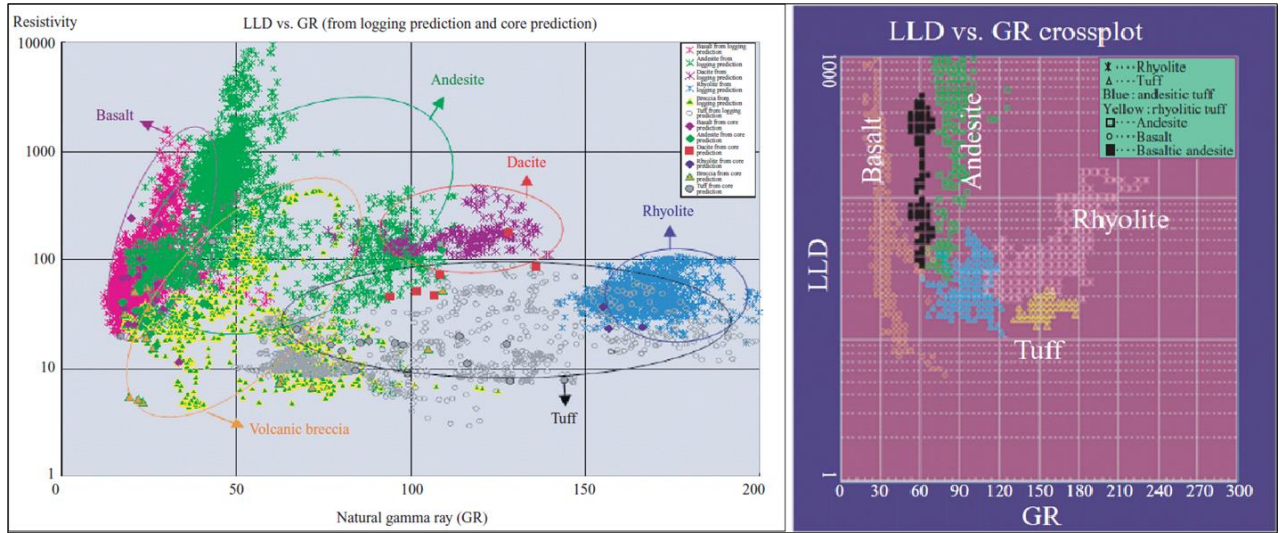


Figura 14 Graficas cruzadas de resistividad VS rayos gamma naturales propuestas por Caineng Zou en 2013

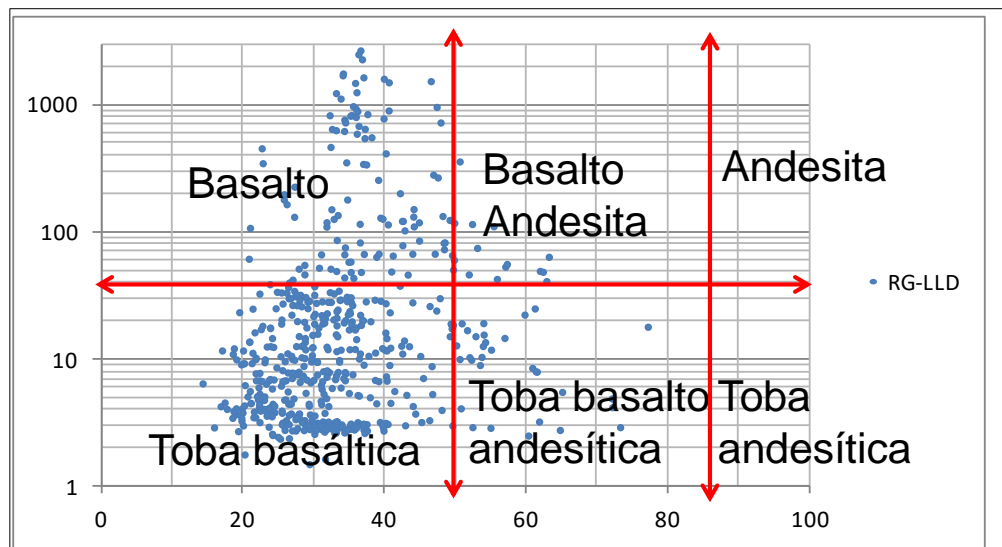


Figura 15 Gráfica cruzada de resistividad vs rayos gamma para el pozo Mixhuca-1. (Arroyo y Mooser, Mixhuca-1 2016)

El siguiente paso fue elaborar una gráfica la cruzada de los datos de resistividad a las 90 pulgadas de profundidad lateral vs los valores de rayos gamma naturales, el primer resultado arrojado fue la siguiente Figura 16.

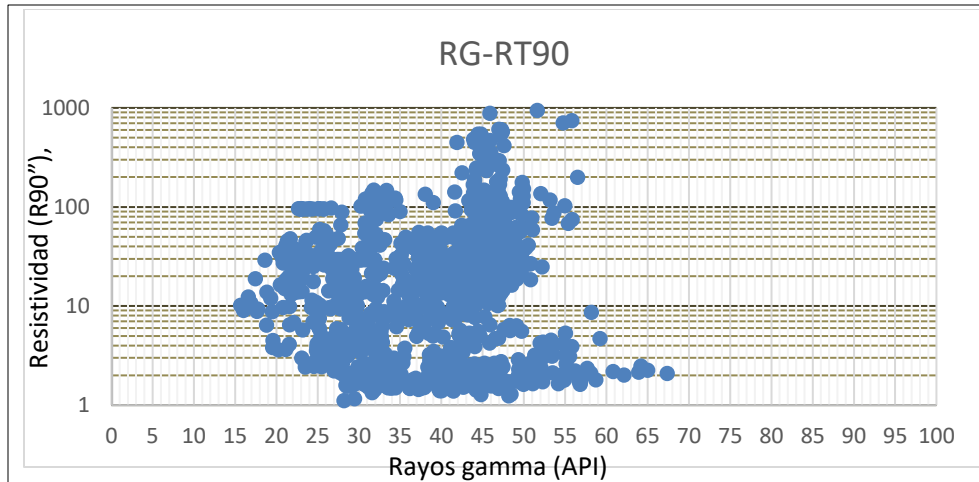


Figura 16 Gráfica cruzada resistividad vs rayos gamma de los datos del SC3A

Los valores de los rangos de la representación de datos fueron elegidos para facilitar su observación como en la Figura 15, ya que con los rangos de visualización que propone Zou, los datos del pozo Santa Catarina 3a no tenían buena visualización. Después de representar los datos se elaboró una separación visual, pero recordando que estaban en función de su respuesta eléctrica y radiactiva, considerando a las tobas con bajo valor de resistividad y las lavas de alta resistividad; así como las rocas volcánicas de composición básica presentan menos reactividad que las ácidas. Se propuso entonces la siguiente categorización:

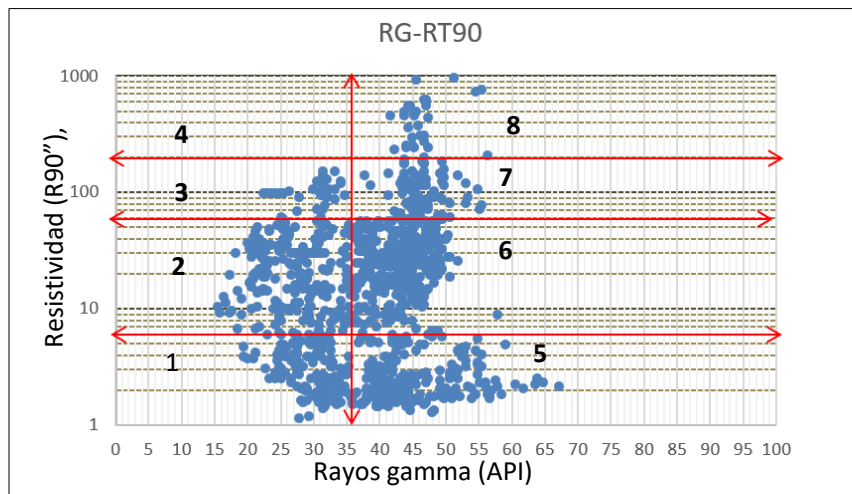


Figura 17 Parámetros de separación de las unidades en la gráfica cruzada de resistividad vs rayos gamma

Para facilitar la clasificación de todos los datos, metro por metro, se realizó la programación de un algoritmo para clasificar los datos (Visual Basic) para clasificar los datos con el siguiente criterio:

Rayos Gamma < 36	Rayos Gamma > 36
Rt90: 0-6 =1	Rt90: 0-6 =5
>6-60 =2	>6-60 =6
>60-200 =3	>60-200 =7
>200 =4	>200 =8

El programa arrojó los datos de manera eficiente, dichos valores se graficaron a una escala exagerada paralelamente con los valores de rayos gamma naturales para ayudar a su visualización, el resultado fue una gráfica con apariencia de "escalones" con algunas variaciones, pero con los que se lograron identificar diferentes unidades litológicas. Figura 18, Curva color azul.

Debido a las variaciones, aquellos escalones no se encontraban bien definidos, por lo que se optó hacer un filtrado viendo dato por dato y distinguir si los datos que salían del promedio se encontraban influenciados por algún otro factor como lo es la geometría del pozo, por ello, la gráfica de litología se colocó al lado de la de BGL (Geometría del pozo) para identificar posibles alteraciones a causa de derrumbes en el pozo y que el dato medido arrojara datos que correspondieran al lodo de perforación y no a la lectura de la roca sana. Imagen Figura 19.

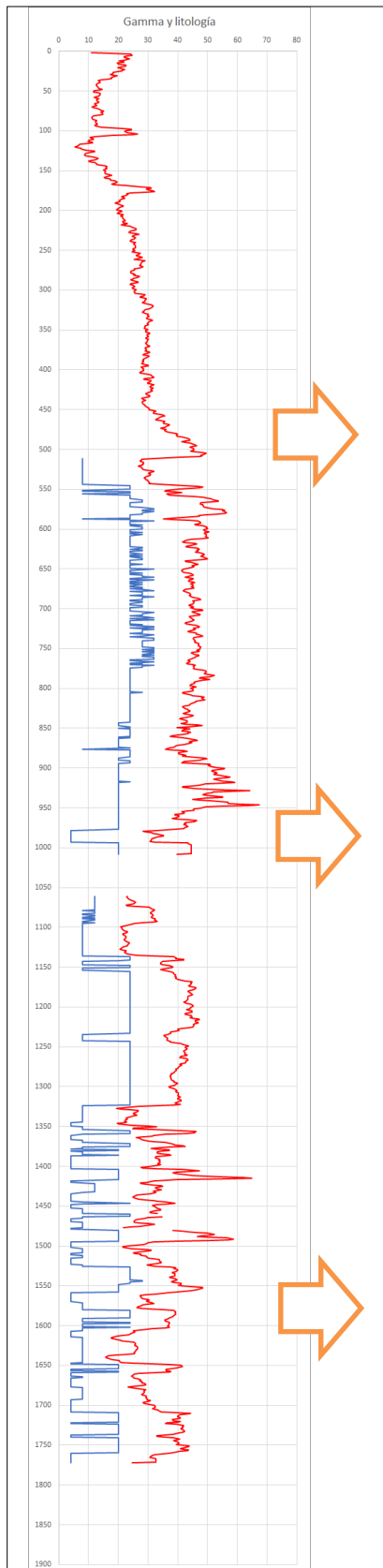


Figura 19 Separación litológica de acuerdo con el criterio propuesto.

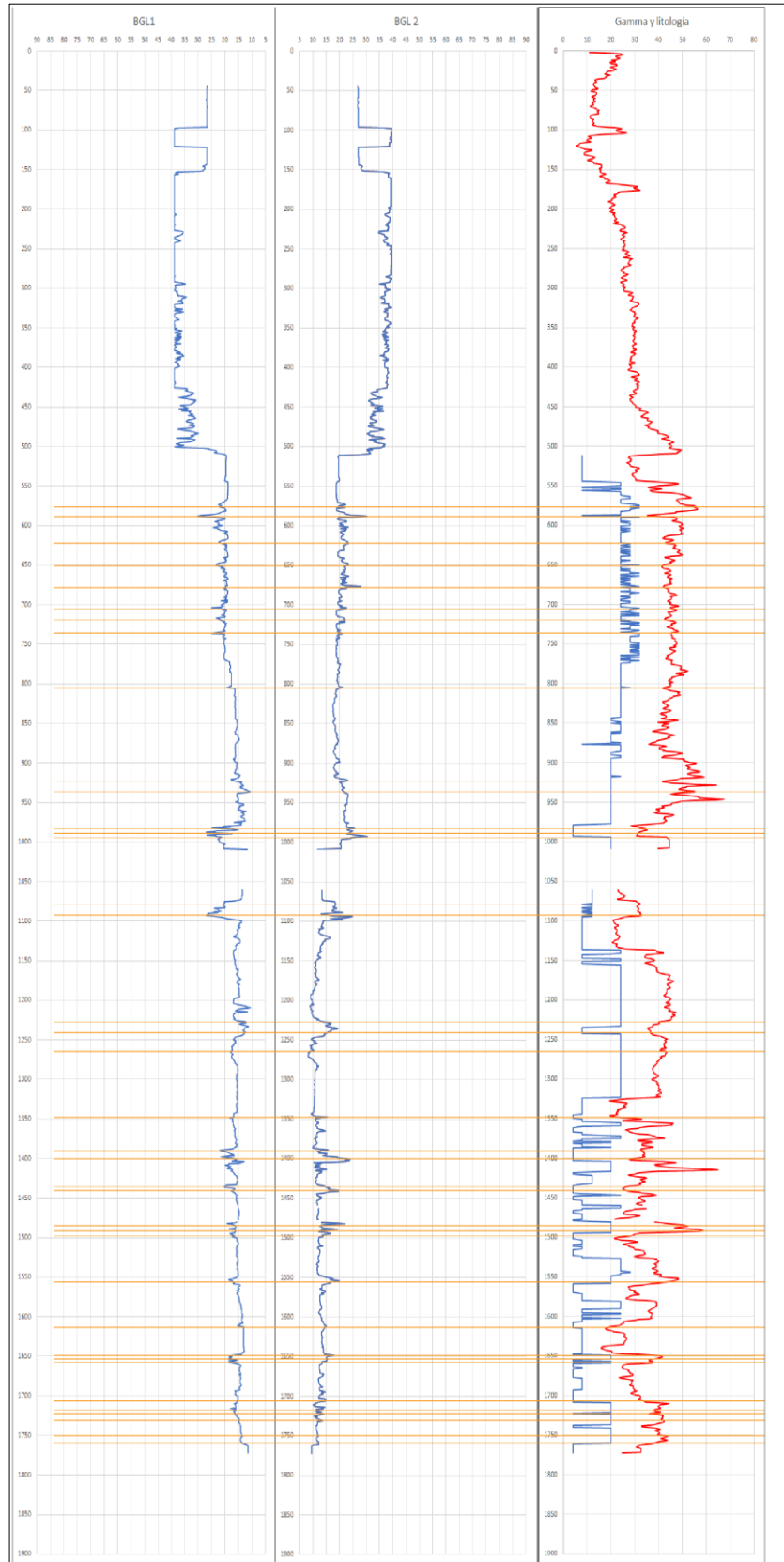


Figura 18 Correlación del registro BGL geometría del pozo con la separación litológica del criterio propuesto.

