



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Correlación Geológica -
Registros Geofísicos de
Pozos Profundos para Agua
(Caso Valle de México)**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A N

Gabriela del Carmen Espinosa Arce

Alfredo Eduardo Silva Bustamante

DIRECTOR(A) DE TESIS

Ing. Francisco Alejandro Arroyo
Carrasco



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

OFICIO FING-DICT-GF/14/2021

Asunto: Autorización para obtener la información de los registros de pozos de los pozos profundos

DR. RAFAEL BERNARDO CARMONA PAREDES
COORDINADOR GENERAL
SISTEMA DE AGUAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO
P R E S E N T E

Por medio del presente, solicito de la manera más atenta la autorización para obtener la información de los registros de pozos de los pozos profundos Agrícola Oriental, El Mirador y Santa Catarina, en formato LAS, para que dos alumnos de la carrera de Ingeniería Geofísica puedan realizar el procesamiento de la información y la descripción de los cortes litológicos de los pozos, además de la elaboración de una Tesis, cuyo título sería **“Correlación Geológica - Registros Geofísicos de Pozos Profundos para Agua (Caso Valle de México)”**.

En su trabajo de tesis se hará referencia a que la información es propiedad del SACMEX, así como también se les entregará un volumen del trabajo con los resultados obtenidos, lo cual aportará al SACMEX un criterio adicional del conocimiento de las condiciones geológicas del subsuelo y le apoyará en la toma de decisiones en futuros proyectos relacionados con el acuífero profundo. El objetivo de dicha Tesis es analizar la información resistiva y radiactiva obtenida para plantear una nueva metodología sobre la correlación de dicha información, con el fin de aprovecharla para apoyar a los hidrogeólogos a definir la geología del subsuelo.

El responsable de la dirección del trabajo es el Ing. Francisco Alejandro Arroyo Carrasco, profesor de la asignatura *Temas Selectos de Hidrogeología*, que se imparte en el último semestre de la carrera. Como parte del proceso para obtener el título de licenciatura, los alumnos de la carrera de Ingeniería Geofísica, Gabriela del Carmen Espinosa Arce y Alfredo Eduardo Silva Bustamante, de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, con número de cuenta 415096584 y 310317786, respectivamente, realizarán el trabajo.

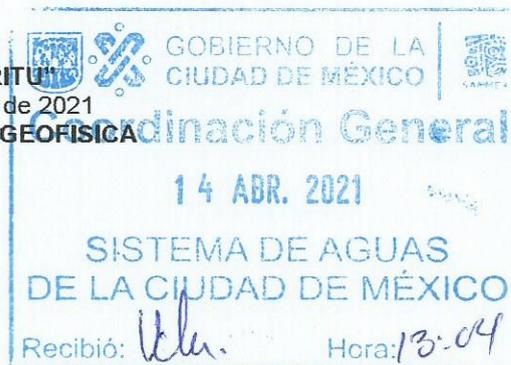
Asimismo, agradeceré se informe a los pasantes sobre la decisión que se tome respecto a la información solicitada y se les den instrucciones sobre la situación de ésta. Los correos electrónicos de los alumnos son los siguientes: gabriela.espinosaarce@gmail.com y alf.edu.sil.bus@hotmail.com

Sin otro particular, agradezco la atención y aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”
Cd. Universitaria, Cd. Mx., a 8 de abril de 2021
EL JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

MC. DAVID ESCOBEDO ZENIL.