Después de identificar los puntos en los que la geometría del pozo pudo haber dado cierto grado de incertidumbre al dato, se realizó un filtro de forma manual, con criterio, quitando los valores que distorsionaban la gráfica de litología, por el efecto de la geometría del agujero. Al realizar este filtro, la gráfica de litología empezó a verse más clara, se lograron identificar 24 unidades que fueron clasificadas en cuanto a sus valores de rayos gamma y resistividad, por debajo de los 510 m de profundidad. A cada unidad se le puso una letra para identificarlas, de la A a la X. Pero se pudo identificar que, aunque no se estuviera en la misma profundidad, algunas unidades compartían características en sus intervalos de valores de resistividad o rayos gamma.

Fue entonces que se empleó un criterio con cada unidad y se le puso de nombre la letra de la primera unidad con la que tenía similitud en sus valores, la separación de las unidades quedó como a continuación:

Valor arrojado después de la programación en Visual Basic (El primer valor corresponde al valor con mayor abundancia)	Letra con la que se identificó la unidad litológica	Valor exagerado en la gráfica
6 y 7	A, D, I, I2, I3	24
7 y 6	B	28
8 Y 7	C	32
5	E, E3, E4	20
3	L	12
2	J, J1, J2, J3, J4	8
1	K, K2, K3, K4, K5, K6, K7	4

Tabla 1. Definición de unidades radioelectroestratigráficas

La gráfica de las separaciones de las 24 unidades litológicas Tabla 2 y la Figura 20 representan las variaciones de la litología, apoyada en el valor de radiactividad. En el intervalo de 978-1003 m de profundidad se clasificó como una misma unidad litológica, debido a que justo en este intervalo se encontraba una gran influencia de las caídas de las paredes del pozo en las lecturas, aunado a que las últimas lecturas en un registro geofísico suelen ser las que poseen mayor grado de incertidumbre por todo el material acumulado y apoyado en que a esta profundidad se contaba recortes se dejó a consideración para correlacionarlo.

Para el intervalo sin datos que corresponde a las profundidades entre 1 003 y 1 060 m, se dejó en primera instancia sin clasificar para después correlacionar con las muestras de canal que se tenían a esas profundidades, dejando en blanco este intervalo en esta fase del trabajo.

Nombre de la unidad	Valores rayos gamma	Valores resistividad rt90
A	35-56	8-150
B	41-50	16-140
C	43-48	60-530
D	40-50	10-70
E	38-56	1-8
F	-	-
L	22-33	46-125
J	20-26	9-50
I	34-47	7-48
J1	19-35	4-30
K	27-36	1-8
E3	38-64	1-5
L1	31-34	88-147
K2	25-36	2-7.5
J2	21-34	4-30
E4	38-58	1-2
K3	21-34	1.4-30
I2	33-45	8-54
K4	26-31	3-15
I3	35-39	29-55
K5	17-27	2-13
J3	15-26	9-57
K6	23-41	1-7.6
J4	24-29	8-24
K7	28-43	1-3

Tabla 2 Variaciones de valores de resistividad y rayos gamma en cada unidad

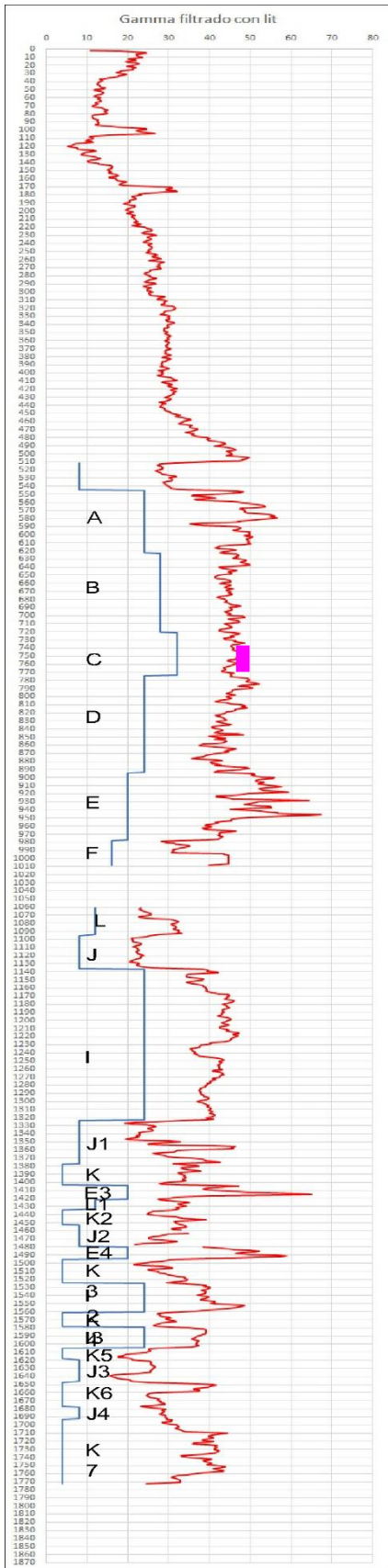


Figura 20 Columna de cambios litológicos filtrada

De igual manera se elaboró una tabla para poder identificar la variación de datos en cada unidad. Tabla 3

Después todas las unidades fueron identificadas en la gráfica cruzada de resistividad Vs rayos gamma. Figura 21 A, gracias a esta identificación visual se pudo definir a qué tipo de roca correspondía cada una de las unidades graficadas en la figura 21 B con los valores de referencia ocupados por Arroyo y Mooser en 2016 para la interpretación del pozo Mixhuca-1.

Para realizar este proceso, los recortes de roca que habían sido identificados para la elaboración de la primera columna litológica fueron fundamentales para realizar una correlación con las unidades correspondientes, a dichas profundidades y así realizar una interpretación de las demás profundidades más acercadas a la realidad posible.

Nombre de la unidad	Color asignado	Tipo de roca
A	Negro	Toba lítica
B	Rosa	Andesita
C	Azul Claro	Basalto
D	Morado	Toba vítrea
E	Amarillo	toba fina
F	-	Basalto
L	Verde olivo	Basalto
J	Café	Basalto
I	Rojo	Toba lítica
J1	Azul Marino	Basalto
K	Verde pálido	Toba verde
E3	Verde limón	toba fina
L1	Amarillo claro	Basalto

Tabla 3 Litología interpretada para cada unidad

Nombre de la unidad	Color asignado	Tipo de roca
K2	Café	Toba verde
J2	Azul claro	basalto
E4	Rosa	toba fina
K3	Naranja	Toba verde
I2	Amarillo	Toba lítica
K4	Amarillo	Toba verde
I3	Blanco	Toba lítica
K5	Azul Turquesa	Toba verde
J3	Verde Olivo	basalto
K6	Negro	Toba verde
J4	Rosa claro	basalto
K7	Rojo	Toba verde

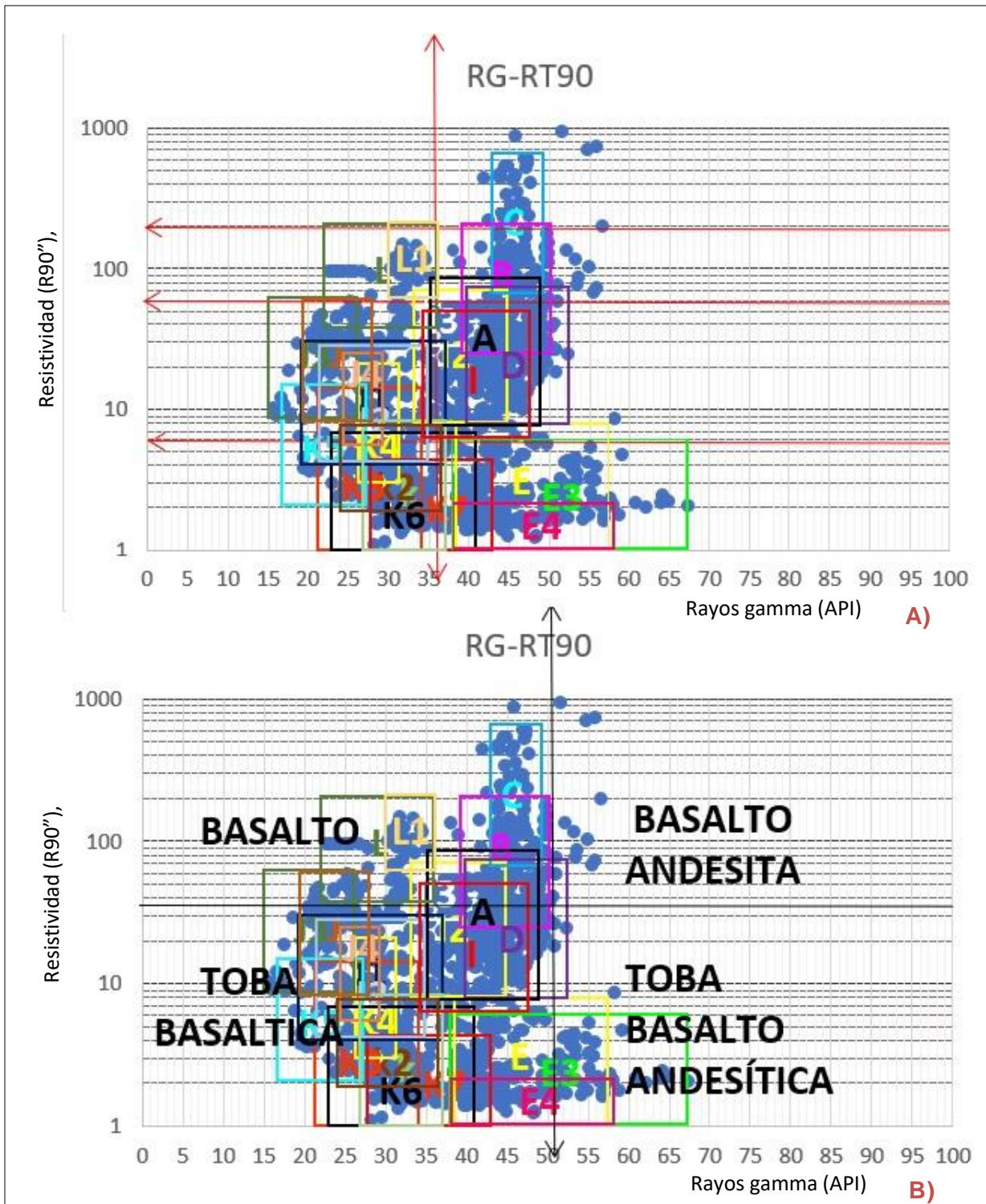


Figura 21 Identificación de cada unidad en la gráfica cruzada para su posible clasificación litológica.

Este procedimiento favoreció a completar nuestra columna litológica, pero para definir las unidades menos profundas se realizó una correlación con el registro de rayos gamma y de geometría de pozo. El resultado fue la definición de algunos horizontes, Figura 22,

pero sin saber su composición litológica. Para saber a qué tipo de roca posiblemente correspondía se tomó en consideración la información superficial, correspondiente al acuífero superior, se correlacionó con información litológica de pozos cercanos al pozo Santa Catarina 3a, los elegidos fueron el Santa Catarina 2 (SC-2) y Ampliación Tláhuac No. 21 (ATN-21), Figura 23.

Este procedimiento permitió inferir una columna litológica completa. Figura 24

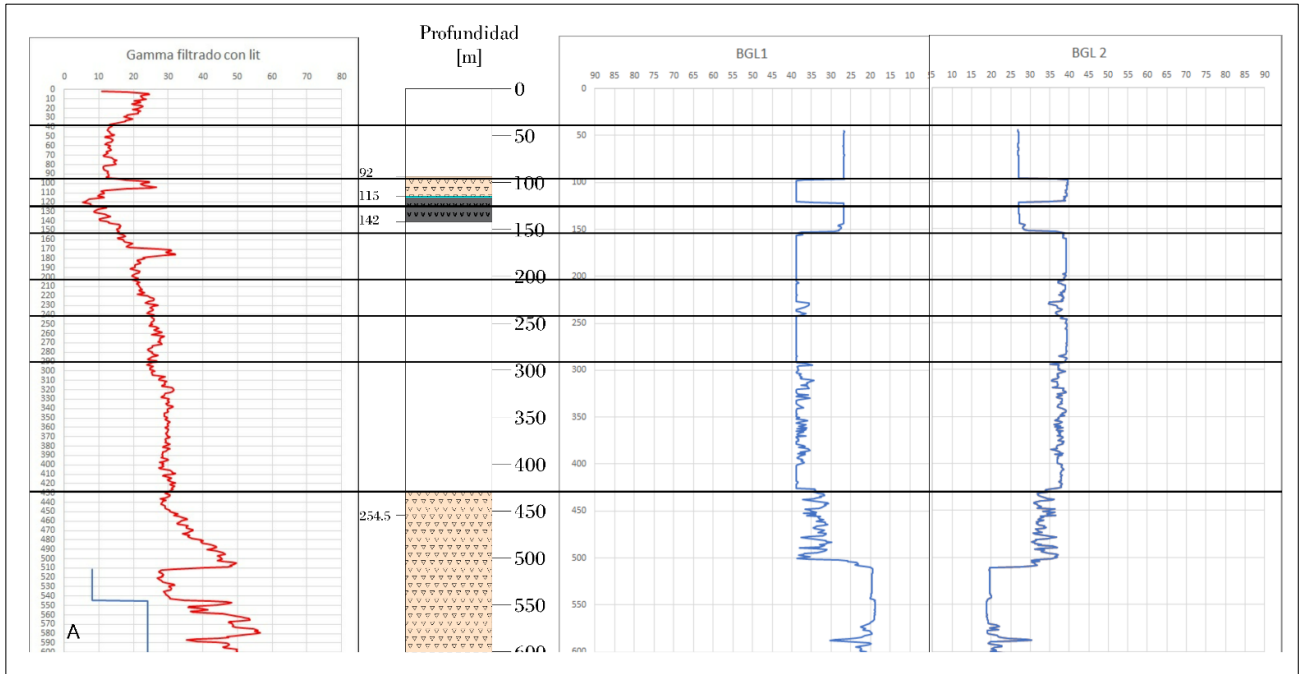
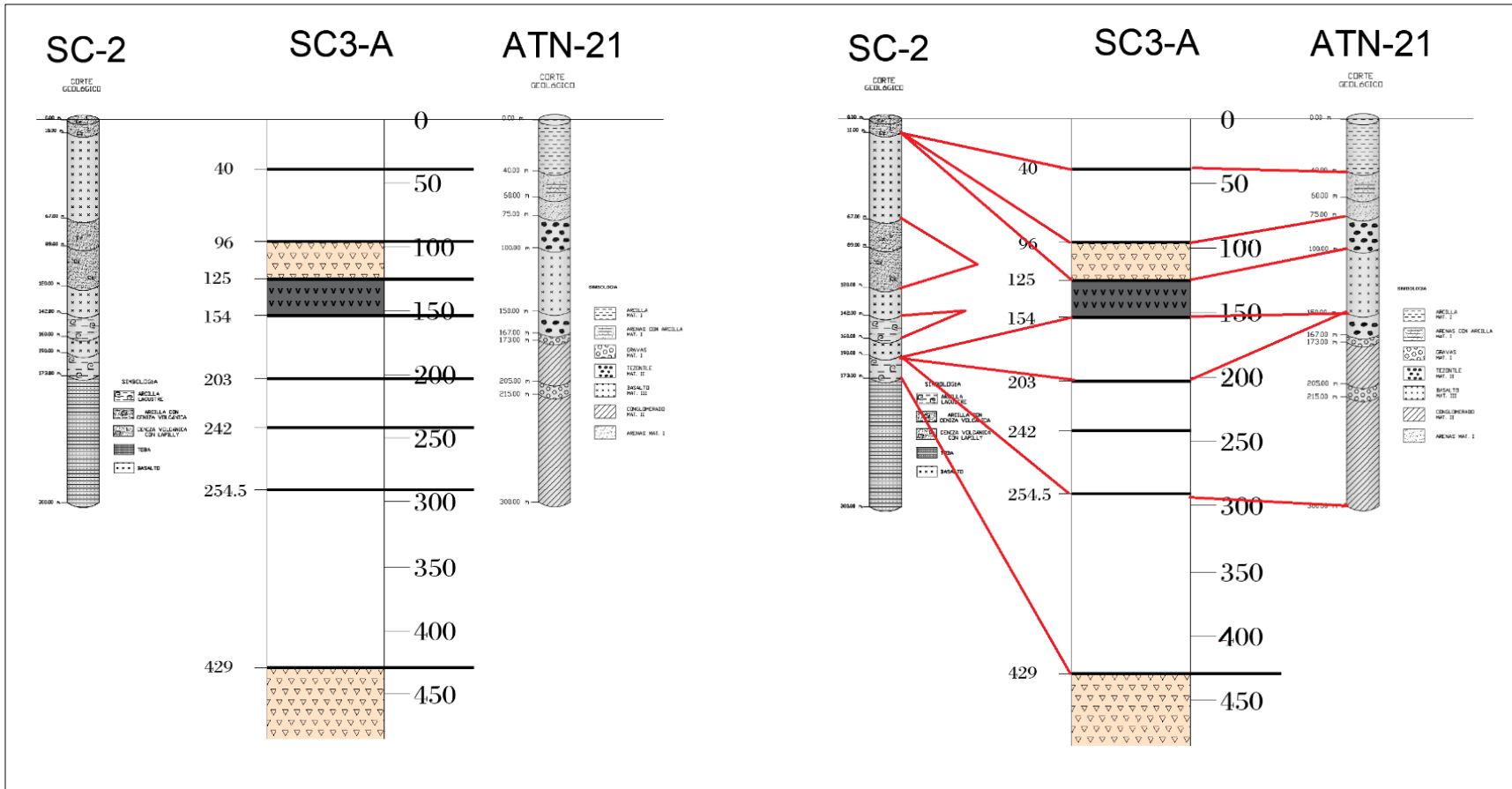


Figura 22 Correlación de la geometría del pozo y registro de rayos gamma para poder definir los horizontes litológicos menos profundos.



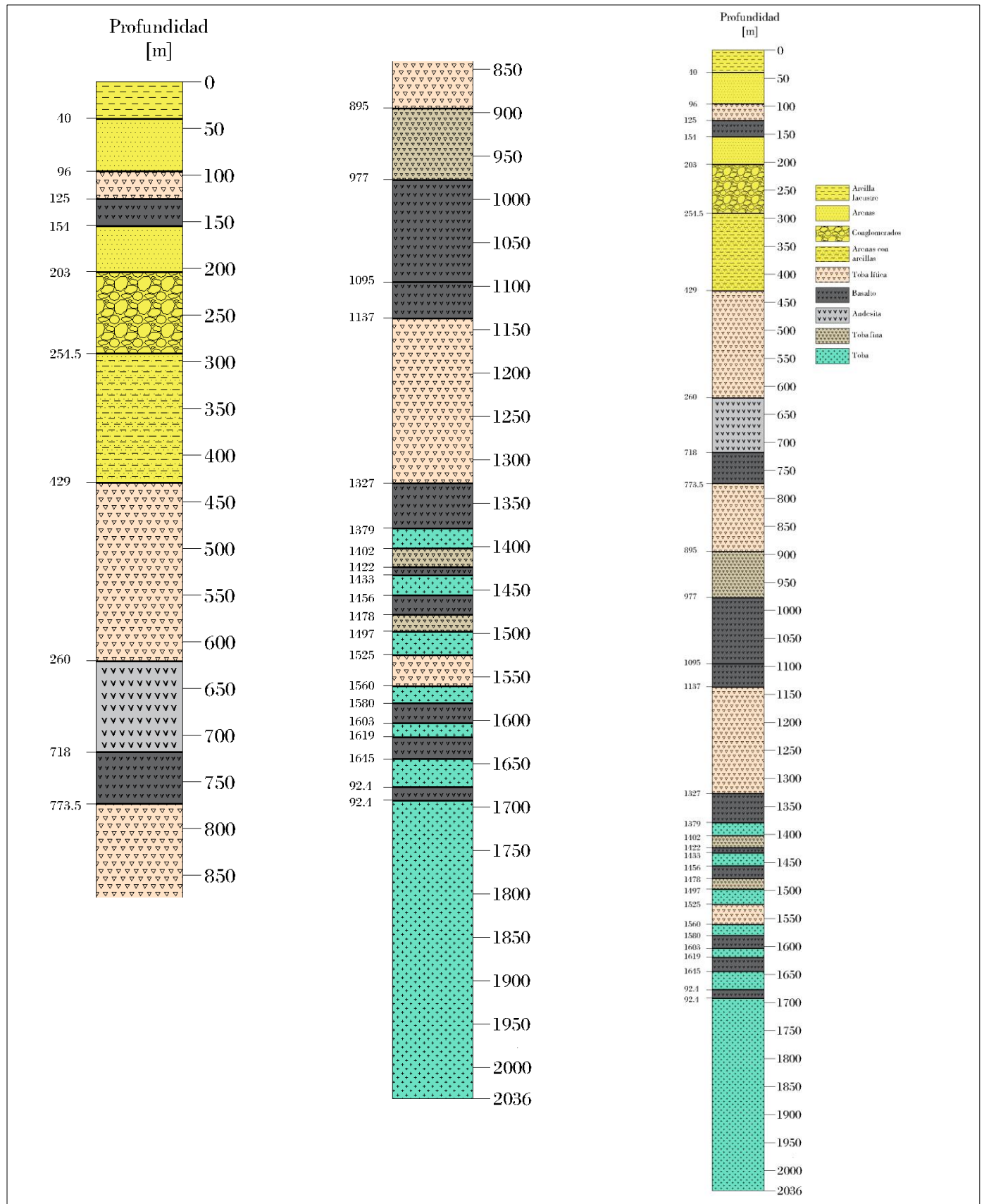


Figura 24 Columna litológica inferida

3.5. Petrofísica del pozo

En esta parte se plantea la evaluación del parámetro petrofísico porosidad, con base en la respuesta eléctrica del pozo, asumiendo los conceptos de Factor de Formación que planteó Archie (1942). Hay que mencionar que el denominado Factor de Formación es la relación de la resistividad de una roca totalmente saturada con agua (R_o) entre la resistividad del agua (R_w)

$$F = \frac{R_o}{R_w} \text{ (adimensional)}$$

Este factor se puede relacionar con la porosidad a través de la propuesta de Archie como:

$$F = \frac{a}{\phi^m} \text{ (adimensional, Fórmula de Archie)}$$

Pérez Rosales (1982), propone una ecuación general, a partir de la cual se puede particularizar para el tipo de roca y medio hidrogeológico que se esté trabajando.

$$F = 1 + a(\phi^{-m} - 1)$$

Donde a y m dependen la geometría interna y de la porción del volumen de poro que participa activamente en el flujo de la corriente eléctrica y que porción corresponde a zonas de estancamiento. (Arroyo, Apuntes de registros geofísicos de pozos 1996)

Dado que aún no hay experiencia en la interpretación de registros de pozos en rocas volcánicas, se considerarán las ecuaciones de Archie y Humble, considerando que el medio geológico es de tipo granular (tobas) y las lavas se considerarán que presenta un comportamiento tipo caliza; esta es un área de oportunidad para el procesamiento e interpretación de registros de pozos en medios volcánicos.

3.5.1. Obtención de valores de Factor de Formación.

Para entrar en contexto es necesario tener el argumento de cómo se comportan los fluidos durante la perforación de un pozo (lodo de perforación – agua de formación), para ello se analizará la Figura 25.

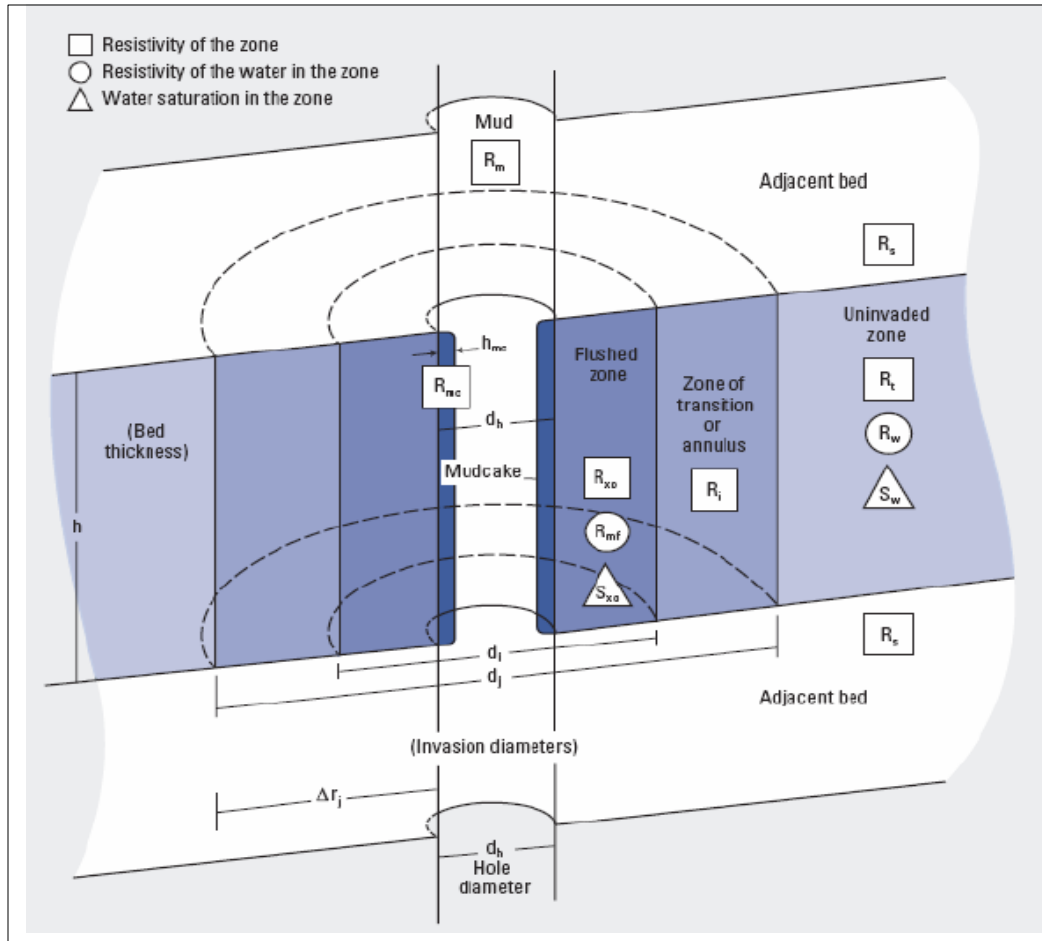


Figura 25 Comportamiento de los fluidos durante la etapa de perforación de un pozo y la obtención de los registros de pozos (Schlumberger, 1998)

El Factor de Formación guarda una estrecha relación con la porosidad, dicha información es vital en la evaluación de cualquier tipo de pozo, tanto petrolero como de agua. Debido a que el factor de formación depende del medio, si es granular, dependiendo el tamaño del grano y acomodo, la corriente eléctrica tomará una trayectoria de corriente (+ a -)². Lo anterior implica que a medida que la trayectoria sea más compleja, la corriente eléctrica tendrá una mayor trayectoria, incrementando el valor de F; en tanto en una arcilla el valor será de 1, considerando un medio cilíndrico o laminar. Lo anterior es importante tomarlo en consideración al momento de la interpretación de los datos que se obtengan.

² Principio de electricidad, la corriente eléctrica transita de + a -)

Con base en lo anterior y en la ubicación de las resistividades del lodo de perforación y del agua de la formación en los diferentes radios axiales al pozo, se puede relacionar la zona lavada con la resistividad del filtrado del lodo que penetra a la formación como:

$$F = \frac{R_{xo}}{R_{mf}} \text{ (adimensional)}$$

Siendo R_{xo} la resistividad de la zona lavada y R_{mf} la resistividad del agua en la zona lavada.

El valor de R_{xo} son los valores del pozo en la profundidad lateral en la que el lodo de perforación inunde parte de la formación, en el caso del registro AIT, la profundidad lateral que corresponde a la zona lavada, para el caso que nos ocupa se considerará la curva del registro de resistividad a 30", ($R_t 30$) y R_{mf} a diferentes profundidades depende de la temperatura y se obtiene a partir de la relación.

$$F = \frac{R_{mf} \text{ a } X^{\circ}C * (X + 22^{\circ}C)}{T_f + 22^{\circ}C}$$

El valor de R_{mf} se obtiene en el pozo, durante la etapa de obtención del registro, en superficie

Al contar con el registro de presión y temperatura, contábamos con la incógnita T_f (temperatura de la formación) pero sólo hasta los 1 006 m de profundidad, pero al contar con la temperatura del valor R_{mf} del final de la toma del registro inductivo, la temperatura se pudo calcular con una regresión lineal y así calcular la R_{mf} para cada profundidad.

Teniendo el valor R_{mf} , se prosiguió a calcular el valor de factor de formación para cada profundidad y elaborar la gráfica correspondiente,

Para el análisis de la información del pozo Santa Catarina 3A se obtuvieron dos valores de F , uno en la zona lavada y otro en la zona limpia o profunda, Figura 26.