UnAm
La Universidad de la Nueva América



Ccp: Lic. Raúl Othón San Martín Silva. Gerencia General de Coordinación Institucional de Operación y Servicios

DEZ/bal

Circuito Escolar, Facultad de Ingeniería PB Edificio Principal "A", Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, CP 04510, Teléfono +52 (55)562-20851, Ext. 420

dezenil@unam.mx dezenil@gmail.com
www.dict.unam.mx

Índice

Agradecimientos	2
De Gabriela	2
De Alfredo	3
Resumen	4
Abstract	5
Introducción	6
Capítulo 1. Marco geológico - hidrogeológico del acuífero del Valle de México	8
1.1 Ubicación de la zona de estudio	12
1.2 Geología, estratigrafía e historia geológica de la Cuenca de México	13
1.3 Hidrogeología	22
1.4 Geología particular de los pozos profundos	24
1.4.1 Mixhuca-1	24
1.4.2 Santa Catarina	27
Capítulo 2. Análisis de señales	31
2.1 Tipos de señales	31
2.2 Teorema de muestreo	33
2.3 Filtro media móvil	33
Capítulo 3. Respuesta física de las unidades litológicas identificadas a partir de los registros geofísicos de pozos	36
3.1 Respuesta radiactiva y resistiva en rocas volcánicas	36
3.1.1 Problemas en la perforación y estabilidad de pozo	40
3.2 Registro de Rayos Gamma	41
3.3 Registro de Resistividad	44
3.4 Filtrado y Zonificación de registros	46
Capítulo 4. Correlación geológica de los registros	56
Conclusiones y recomendaciones	77
Referencias	79
Anexos	82

Agradecimientos

Agradecemos al Sistema de Aguas de la Ciudad de México, SACMEX, por proporcionarnos la información referente a los pozos profundos Mixhuca-1, Mirador 2 y Santa Catarina, pues fueron la base de este trabajo. También agradecemos al Ingeniero Federico Mooser y al Doctor Enrique González Torres por su investigación y publicaciones sobre la geología de la Cuenca de México, gracias a ellas es que pudimos llevar a cabo este trabajo de Tesis.

A nuestro asesor y director de Tesis, el Ingeniero Francisco Alejandro Arroyo Carrasco, por la paciencia que nos tuvo todo este tiempo y no perder la fe en nosotros, por orientarnos y apoyarnos en todo momento. Le estaremos agradecidos siempre por todos sus consejos y enseñanzas, pues gracias a ello es que este trabajo fue desarrollado.

A nuestros profesores que también nos brindaron sus conocimientos a lo largo de la carrera y a aquellos especialmente que nos inspiraron y guiaron.

A nuestra querida Universidad, la UNAM, a nuestra amada Facultad de Ingeniería y al Gabinete de Geofísica, porque nos ayudaron cuando lo necesitábamos y nos inspiraron.

De Gabriela

En memoria de mi abuelito, que sigue siendo mi ejemplo a seguir, que siempre creyó en mí y me dio lo mejor de sí. Te amaré siempre, estés donde estés.

A mi familia, por todo su apoyo y amor incondicional, por creer en mi capacidad. A mi madre, que gracias a ella me decidí a estudiar Ingeniería y que supo orientarme, motivarme y darme consejos. Gracias a ti he logrado muchos de mis sueños y por tu esfuerzo y perseverancia alcancé esta meta. A mi padre, que siempre nos dio la mejor educación y apoyo, sin ti no hubiera sido la misma historia y no hubiera podido viajar para hacer mis prácticas. A mi hermana, que siempre me acompañó en mis tareas y me escuchó cuando lo necesité. Gracias por tu motivación para que siguiera adelante y por desvelarte conmigo, por festejar mis logros. Siempre serás mi gran amiga y cómplice. A mi sobrino, por sus ocurrencias que me hicieron más divertida y liviana la pandemia, además de las enseñanzas que he tenido desde que llegaste a nuestras vidas.

A Alfredo, por ser un gran compañero de clases, de tesis y de vida. Agradezco el esfuerzo que has invertido conmigo para cumplir este sueño y alcanzar nuestra meta. Has sido de gran ayuda para entender muchas cosas de la carrera y para ser mejor persona cada día. A sus padres, que nos apoyaban también cada tarde que teníamos que trabajar y por creer también en nosotros.

Los amo a cada uno de ustedes y agradezco a la vida y a Dios.

A mis amigos, en especial a Jesi, Javi, Dan, Ely, Phanie y Lili, por darme ánimos, por las aventuras vividas en la Facultad y por la diversión de las prácticas de campo.