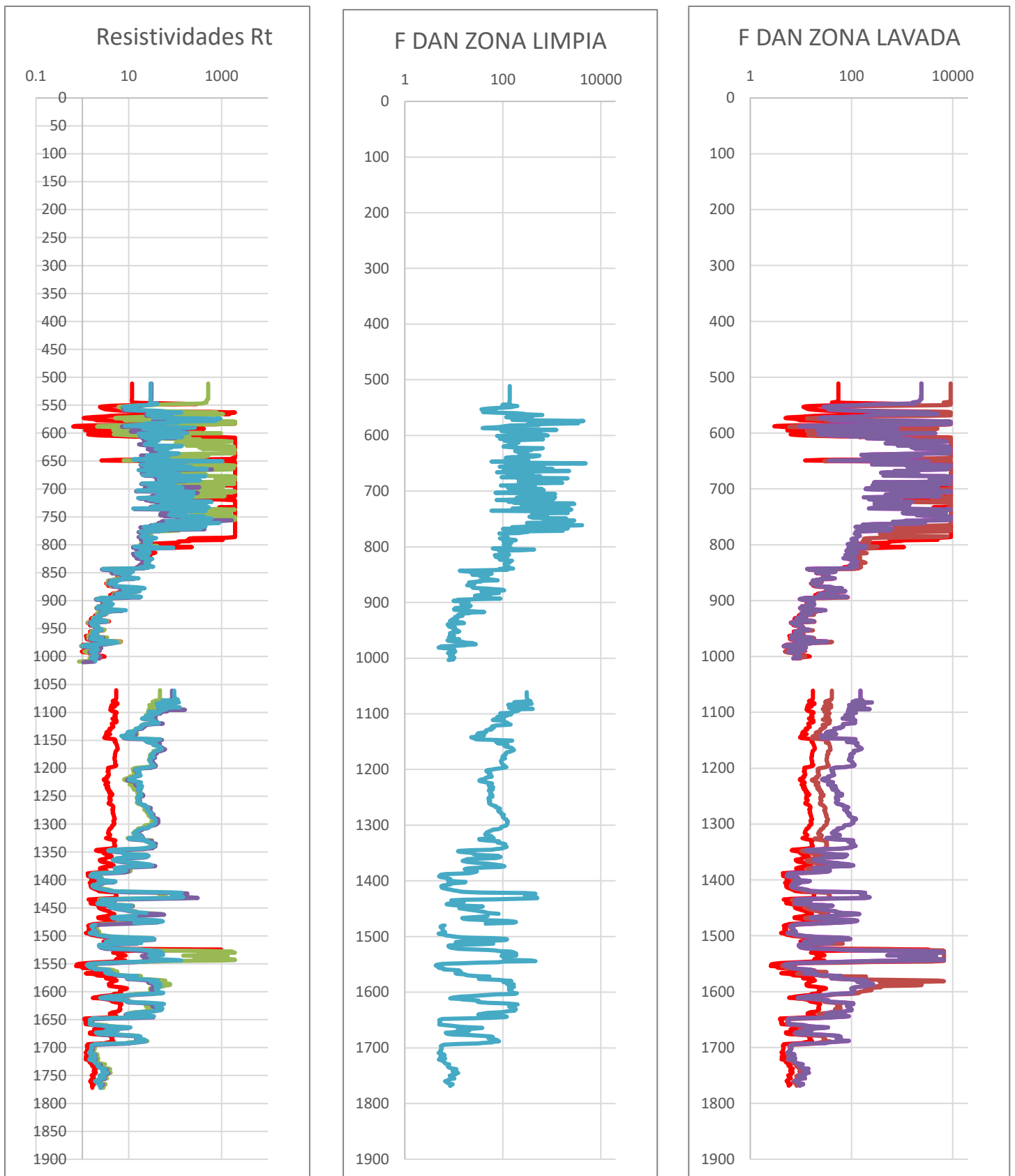


Figura 26 Factor de formación en la zona limpia y zona lavada

El comportamiento de los valores de factor de formación varía de acuerdo con la litología que corresponde, el horizonte que va de 610-774 m de profundidad presenta valores muy altos de Factor de formación y correlacionándolo a la gráfica de resistividad también contiene valores muy altos de resistividad lo que indica que el contenido de agua es escaso en este horizonte corresponde a basaltos y andesitas, enseguida los valores de factor de formación va bajando lo que indica que el contenido de agua aumenta, en este intervalo la litología corresponde a tobas líticas y tobas finas, en este, de las profundidades de 774-977, se encuentran "3 capas" lo que corresponde a tres distintos comportamientos hidráulicos, dichos cambios no coinciden con el límite litológico, la toba fina tiene los valores más bajos de factor de formación, conteniendo agua en considerable cantidad, pero al ver los valores de resistividades, estos nos indican que tanto la resistividad de la zona virgen y la de la zona lavada es igual y esto es un indicador de que la formación tiene comportamiento similar que al del lodo de perforación que son arcillas por lo tanto la toba fina en este espacio de 895-977 tiene un comportamiento de arcillas. En el tramo que no se tomaron registros geofísicos del 1003-1063 m se dejó sin valores a concierne que se haría una inferencia en el capítulo 4 de esta tesis.

Después de ese intervalo vació el factor de formación vuelve a subir dando como resultado un poco presencia de agua en el pozo a lo que corresponden a lo interpretado como derrames basálticos, este valor va bajando en el cambio litológico que pasa a lo interpretado como tobas líticas, en estas tobas el valor de factor de formación es alto lo que corresponde a un bajo contenido en agua, para el siguiente cambio litológico en la profundidad 1 327m el Factor de Formación tiene variaciones, esto debido a un posible fracturamiento a algún otro factor que lo altere y a partir del valor 1 379 m el comportamiento del valor de formación varía rítmicamente de acuerdo a la litología, los valores más bajos en los que se infiere gran cantidad de agua corresponden a tobas tanto finas como líticas, y en los valores más altos corresponde a coladas de basalto en las que la presencia de agua es poca, este comportamiento se presenta hasta posiblemente los 1692, ya que la toma de registros termina hasta los 1 770 m aproximadamente y las últimas mediciones suelen tener mayor grado de incertidumbre.

3.5.2. Obtención de valores de porosidad

La porosidad es una medida de la capacidad de los espacios internos de la roca de almacenar fluidos y se representa con la letra griega ϕ , existen algunos factores que afectan a la porosidad en las rocas como el acomodo de los granos, solución de minerales por acción del agua, así como fallas o fracturas. Existen distintos tipos de registros geofísicos cuyo único objetivo es obtener la porosidad de la formación como el registro sísmico, registro de neutrones y registro de densidad, desafortunadamente en el pozo Santa Catarina 3a no se tomó ninguno de estos registros.

Mediante el registro de resistividad es posible calcular empíricamente la porosidad, ya que entre mayor sea la resistividad, menor serán los espacios rellenos de agua y a la inversa, si el valor de resistividad es pequeño, el espacio relleno de agua será mayor. Con base en la descripción de F hecha en el inicio del inciso 3.5.1 se consideró para este trabajo la ecuación de Humble, solo con fine de identificar un valor contrastante.

$$F = \frac{0.81}{\phi^m} \quad (\text{adimensional})$$

En la Figura 27 se presentan los cálculos de porosidad tanto para la zona lavada como para la zona limpia.

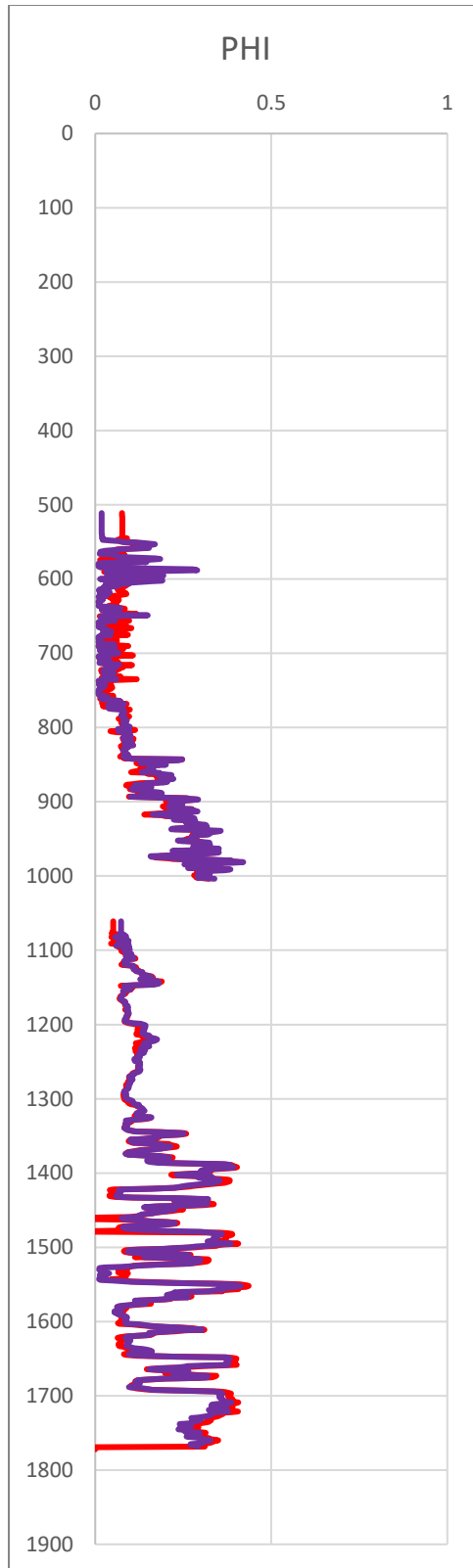


Figura 27 Valores de porosidad obtenidos a partir de F (La de rojo corresponde a la zona lavada y la violeta a la zona limpia)

3.5.3. Obtención de valores de saturación y resistividad del agua de formación

La saturación de agua es la fracción del agua de la formación en la zona no perturbada, Se expresa en volumen/volumen, porcentaje o unidades de saturación, en una formación limpia es deducible a partir de la ecuación de Archie mediante la siguiente fórmula.

$$S = \sqrt{\frac{FR_w}{R_t}}$$

Dónde

F: Factor de formación,

R_w: resistividad de agua intersticial

R_t: resistividad total de la roca

Para obtener esta relación es necesario conocer el valor de la resistividad del agua R_w, dicho valor se obtiene mediante una de las variaciones de la ecuación del Factor de Formación. En la que se determina que una roca saturada al 100% de agua salada entre la resistividad del agua que satura dicha roca, para este estudio, la resistividad R_o equivaldría a la resistividad de R₉₀ que representa a la zona lavada, otro elemento necesario es el factor de formación F el cuál calculamos en el subcapítulo 3.5.1 de este trabajo, fue necesario entonces despejar el valor de R_w de la fórmula y obtenerlo para poder calcular el valor de saturación. El resultado se presenta en la Figura 28.

Como se puede apreciar el valor que se obtiene es una saturación de agua del 100% lo cual viene a comprobar que los datos del análisis realizado concuerdan con las condiciones que presenta en medio; salvo de los 1460 a los 1478 m donde se presenta una anomalía en la respuesta del registro obtenido, en el primer corresponde a rocas basálticas y el segundo al cambio de litología de basalto a toba lítica y los valores de resistividad era elevadísimos y coincidían con una anomalía en la geometría del pozo.

En cuanto al valor de R_w este presenta diferente valor, lo cual se asocia a que el agua puede presentar diferentes concentraciones de sales.

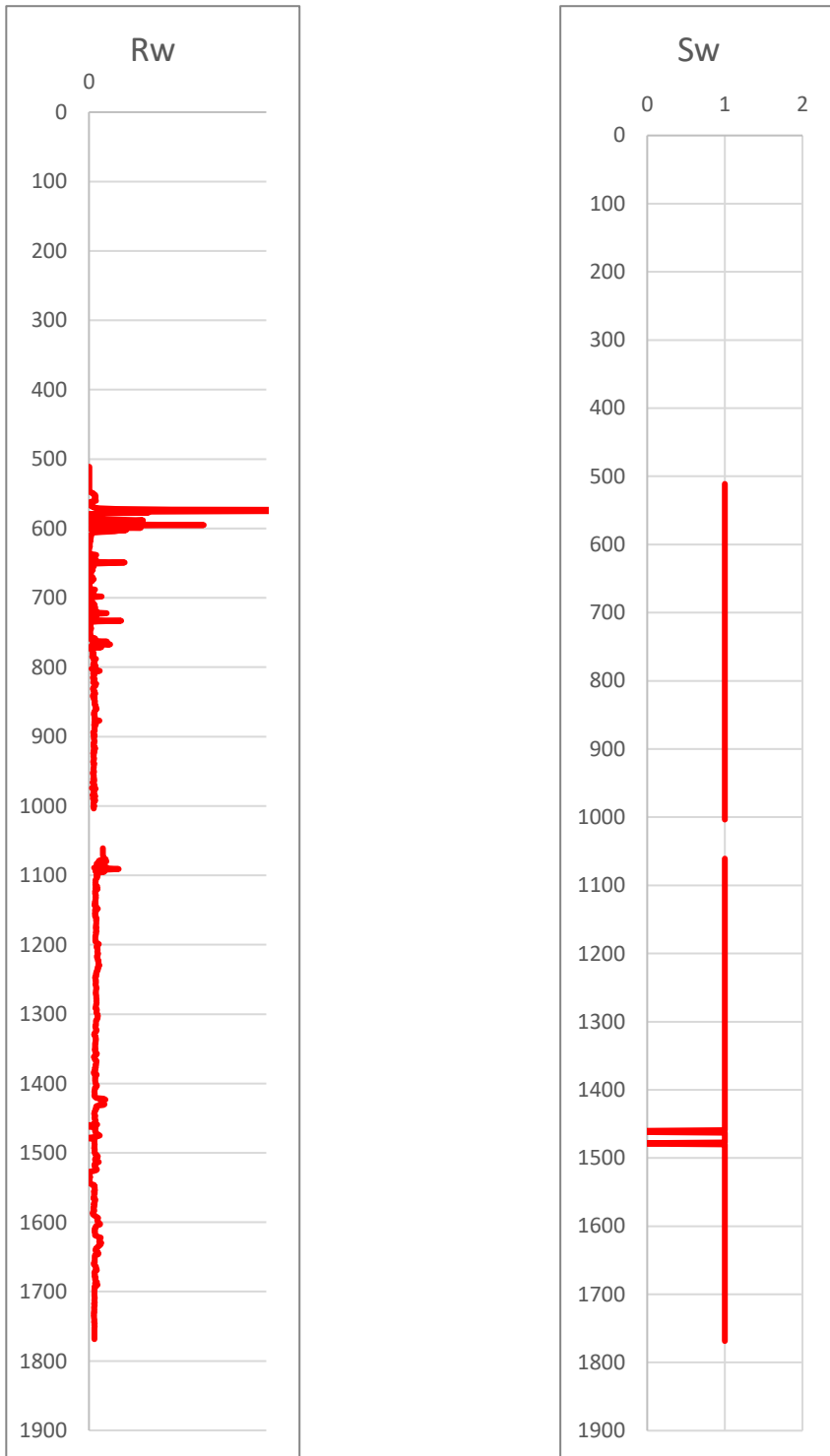


Figura 28 Valores de R_w y S_w

3.5.4. Obtención de valores de permeabilidad (estimada)

La permeabilidad se define como la capacidad que tiene una roca de permitir el flujo de fluidos a través de sus poros interconectados, la permeabilidad es una función directa del radio de la garganta de poro que caracterice a la roca. Existen distintos métodos para estimarla, el registro de densidad o porosidad neutrón son exclusivos para determinar dicha propiedad en las rocas, pero debido a la falta de estos se recurrió a su inferencia con el registro eléctrico.