De Alfredo

Agradezco por toda la ayuda incondicional que me brindaron mis padres desde mis primeros pasos, gracias por creer en mí en todo momento. A ti mamá, te agradezco que te hayas convertido en esa persona que necesitaba en los momentos más importantes, gracias por compartir risas, tristezas y todo tipo de situaciones que ocurrieron a lo largo de todos estos años, te agradezco que me hayas ayudado a no dejar de esforzarme cada día y que jamás me debo de rendir. A mi papá, te agradezco las enseñanzas que me dejaste, por apoyarme de todas las maneras posibles, en especial con tus comentarios, gracias por plantarme los pies en la tierra, por dejarme mucha de tu experiencia que estoy seguro que sin ti jamás la hubiera comprendido y que la tendré siempre presente junto a tu recuerdo. Agradezco infinitamente el haberme dado la oportunidad de tener padres que me han hecho ser una mejor persona y de darme el deseo de querer ser cada día mejor, además de inculcarme el tener siempre aspiraciones más grandes.

A mis tías, les agradezco el gran apoyo que me han proporcionado todo este tiempo, sin ustedes muchas cosas hubieran sido más complicadas o posiblemente nunca hubieran tenido lugar, gracias por escucharme y por motivarme siempre. Oli, gracias por todo tu apoyo, gracias a eso es que se ha logrado gran parte de esto, te estaré siempre agradecido y no desperdiciaré esta oportunidad que me has dado.

A mis primos, por mostrarme que con el resultado de este esfuerzo puedo lograr muchas cosas más y por todos sus consejos.

A mis amigos, Jorge, Alitzel y Erick, gracias por siempre decirme las palabras necesarias para siempre tener motivación y que los malos ratos no fueran tan malos, por hacer que todo este tiempo de escuela fuera más divertido y por siempre acompañarme en mis aventuras.

Gabriela, gracias por tener toda esa perseverancia, optimismo, cariño y por brindarme apoyo a lo largo de toda esta experiencia, gracias por ser una muy buena amiga y compañera, además de querer que progreseemos juntos en la vida, comenzando por esta tesis. Juntos podremos superar todos los retos que se nos pongan en la vida, gracias por formar parte de este proceso tan importante en mi vida, además de querer acompañarme en mis próximas aventuras.

Gracias a tu familia por siempre motivarnos con sus palabras y tener confianza en nosotros.

Gracias a todos por ser el mejor apoyo para mí y por dejar huella en mi vida, eso es algo que aprecio con el alma y que lo atesoraré siempre.

Resumen

Se plantea una forma de aprovechar la información obtenida de las curvas de Resistividad y de Rayos Gamma de un Registro Geofísico de Pozo aplicados a la hidrogeología. Si bien existe un amplio conocimiento de éstos en el área petrolera, para el caso del agua apenas se empiezan a aplicar de manera cuantitativa. Para el caso de este trabajo, se tratan rocas de carácter volcánico; sin embargo, la información es de utilidad para apoyar a conformar el marco de referencia que se presenta en el subsuelo a partir de la medición de propiedades físicas en un pozo.

Para el desarrollo del trabajo, se tomó en consideración información de tres pozos profundos perforados recientemente en el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCDMX) y cuya profundidad superó los 1500 m, situación por la cual se emplearon registros de pozos que se ocupan en el área petrolera para la evaluación del subsuelo, haciendo los ajustes necesarios dada la calibración a la que están sujetas las diferentes herramientas.

El objetivo del trabajo fue caracterizar el subsuelo de la zona donde se ubican los pozos de estudio, denominados: Mixhuca 1, Mirador 2 y Santa Catarina 3-A, con el fin de conocer qué tanto se correlacionan con base en la respuesta eléctrica-radiactiva, tomando como apoyo la información litológica derivada de la perforación. Hay que resaltar que la aplicación de los Registros Geofísicos de Pozos no es con fines exploratorios, sino para tomar decisiones finales en cuanto a la productividad.