De igual forma a lo que se ha venido presentando, el valor que se presenta es estimativo y será necesario realizar una prueba de laboratorio a un núcleo para definir el valor más real. En este trabajo se plantea la ecuación de Timour, sólo con fines de identificar que intervalos de roca pueden presentar mayor o menor valor de este parámetro; se reitera, no es un valor real.

La fórmula que propone Timour (1968) donde involucra la saturación del agua S_w

$$k = \frac{0.136 \Phi^{4.4}}{S_{wi}^2}$$

Tomando en consideración los valores de los cálculos realizados de ϕ y F se procedió a cálculo de K , Figura 29

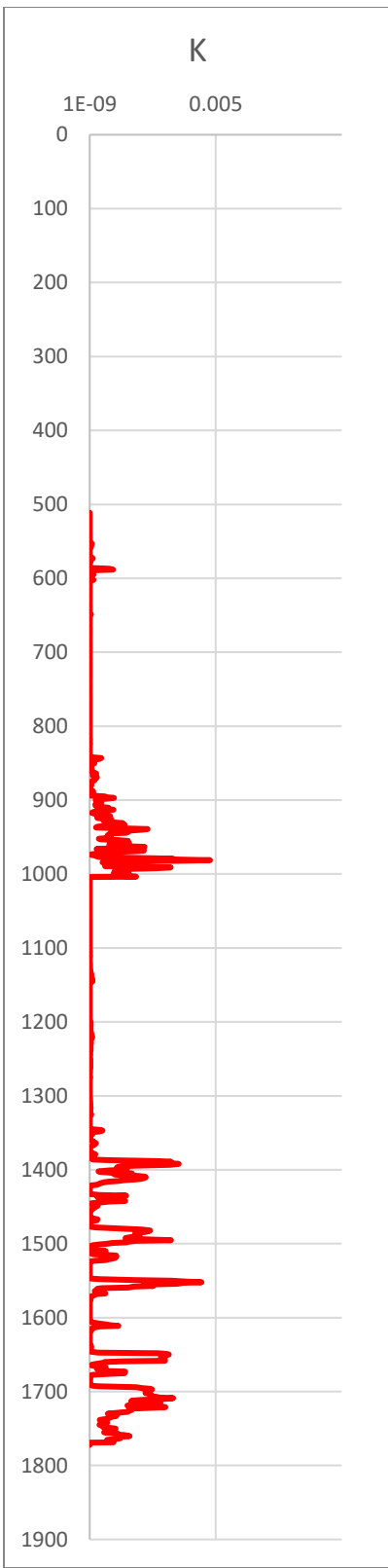


Figura 29 Valores de Permeabilidad obtenido a partir de Timour

Otra forma que se puede obtener un índice de permeabilidad es a través del comportamiento de las curvas de resistividad a diferente profundidad de investigación. Para este trabajo se normalizaron las curvas de resistividad de 90", 60" y 30".

La separación de curvas es indicativa de la permeabilidad, dado que el lodo de perforación durante la perforación pudo penetrar más o menos la formación, Figura 29. Con base en el comportamiento se realizaron las diferencias entre los valores de resistividad de las curvas R10-R90, R20-R90, R30-R90 y R60-R90, considerando que entre mayor sea la variación de las curvas, mayor será la permeabilidad. En la Figura 30 se presenta la respuesta, identificándose que de los 550 a los 800 m se presenta una anomalía asociada a que la roca presenta una mayor permeabilidad, al igual que en los intervalos 1525 A 1605. En general la separación de las curvas es reducida lo cual se interpreta que la roca presenta baja permeabilidad.

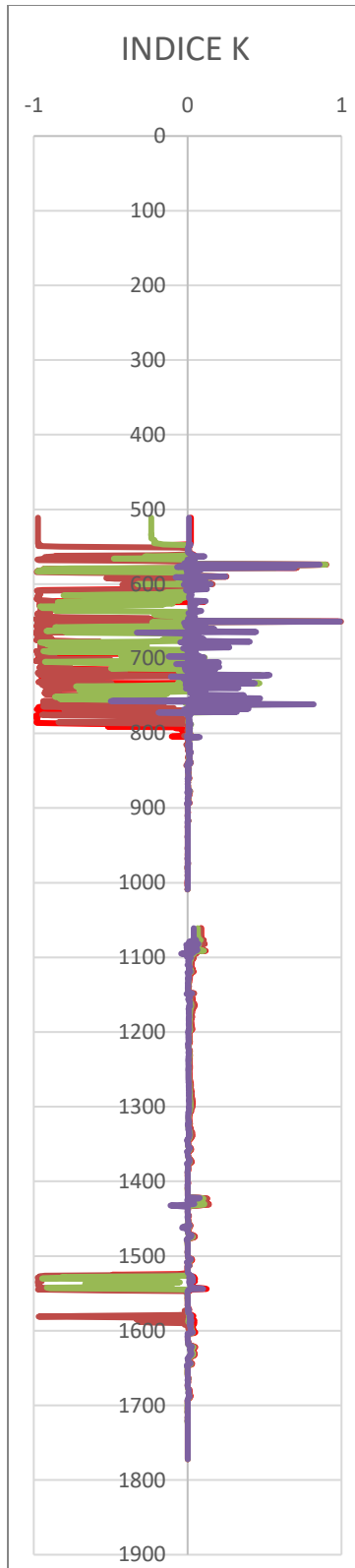


Figura 30 Estimación de la permeabilidad con base en la separación de las curvas de resistividad

CAPÍTULO 4. CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS

4.1. Definición de unidades hidrogeológicas en la columna litológica

El término de unidad hidrogeológica o estratigráfica es muy poco utilizado e inclusive podría ser tomado como sinónimo a acuífero. Unidad estratigráfica o también llamada unidad hidrogeológica es definida como un cuerpo de roca que se distingue por su porosidad y permeabilidad y pueden presentarse en una o más unidades litoestratigráficas y son unificadas y delimitadas con base en sus características hidrológicas y que se relaciona con sus intersticios y son reconocidas con base en su naturaleza, extensión y magnitud de los intersticios en una roca sedimentaria, metamórfica o ígnea, (Seaber 1986). Por otro lado, una unidad estratigráfica también es reconocida como una formación o grupo de formaciones en las que existen características hidrológicas similares que permiten agruparlas en acuíferos o capas confinantes y constituidas por unidades geológicas agrupadas con base en su conductividad hidráulica, (Fetter 1994).

Entre sus características, también es importante destacar que son agrupadas también por su porosidad y permeabilidad similar, sus límites pueden correlacionarse o no con el límite de una formación por lo que una unidad hidrológica puede incluir varias formaciones tal como un acuífero. Para este trabajo se usaron la porosidad, permeabilidad y los valores de factor de formación para definir las unidades definidas en el análisis litológico del inciso 3.4. Y se agruparon en la siguiente tabla, en la Figura 32 se podrá encontrar la correlación gráfica entre sus características petrofísicas y litológicas que ayudaron a determinar las unidades de dicha tabla.

Número de unidad	Características	Clasificación hidrogeológica
1	La primera unidad resultó ser algo confusa ya que representa las primeras mediciones del registro geofísico y la incertidumbre aumenta, Corresponden a lo clasificado como toba lítica, con valores de Factor de Formación altos los hace inferir una roca poco permeable, y porosidades estimadas del orden del 10-20%	Acuitardo
2	Corresponde a las litologías clasificadas como basalto y andesita, el valor del factor de formación es mayor lo que infiere menor cantidad de agua, la permeabilidad es muy escasa, la porosidad es del orden del 1-6%	Acuitardo
3	Corresponde a tobas en las que la cantidad de agua aumenta en cantidades considerables, pero la permeabilidad es casi nula, la porosidad se encuentra en el orden del 10%	Acuitardo
4	Se sitúa en la segunda parte de las tobas, pero aquí la cantidad de agua aumenta considerablemente junto con la permeabilidad y la porosidad alcanza el 20%	Acuitardo
5	Corresponde a la clasificada como toba fina, contiene mayor cantidad de agua según los valores de factor de formación y posee valores de permeabilidad un poco más altos y una porosidad del orden de 30%, esto indicaría que esta capa transmite agua, pero debido a las observaciones de las mediciones de resistividad es visible que las resistividades tanto de la zona lavada como de la roca virgen son similares por lo que se estima que esta capa es impermeable, posee las características de una arcilla .	Acuicludo

Número de unidad	Características	Clasificación hidrogeológica
6	Debido a que esta unidad se encuentra en medio de las últimas y primeras mediciones de los registros geofísicos y en el intervalo sin valores dificultó su clasificación, Se encuentra entre rocas que corresponden a basaltos, con un factor de formación elevado como lo demuestran los primeros valores de la segunda campaña geofísica, con permeabilidad muy baja y con porosidad del orden del 8-10%.	Acuitardo
7	Corresponde a litologías de basalto y tobas el factor de formación demuestra que el contenido de agua es mayor en la base, de la misma manera la permeabilidad aumenta en cantidades mínimas hacia la base, los valores con casi nulos, la porosidad es del orden de 10-20%	Acuitardo
8	Corresponde a tobas líticas en columna litológica, con valores de factor de formación altos que demuestran baja posibilidad de contener agua, los valores de permeabilidad igual son bajos, y la porosidad está en un orden del 10%	Acuitardo
9	Esta unidad se encuentra representado por la segunda porción de la toba lítica de la unidad pasada, en esta unidad se diferencia de la pasada por los valores de porosidad que varía de 15-20%, los valores de factor de formación sugieren que contiene un poco más de agua que la unidad pasada, permeabilidad muy baja.	Acuitardo

Número de unidad	Características	Clasificación hidrogeológica
10	Esta unidad corresponde a basaltos en mayor proporción y un poco de tobas, los valores de factor de deformación son más pequeños lo que infiere un contenido de agua mayor, la permeabilidad en esta unidad es baja, las porosidades varían en el orden de 10-25%	Acuitardo
11	Esta unidad se agrupó debido a que presentan un comportamiento rítmico, se trata de una alternancia de rocas correspondiente a tobas finas, tobas líticas y basaltos, en esta unidad se presenta los valores de factor de formación que se calcularon, estos valores corresponden a las tobas, mientras que los valores mayores de factor de formación corresponden a los basaltos, los valores de permeabilidad son considerables siendo los valores mayores en las tobas y casi nulos en los correspondientes a los basaltos, de igual forma con los valores de porosidades, aumenta en las tobas en orden del 40% y de 10% en lo correspondiente a basaltos.	Acuífero
12	Esta unidad es en su mayoría inferida debido a que son las últimas mediciones de los registros y a que no se tuvo conocimiento del tipo de material al fondo del pozo, presenta valores bajos de factor de formación lo que indica que existe presencia de agua, también valores considerables de permeabilidad y porosidades del orden de 30-40%, lo que resalta en esta unidad es que la diferencia entre las resistividades es casi nula e indicaría poca presencia de agua.	Acuífero.

Con el propósito de ver el comportamiento de cada unidad se elaboraron gráficas estrella para ver el comportamiento general de cada unidad, en las Figuras 31 A, B, C , D , E ,

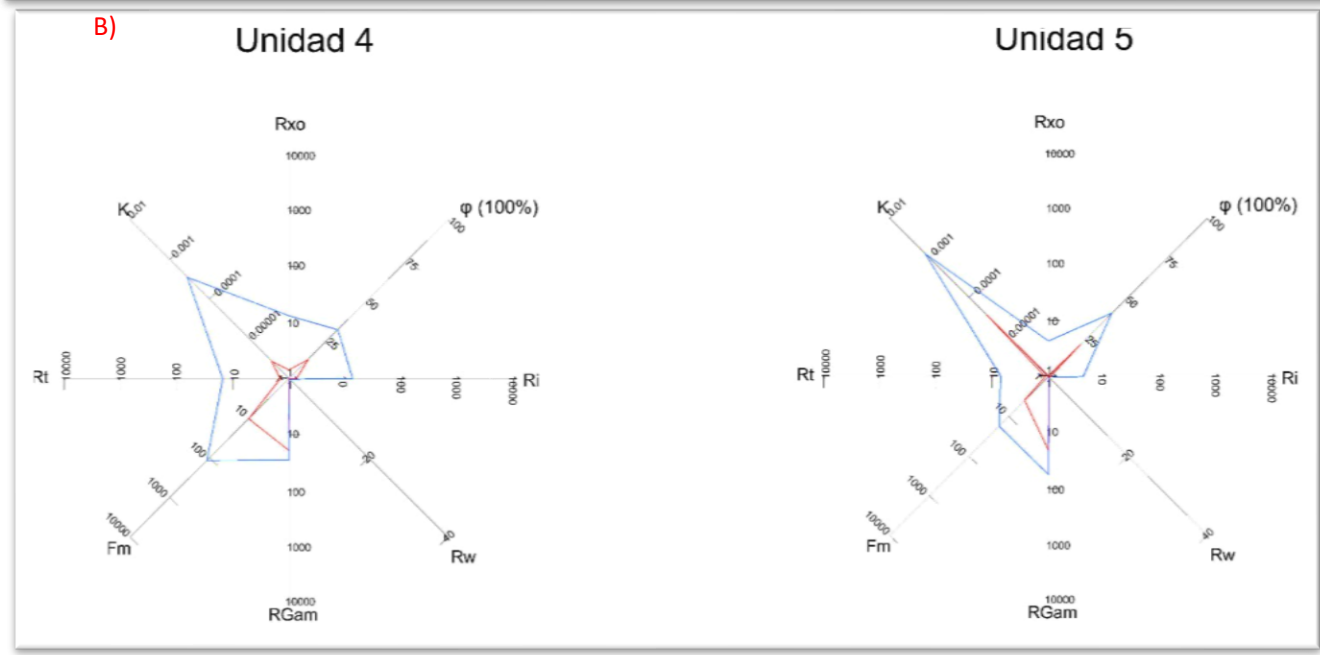
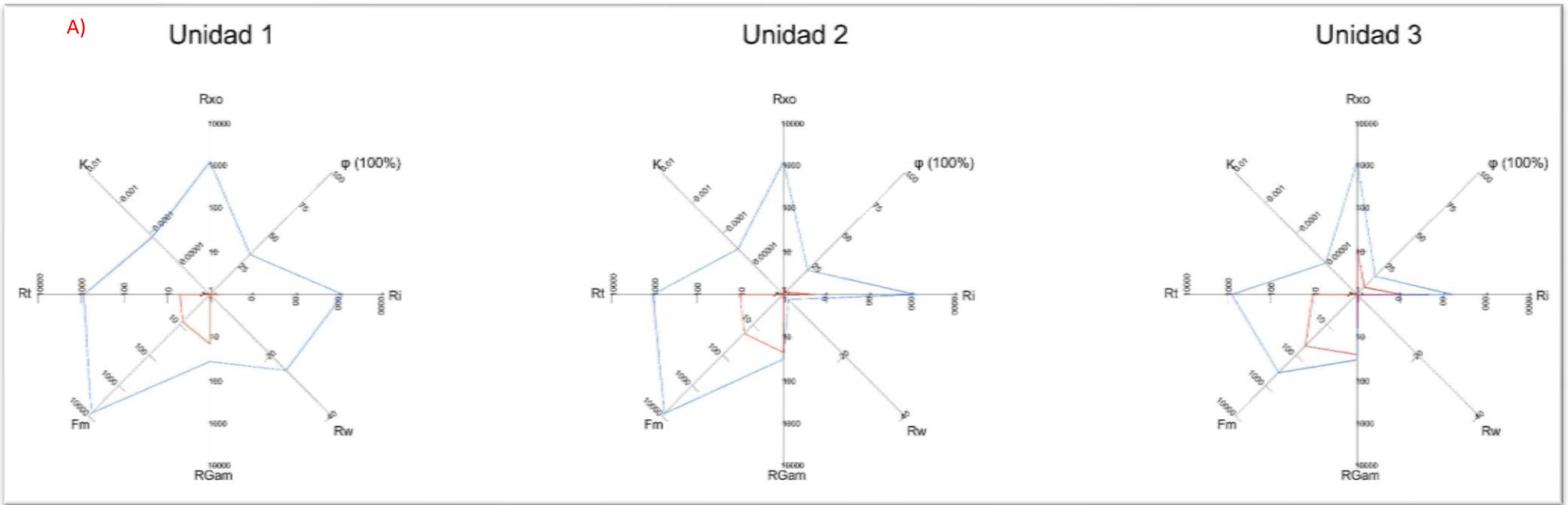
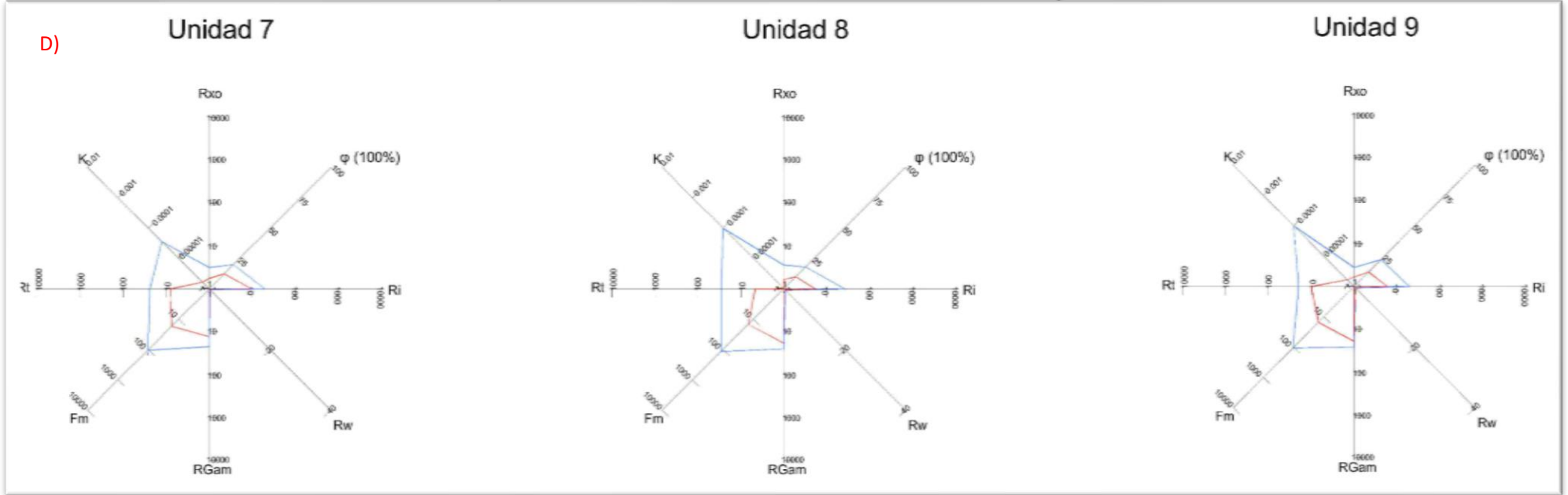
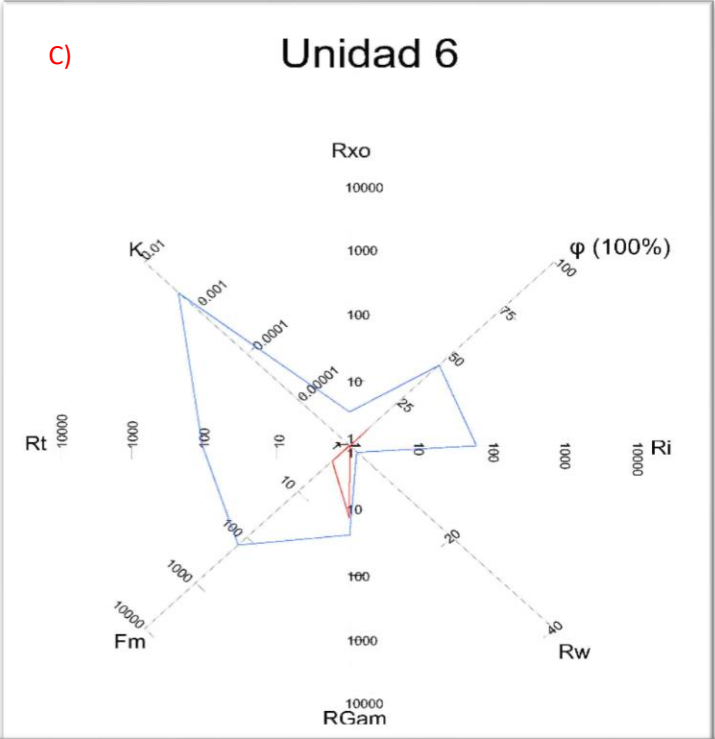
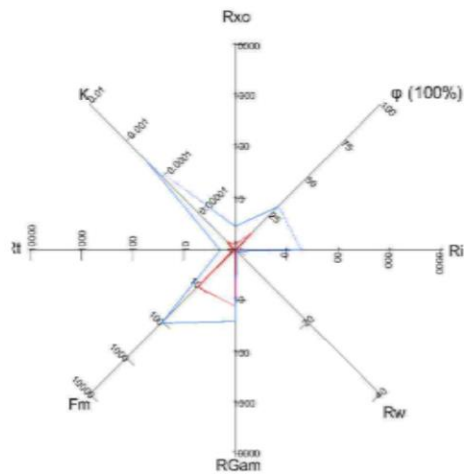


Figura 31 A, B, C, D y E Gráficas estrella representando los valores mínimos y máximos de cada unidad hidrogeológica, Rxo resistividad en la zona, Ri resistividad de la zona lavada, Rt resistividad de la zona virgen, RG Rayos gamma, Rw resistividad del agua de la formación, K permeabilidad estimada, F factor de formación y phi porosidad.

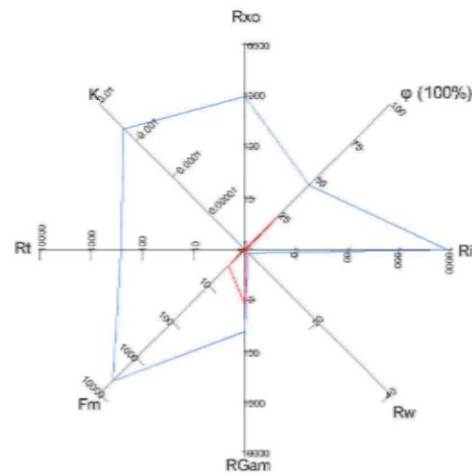


E)

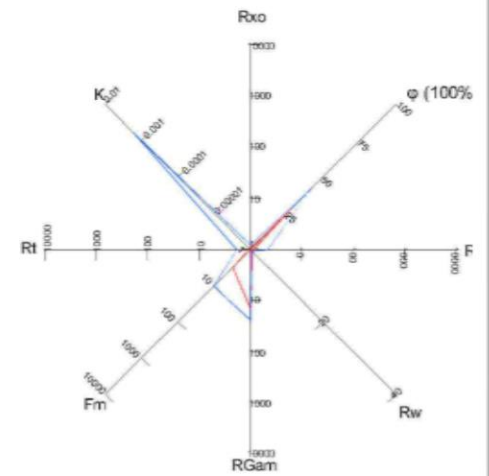
Unidad 10



Unidad 11



Unidad 12



— Valores máximos calculados para cada valor

— Valores mínimos calculados para cada valor

Las gráficas de tipo estrella fueron agrupadas mediante la similitud de valores en sus características, por ejemplo, en la Figura 31 A, se encuentran la unidad 1, 2 y 3 las cuales muestran un comportamiento similar en la gráfica, lo mismo en cada figura a excepción en la Figura 31 C en la que sólo se muestra un elemento, este elemento corresponde a las tobas finas con comportamiento de arcillas. Estas gráficas son propuestas también para futuras correlaciones entre pozos profundos de la Ciudad de México.

Después de catalogar cada unidad de acuerdo con sus características petrofísicas en la clasificación hidrogeológica tradicional, se redujeron el número de unidades en un total de 6, las cuales quedan ejemplificadas en la Figura 33 dicha clasificación coincide con la configuración hidrogeológica propuesta por Farvoladen 1989 y Mooser en 1993, Figura 9 y 10 respectivamente, en donde lo esencial radica en la presencia de tres acuíferos en la cuenca, el primero en depósitos aluviales, el segundo en depósitos volcánicos extrusivos y el último en calizas, en este pozo no se llegaron a las calizas.

La clasificación también brinda la información necesaria para reconocer que el acuífero superior y el inferior no se encuentran conectados y se trata de dos sistemas independientes, un análisis hidrogeoquímico ayudaría a respaldar esto.

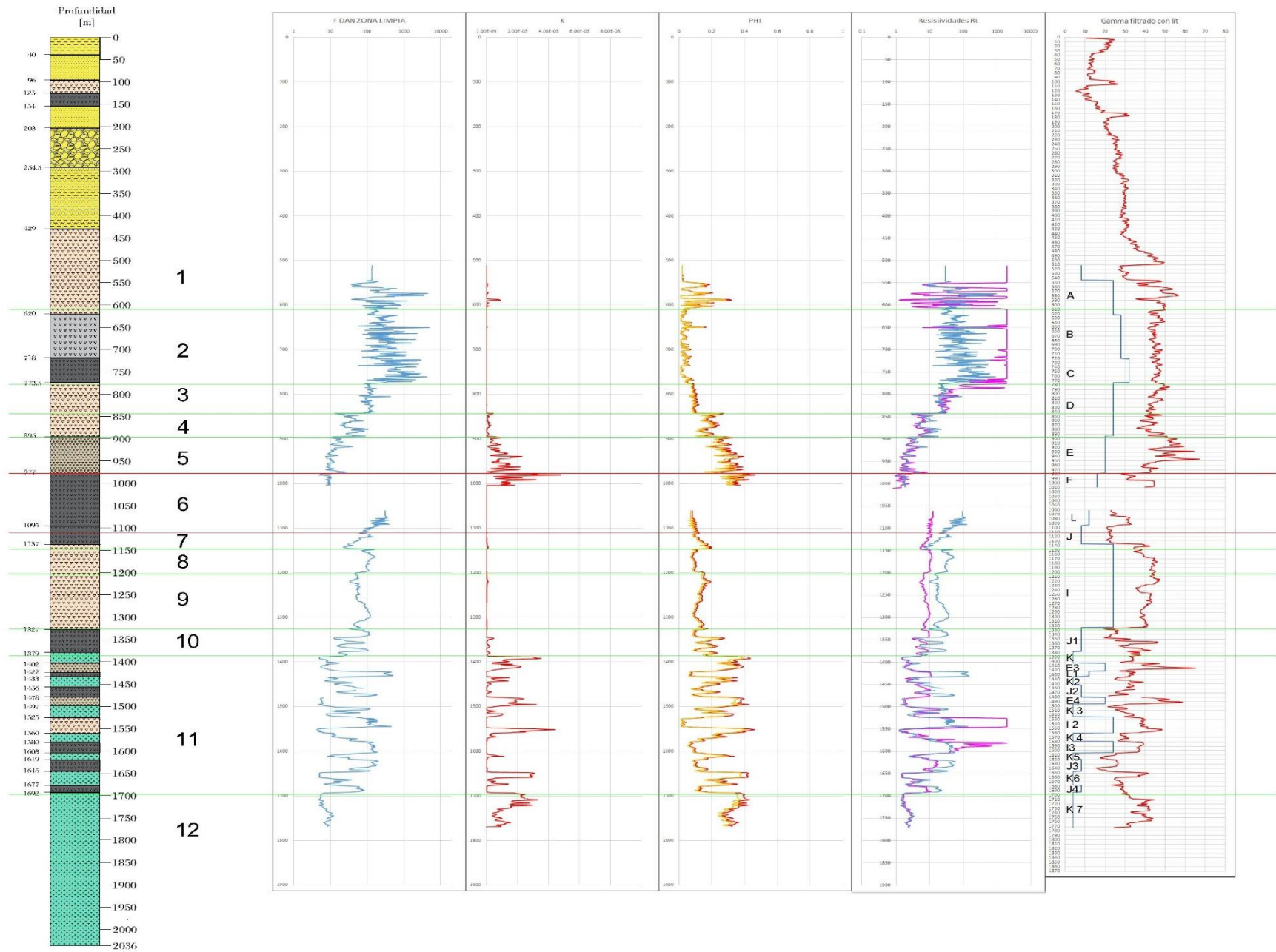


Figura 32 Correlación entre las propiedades petrofísicas de las Rocas para la definición de distintas unidades hidrogeológicas.