Como parte del trabajo y novedad, a la información cruda se aplicaron filtros digitales para conocer el comportamiento regional de las unidades litológicas existentes, eliminando el ruido ocasionado por el diámetro del agujero y efectos estadísticos, entre otros. Se aclara que no se aplicó corrección a los registros dado que no se contó con la información del tipo de arreglo eléctrico (factor geométrico) ni de las propiedades físicas del fluido de perforación. Asimismo, también se aclara que la respuesta eléctrica en los pozos fue tomada con diferente tipo de herramienta (*Laterolog* y *Array Induction*); para el caso del registro de radiactividad, no se contó con la velocidad de adquisición, tipo de herramienta y diámetro de agujero. Como parte del procesamiento, se elaboraron gráficas cruzadas de resistividad - radiactividad, considerando que la respuesta radiactiva varía con el tipo de material volcánico (rocas básicas, baja radiactividad y rocas ácidas, alta radiactividad); asimismo, la respuesta eléctrica consideró altos valores de resistividad para lavas y bajos valores de resistividad para depósitos piroclásticos.

El resultado de las gráficas cruzadas de resistividad - radiactividad indica el tipo de litología presente en el pozo de acuerdo con la dispersión de los datos adquiridos en la medición; en el pozo Mixhuca 1 predominan las tobas basálticas y los basaltos, mientras que en los pozos Mirador 2 y Santa Catarina 3-A predominan las tobas basálticas. La técnica es de utilidad para regenerar las condiciones litológicas de un pozo del que no se tenga información directa (corte litológico) para apoyar a conformar el modelo estático del subsuelo con mayor detalle.

La aplicación de técnicas como Registros Geofísicos de Pozo es de gran utilidad para proveer más elementos técnicos en la toma de decisiones.

Abstract

A way of taking advantage of the information obtained from the Resistivity and Gamma-Ray curves of a Geophysical Well Log applied to hydrogeology is proposed. Although there is a wide knowledge of these curves in the oil area, they are just beginning to be applied quantitatively in the case of water. In the case of this work, we are dealing with volcanic rocks; however, the information is useful to help shape the frame of reference that is present in the subsurface from the measurement of physical properties in a well.

For the development of the work, information from three deep wells drilled recently in the aquifer Metropolitan Zone of Mexico City (ZMCDMX) and whose depth exceeded 1500 m was taken into consideration, a situation for which well logs that are used in the oil area for the evaluation of the subsurface were used, making the necessary adjustments given the calibration to which the different tools are subject.

The objective of the work was to characterize the subsurface of the area where the study wells are located, called: Mixhuca 1, Mirador 2 and Santa Catarina 3-A, to know how much they correlate based on the electrical-radioactive response, taking as support the lithological information derived from drilling. It should be noted that the application of the Geophysical Well Logs is not for exploration purposes, but to make final decisions regarding productivity.

As part of the work and as an innovation, mathematical digital filters were applied to the raw data to understand the regional behavior of the existing lithological units, eliminating noise caused by hole diameter and statistical effects, among others. It is clarified that no correction was applied to the logs since the information on the type of electrode array (geometric factor) and the physical properties of the drilling fluid were not available. It is also clarified that the electrical response in the boreholes was taken with different types of tools (Laterolog and Array Induction); for the radioactivity log, the acquisition rate, tool type, and hole diameter were not available. As part of the processing, resistivity - radioactivity crossplots were elaborated, considering that the radioactive response varies with the type of volcanic material (basic rocks, low radioactivity, and acid rocks, high radioactivity); also, the electrical response considered high resistivity values for lavas and low resistivity values for pyroclastic deposits.

The result of the resistivity - radioactivity crossplots indicates the type of lithology present in the borehole according to the dispersion of the data acquired in the measurement; in the Mixhuca 1 borehole basaltic tuffs and basalts predominate, while in the Mirador 2 and Santa Catarina 3-A boreholes basaltic tuffs predominate. The technique is useful to regenerate the lithological conditions of a well for which there is no direct information (lithological cut) to support the formation of the static model of the subsurface in greater detail.