Acuitardo en depósitos lacustres

Acuífero superior

Acuitardo Superior

Acuícludo en tobas finas con comportamiento de arcillas

Acuitardo inferior en tobas y lavas

Acuífero Inferior

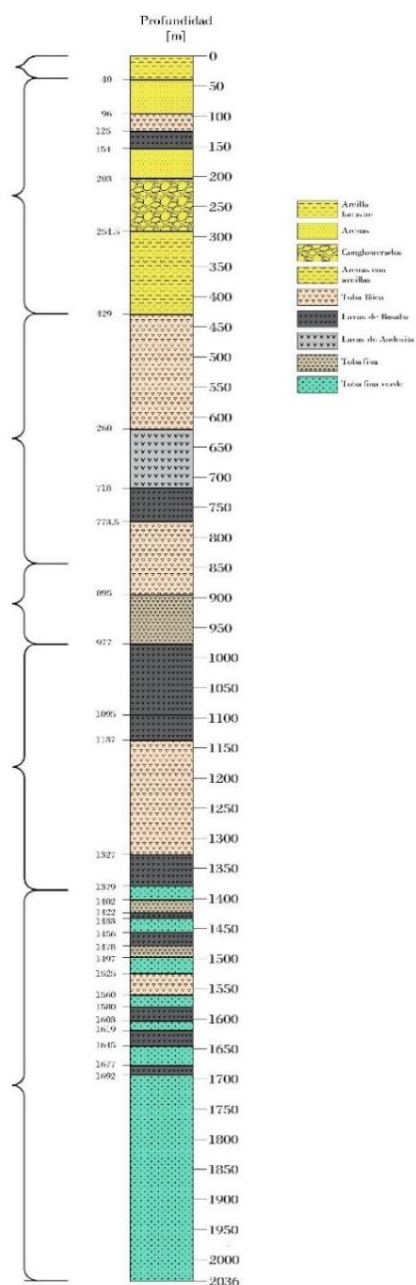


Figura 33 Clasificación hidrogeológica general del pozo Santa Catarina 3A

4.2. Correlación estratigráfica con pozos profundos cercanos

La correlación estratigráfica tiene como objetivo tener una visión compleja de la historia geológica de una región, la correlación estratigráfica, sirve para establecer una correspondencia entre partes geográficamente separadas, en el caso de la cuenca del Valle de México, existen distintos trabajos en los que se encargaron de realizar una correlación entre los pozos profundos realizados después del sismo de 1985. En el 2016 López Unda realizó su trabajo de titulación con el nombre de "Construcción y correlación de columnas litológicas de los pozos profundos del valle de México", dicho material fue empleado en este trabajo para poder correlacionar las formaciones del Santa Catarina 3A con los pozos los pozos Tulyehualco-1 y Copilco-1 los cuales se localizan en cercanía. Primero se ubicaron las unidades litológicas del Santa Catarina 3A de acuerdo con el modelo estratigráfico que Sánchez- Palomera propusieron en 1989 y después se emplearon las columnas litológicas que realizó López Unda en 2016.

En dicha correlación se evidenció que el Tulyehualco-1 el cuál se encuentra en mayor cercanía tiene una mayor similitud con el Santa Catarina 3A, brinda información que la estratigrafía en dicha zona no varía considerablemente, caso contrario con el Copilco-1 el cual sólo coincide con las rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío.

En el pozo Santa Catarina 3A, Figura 34, se identificaron las unidades.

Q1a: depósitos lacustres

Qa1: Aluvión con lentes locales de piroclásticos

Qc: Formación Chichinautzin

Qpp: Formación el Pino

Tmv: rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío

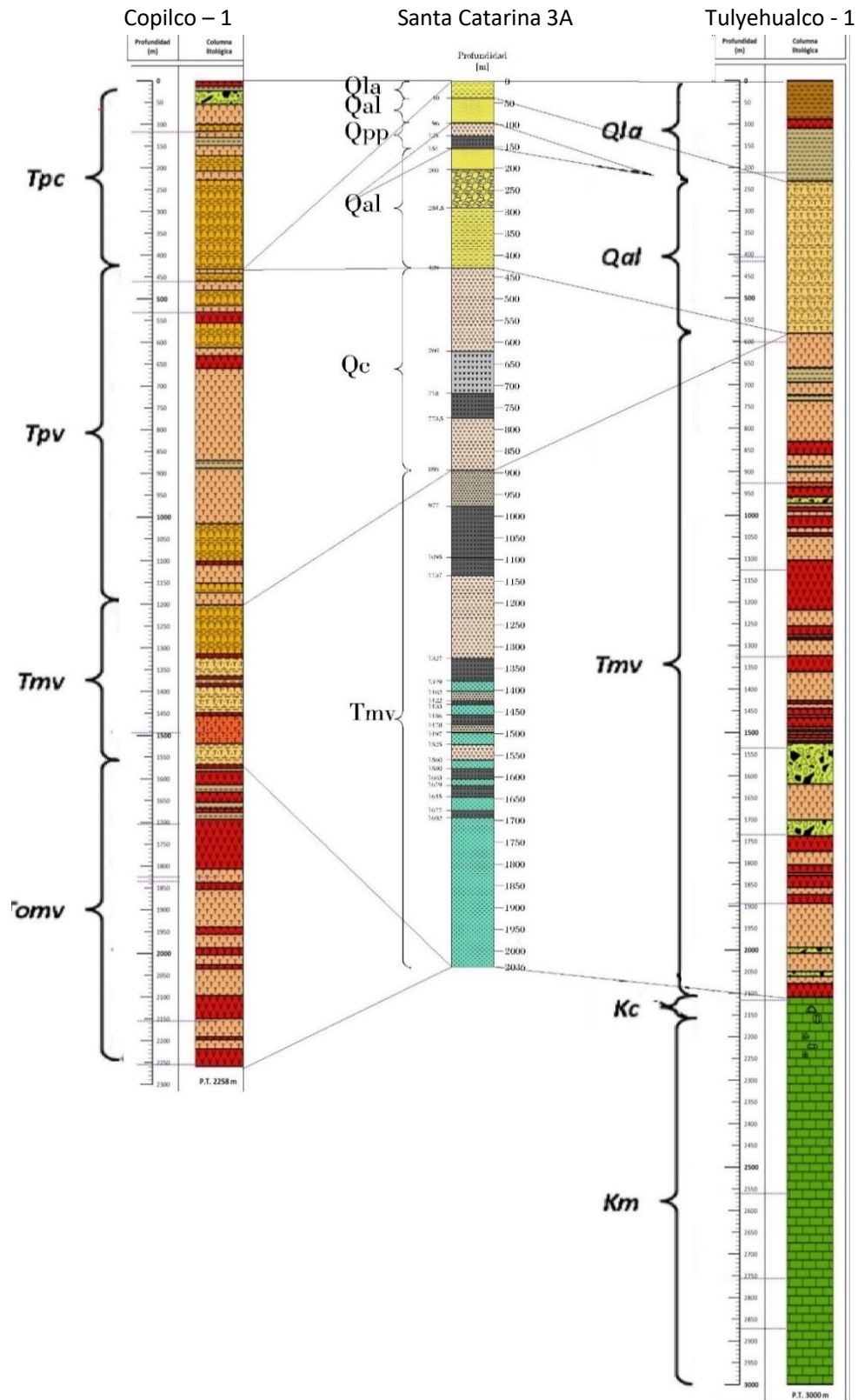


Figura 34 Correlación estratigráfica con los pozos profundos más cercanos, Tulyehualco-1 y Copilco-1.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se propone una metodología para interpretar la litología de un pozo, a partir de registros geofísicos de pozos en rocas volcánicas, cuando no hay recuperación de muestras de canal o núcleos de roca. En la Figura 35 se muestra la secuencia.
- La interpretación geofísica juega un papel muy importante en los casos en los que no se cuenta con todos los datos de campo; en este caso, el pozo presentó pérdidas de circulación de lodo a partir de los 1 080 m y no se recuperaron las muestras de canal, la perforación exploratoria obtuvo muestras de canal a partir de los 80- 140 m y 547 a 1 080 m. Sin embargo, para poder llevar a cabo esta metodología, es necesario contar con un marco conceptual de la zona bien definido y una caracterización detallada con base en la información que proporcionan los registros geofísicos de pozo.
- Con lo anterior se pudo llevar a cabo la caracterización de la zona e inferir con mejor precisión la columna litológica del pozo.
- En la evolución de la historia geológica de la cuenca fue un elemento esencial para la reconstrucción de la columna, ya que, conociendo el tipo de evento volcánico y composición, se asociaron los valores de radiactividad al tipo de composición de la roca volcánica (básica, intermedia y ácida).
- El registro de resistividad revela también variaciones en la composición de la roca volcánica (a mayor resistividad se asocia a derrames y entre menos resistiva a rocas efusivas tobas, lapilli, lahares).

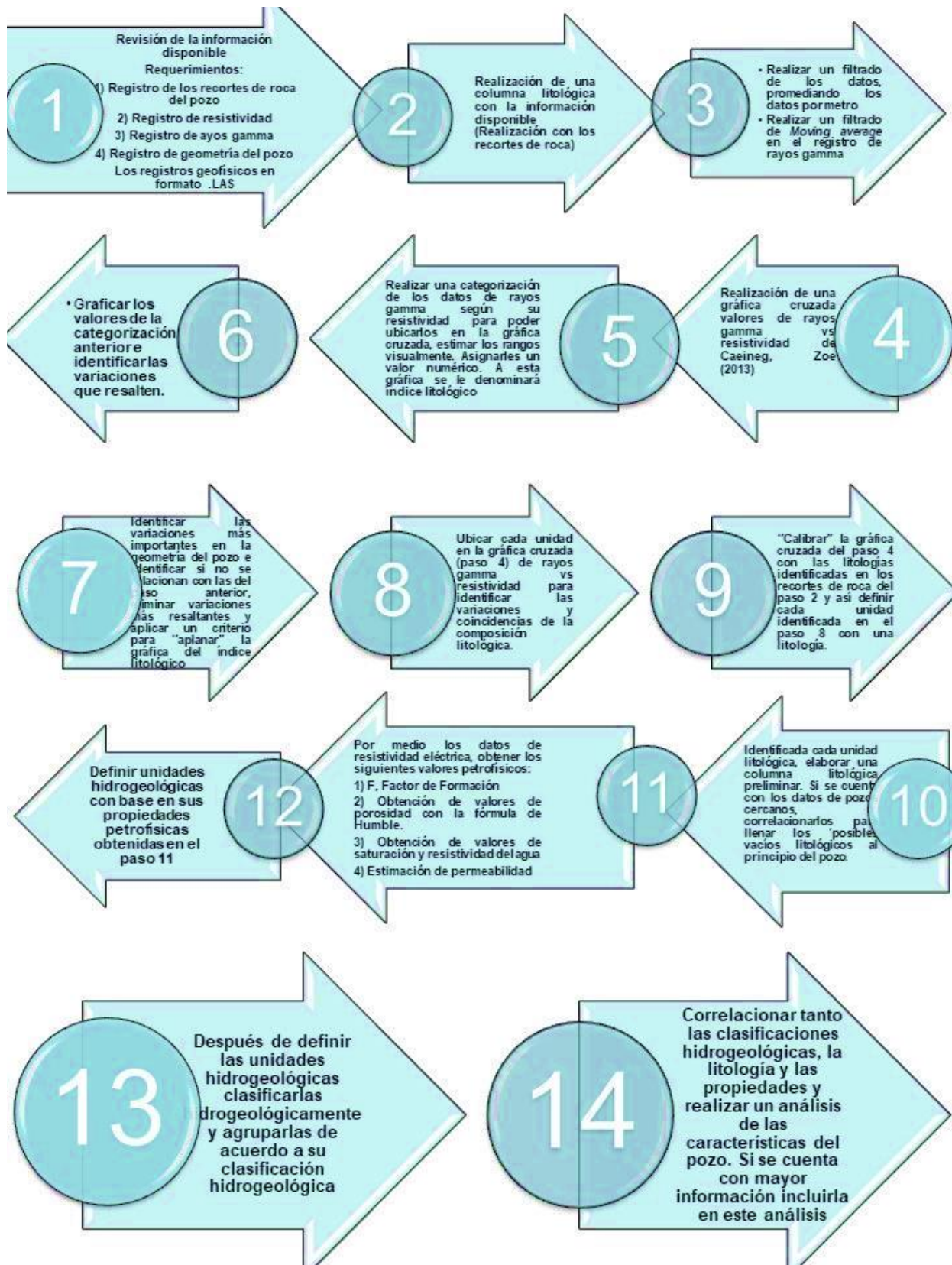


Figura 35 Metodología propuesta

- La composición de las rocas en el pozo revela información sobre la historia geológica de la zona, tomando en cuenta que la radiactividad aumenta cuando la composición se vuelve más ácida se puede inferir lo siguiente: En el fondo del pozo la composición varía entre más básica e intermedia, posiblemente porque el magma en su camino fusionó diferentes tipos de rocas que modificaron su composición o que las lavas se produjeron en episodios intermitentes que propiciaron la cristalización y dejaron enriquecido el magma en sílice y eso explicaría la intercalación entre lavas (básicas-intermedias) a Tobas un poco más ácidas, este comportamiento se ve en las profundidades entre los 1 327 y 1 700 m. Posiblemente se detuvo la actividad volcánica lo que permitió la cristalización y enriquecimiento en sílice para que en el siguiente pulso magmático la composición fuera más ácida entre los 1 137 y 1 327 m correspondiente a lo clasificado como tobas líticas. La composición varió a más básica con menos radiactividad entre los 977 y los 1 137 correspondiente a rocas identificadas como basálticas, subsecuentemente la composición volvió a comportarse más ácida en las tobas finas con comportamiento de arcillas entre los 895 y los 977, a partir de ahí la composición de las rocas fue menos radiactiva lo que significa que se comportó más básica, pero tomando en cuenta que los depósitos menos profundos corresponden entre basaltos y andesitas a depósitos aluviales. Diferentes pulsos volcánicos quedan evidenciados en el registro de rayos gamma.
- La geometría del pozo jugó un papel muy importante en los datos ya que los datos en estas zonas se veían altamente alterados y jugó un papel muy importante en la interpretación en la definición de las unidades litológicas
- Se infirieron las propiedades petrofísicas de las rocas mediante la resistividad de las rocas. Aclarando que las ecuaciones aplicadas no dan resultados cuantitativos, dieron la pauta para identificar anomalías en la naturaleza de las propiedades, por ejemplo valores teóricos obtenidos de Factor de Formación indican implica que el medio geológico analizado no es totalmente granular por los altos valores determinados; sin embargo, es un parámetro que permitió estimar que la permeabilidad, porosidad y resistividad del agua son favorables en el segundo acuífero que va de 1 386 hasta el fondo del pozo.

- Al definir las unidades hidrogeológicas se reconocieron y comprobaron los modelos propuestos por Farvoladen en 1989 y F. Mooser en 1993, adicionando que en cada acuífero las rocas se comportan con más de una clasificación hidrogeológica ya que en el análisis realizado indica que los límites de las unidades hidrogeológicas que se propusieron no coinciden con exactitud con los límites litológicos, esto demuestra que un mismo tipo de roca presenta más de un comportamiento hidráulico en el subsuelo.
- Tal como en el marco teórico se expuso, el acuífero medio se encuentra sobre las rocas del Mioceno, en este pozo, las rocas que aportan la mayor cantidad de agua por debajo de los 500 m son las tobas del Mioceno.
- En este pozo existe un horizonte el cual separa el comportamiento hidráulico en dos diferentes sistemas, el primer y segundo acuífero, se trata de las tobas finas con comportamiento de acillas
- La correlación con los pozos profundos aledaños revela que la geología en la región de Xochimilco no varía significativamente, pero aunado al mapa gravimétrico de la imagen X podemos inferir que mientras más se acerque a valores de un bajo gravimétrico la posición del pozo más contenido de material aluvial tendrá y la variación entre pozos se verá más afectada.
- El pozo dio un gasto máximo 150 lps en el aforo. Se desconoce el intervalo que está produciendo y la profundidad de la bomba, así como también si hay variación en los niveles piezométricos del acuífero superior con el intermedio, el nivel estático se ubicó a los 45.74 m, se desconoce cuál es la posición del nivel estático del acuífero superior. Actualmente este pozo provee un gasto de 70 lps.
- Con este estudio se plantea una nueva forma de evaluar acuíferos, conjuntando tanto información directa como indirecta; así mismo, los parámetros petrofísicos en pozos profundos (porosidad, permeabilidad, entre otros), vienen a solucionar la problemática de los responsables de la toma de decisiones en cuanto a si el pozo producirá o no agua.

5.2. Recomendaciones

- Dado que la inversión es muy alta en la perforación de pozos profundos, es recomendable que en cada pozo se corran todos los registros de pozos para determinar mejor las propiedades físicas y determinar mejor las propiedades petrofísicas.
- Aunque del registro inductivo se puede generar valiosa información petrofísica, es recomendable realizar todos los registros de pozos, ya que el objetivo mayor de los pozos profundos es el de exploración.
- Se recomienda tener un registro riguroso de las muestras de roca.
- Fechamiento del agua para ayudar a comprobar que no existe comunicación entre el primer y segundo acuífero.
- Continuar con la exploración geológica profunda del valle de México, ya que con mayor cantidad de pozos se puede desarrollar una investigación más fructífera y permitirá desarrollar alternativas para el abastecimiento de agua del futuro cercano de la CDMX, a su vez se podrían implementar programas para dejar recargar el primer acuífero.

BIBLIOGRAFÍA

- Arroyo, Francisco Alejandro. *Apuntes de registros geofísicos de pozos*. Ciudad de México: UNAM, 1996.
- Arroyo, Francisco Alejandro, y Federico Mooser. «Mixhuca-1.» Ciudad de México, 2016.
- Campa-Uranga, María Fernanda, Rafael Torres de León, Alexander Iriondo, y Wayne R. Premo. «Caracterización geológica de los ensambles metamórficos de Taxco y Taxco el Viejo, Guerrero, México.» *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 64*, 2012: 369-385.
- Compañía Mexicana de Exploraciones. «Deep Groundwater Prospecting in Mexico City Through Seismic-reflection Methodology.» *The Leading Edge*, 2014: 758-763.
- CONAGUA. *Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. CDMX: CONAGUA, 2015.
- Ferrari, Luca, Margarita López Martínez, Norma Gonzales Cervantes, Jorge Jacobo Albarrán, y María del Sol Hernández Bernal. «Volcanic record and age of formation of the México City basin.» *GEOS, Vol 23, No 2*, 2003: 120.
- Fetter, C W. *Applied Hydrogeology*. Nueva Jersey, EUA: Prentice Hall, 1994.
- Gil Frausto, Karen Michelle. «Identificación y cartografía del peligro por fenómenos de remoción en masa que afectan los poblados de la delegación Xochimilco.» *Tesis que para obtener el título de Ingeniera Geóloga*. Ciudad de México: UNAM, 2015.
- González Torres, Enrique Alejandro, Dante J Morán Centeno, Laura Mori, y Barbara M Martiny. «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, Vol. 67*, 2015: 285-297.
- Maxey, G.B. «Hydrostratigraphic units.» *Journal of Hydrology*, 1964: 124-129.
- Mazari, Marisa. «Potencial for groundwater contamination in México City.» *Environmental Science Technology Vol. 27. No. 5*, 1993: 794.
- Molina Berbeyer, Rafael. «Hundimiento de la Ciudad de México y su relación con los estudios de mecánica de suelos, geoquímicos, geofísicos y geológicos de las aguas del subsuelo de la Cuenca del Valle de México.» *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 1957.
- Mooser, Federico. *Geología del Valle de México y otras regiones del país*. Ciudad de México: Colegio de Ingenieros Civiles de México, A. C., 2018.
- Mooser, Federico, y Arturo Montiel. «El relleno post-chichinautzin del valle de México y su relación con la intensidad sísmica.» *Simposio sobre tópicos geológicos de la Cuenca del Valle de México*, 1989: 55-60.
- Mooser, Federico, y Claudio Molina. «Nuevo Modelo Hidrogeológico para la Cuenca de México.» *Boletín Centro de Investigación sísmica de la fundación Javier Barros Sierra, Vol. 3*, 1993: 69-84.

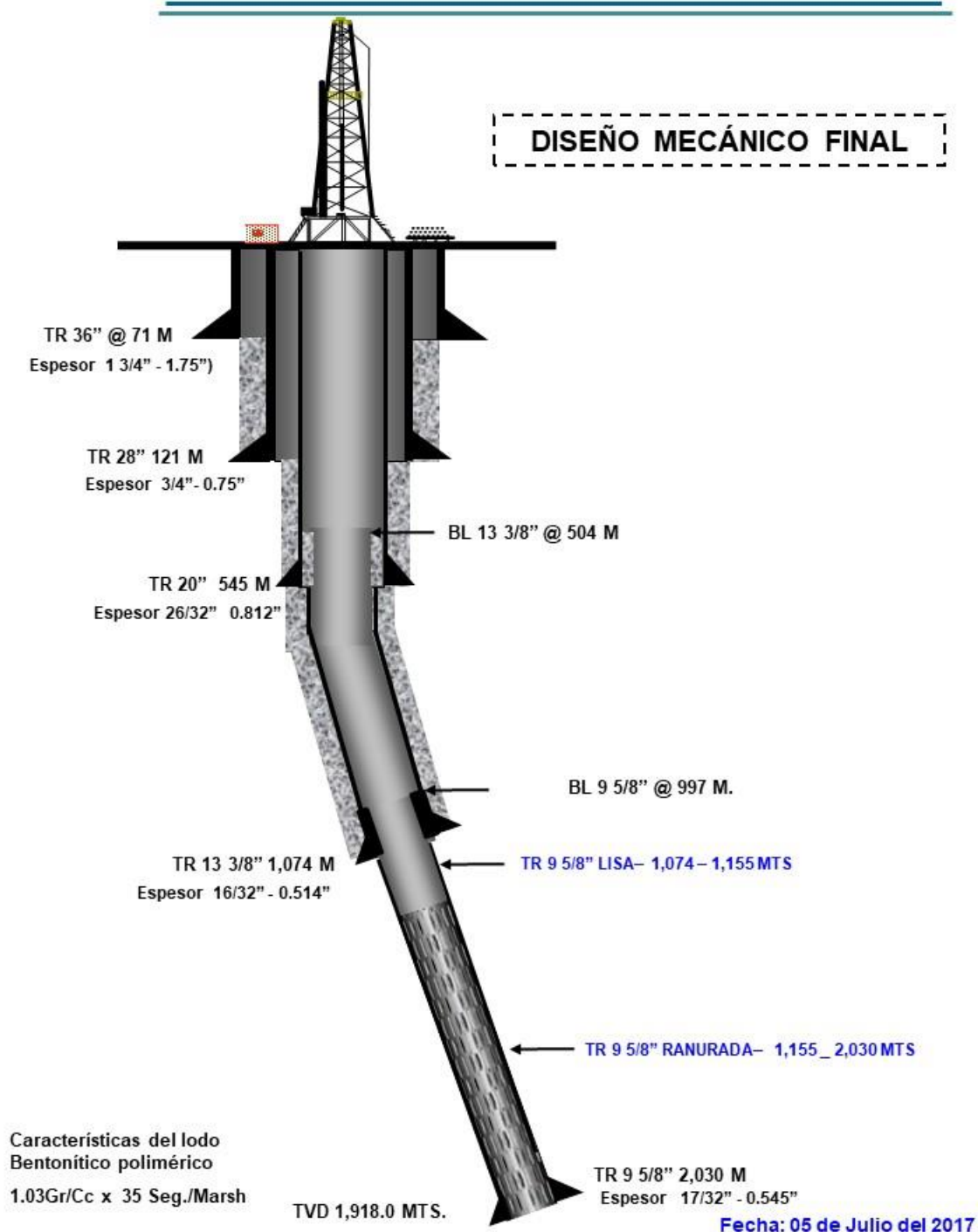
- Mooser, Federico, Arturo Montiel, y Ángel Zúñiga. *Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla*. Ciudad de México: Comisión Federal de Electricidad, CFE, 1996.
- National Research Council. *Mexico City's Water Supply: Improving the Outlook for Sustainability*. Washington: The National Academies, 1995.
- ONU. *Naciones Unidas*. 08 de Agosto de 2018. <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>.
- Ortega, Adrian , y R. N. Farvoladen . «Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the basin of México.» *Journal Hidrology* , 1989: 271-293.
- Santoyo Villa, Enrique, Efrain Ovando Shelley, Federico Mooser, y Elvira León Plata. *Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. c, 2005.
- . *Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. Ciudad de México: TGC, 2005.
- Santoyo, Enrique. *Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. México: TGC, 2005.
- Schlumberguer. *Symbols Used in log Interpretation*. 1998. <https://bit.ly/2DLwU3Z>.
- Seaber, P.R. «Definition of hydrostratigraphic units.» *2nd Annual Symposium on Florida Hydrogeology, Northwest Florida Water Management District Public Information Bulletin 82*, 1986: 25-26.
- Timour. «An Investigation Of Permeability, Porosity, & Residual Water Saturation Relationships For Sandstone Reservoirs.» *Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, Vol. 9* , 1968: 10 .
- Unda López, José Antonio. «Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del Valle de México.» *Tesis que para obtener el título de Ingeniero Geólogo*. Ciudad de México , Ciudad Universitaria , Enero de 2016.
- Vásquez, Gabriel. «Usuarios Geofísica UNAM.» *Clase 15 Columnas estratigráficas*. 2016. <https://bit.ly/2B4ImpL>.
- Vázquez-Sánchez, E, y R Jaimes-Palomera. «Geología de la Cuenca de México.» *Geofísica Intenacional*, 1989: 133-189.
- Wikimedia Commons*. 16 de Nov de 2018. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10393915>.
- Zou, Caineng. «Geological concepts, characteristics, resource potencialand key techniques of unconventional hydrocarborns: On unconventional petroleum geology.» *CNKI*, 2013.

ANEXOS

- Diseño del pozo

ESTADO MECANICO ACTUAL

POZO: SANTA CATARINA 3-A
EQUIPO: PM-1282



- Primer aforo realizado en el Santa Catarina 3A

AFORO POZO SANTA CATARINA 3-A.								
FECHA	HORA	Q lt/seg	RPM	NIVEL ESTATICO	NIVEL DINAMICO	TEMPERATURA °C	VOLUMEN RECUPERADO m3.	HRS. ACUMULADAS AFORO
BBA. VERTICAL DE 12" CON TR 8" @ 150 m- 13-jul-17								
13/07/2017	21:00:00	11	1200	75	83.24	42	118.8	3
14/07/2017	21:00:00	20	1300	75	88.18	32	1249	24
16/07/2017	20:00:00	7.5	1200	78	81.6	36	1357	28
17/07/2017	23:00:00	30.48	1000	78	81.4	40	2855	52
18/07/2017	23:00:00	70.02	1600	78	79.2	29	7477	76
19/07/2017	23:00:00	105.59	1800	78	54.25	46	14730	100
20/07/2017	23:00:00	125	1900	78	45.69	40	23476	128.3
21/07/2017	23:00:00	50.04	1500	78	45.69	40	29822	140
22/07/2017	08:00:00	50.04	1500	78	45.7	40	31263	148
24/07/2017	23:00:00	30.48	1400	78	45.73	44	32321	157
25/07/2017	23:00:00	30.48	1400	78	45.75	45	34735	179
26/07/2017	07:00:00	30.48	1400	78	45.74	45	35504	186
BBA. VERTICAL DE 16" CON TR 8" @ 127 m- 28 jul-17								
30/07/2017	24:00:00	64.02	1500	77	99.62	44	38442	202
31/07/2017	24:00:00	64.02	1500	77	92.3	40	42575	225
BBA. VERTICAL DE 16" CON TR 8" @ 159 m- 01 ago-17								
02/08/2017	23:00:00	95.02	1700	74.8	102.09	46	45511	241
03/08/2017	15:00:00	118	1800	74.8	137.7	45	49342.23	256
04/08/2017	23:00:00	22.35	1200	78.12	81.8	45	50629.5	272
05/08/2017	16:00:00	22.35	1200	78.12	81.66	45	51916.95	288

- Segundo aforo Pozo SC-3^a.El segundo aforo del pozo SC3A realizado del 08 al 09 de marzo de 2018, obteniendo los siguientes datos durante su operación:

hora	l/s	m		
02:55		63.2	263719.6	1300
03:55	33.92	96.27	263890.0	
04:55	32.44	96.42	263972.0	
05:55	37.77	98.07	264108.0	
06:55	38.05	98.07	264245.0	
07:55	41.11	98.29	264343.0	
08:55	33.05	98.65	264530.0	
09:55	37.22	98.05	264664.0	
10:55	41.11	97.81	264812.0	
11:30	46.66	97.425	264896.0	
12:30	41.38	104.645	265045.0	1350
13:30	42.77	105.695	265199.0	
14:30	46.38	105.775	265366.0	
15:30	40.83	107.405	265513.0	
16:30	47.77	107.185	265685.0	1400
17:00	41.11	107.045	265759.0	
18:00	45	117.855	265921.0	
19:00	56.11	118.245	266123.0	
20:00	51.6	117.825	266309.0	
21:00	48.33	117.855	266483.0	1600
22:00	58.33	127.395	266693.0	
23:00	53.88	127.365	266887.0	
00:00	51.38	127.375	267072.0	
01:00	60	127.705	267288.0	
02:00	55.55	127.585	267488.0	
03:00	56.38	127.775	267691.0	
04:00	55	127.785	267889.0	
05:00	55.27	127.725	268088.0	
06:00	56.94	128.135	268293.0	
07:00	55.83	127.765	268474.0	
08:00	60.55	135.785	268912.0	1700
09:00	61.11	134.385	268932.0	