The application of techniques such as Geophysical Well Logs is very useful to provide more technical elements for decision making.

Introducción

La Ciudad de México demanda grandes volúmenes de agua potable para poder sustentar las actividades socioeconómicas de cada uno de sus habitantes. Las necesidades de abastecimiento se incrementan día a día; las fuentes superficiales y del subsuelo están comprometidas y en riesgo, por lo que es necesario buscar nuevas alternativas o bien, explorar a mayor profundidad. A la fecha, se abastece mediante el uso de fuentes internas, como pozos y manantiales, así como externas a través de la importación de agua del Estado de México.

Desde el punto de vista hidrogeológico, el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México es uno de los 107 del país que presenta sobreexplotación y es importante debido a que sustenta la vida de más de 9 millones de personas tan sólo en la Ciudad de México (INEGI, 2020). El déficit de agua subterránea es de -507.23 millones de metros cúbicos con base en la información oficial de Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea publicada en el Diario Oficial de la Federación en 2020. Se extrae un volumen de 1020.03 millones de metros cúbicos anuales y el acuífero ocupa el 17% de la superficie total de la Cuenca de México.

En la Cuenca de México (CM) se han realizado un sinnúmero de estudios y evaluaciones; para el caso de la hidrogeología, se limita a la evaluación del acuífero superior, donde actualmente se explota el agua subterránea a través de 976 pozos, cuyas profundidades son de hasta 400 metros. Poco se sabe del acuífero medio y profundo. Para las condiciones profundas, existe información gravimétrica y de sísmica de reflexión. La información directa es poca, se limita a 10 pozos profundos con profundidades superiores a los 1500 m, lo cual no permite, en estos momentos, proponer un modelo geológico estático y de flujo veraz.

Ante esto, el Gobierno de la Ciudad de México, a través del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), ha emprendido acciones de evaluación de las condiciones hidrogeológicas del acuífero profundo, con el apoyo de técnicas geofísicas tales como sísmica de reflexión y registros geofísicos de pozos.

La Ciudad de México se ubica en la parte más alta de la cuenca hidrológica del río Pánuco en la subcuenca Valle de México. Es una zona plana, rodeada por sierras y volcanes, se ve limitada en extensión y por la presencia de lagos. En la zona plana existe un paquete de hasta 200 m de espesor de material lacustre. Aunado a esto, la mancha urbana, además de cubrir ya esta parte, se ha extendido a las zonas de cambio de pendiente y de sierra, limitando en gran medida la capacidad de infiltración y recarga al acuífero.

Una situación que se presenta durante las perforaciones que se han realizado es la pérdida de circulación del lodo de perforación, impidiendo obtener la información directa del material que es atravesado.

En este trabajo, se utilizará la información de los registros geofísicos de pozos profundos, proporcionados por SACMEX, en específico la información de la respuesta radiactiva natural y de resistividad con el propósito de identificar, de manera indirecta, la litología y plantear una metodología para correlacionar la información radiactiva-resistiva-geológica de los pozos profundos perforados recientemente, a través de gráficas cruzadas, para proponer la correlación entre ellos y dar elementos para mejorar la interpretación geológica estructural.

Para llevar a cabo esta metodología, se hizo uso de información de tres pozos profundos con profundidades superiores a los 1500 m; se realizó un análisis de geología, de cortes litológicos de los pozos y de sus respectivos registros de pozos. En cuanto a estos últimos, se aplicaron filtros para reducir el ruido que adquirieron durante su obtención. No se realizaron correcciones a los datos para mejorar la señal, ya que no se contó con la información del encabezado de los registros de pozos para conocer las propiedades físicas del tipo de lodo y arreglo geométrico del equipo de resistividad, entre otros, situación que deberá considerarse si esta técnica se concibe de utilidad en la interpretación de registros geofísicos en ambiente volcánico. Sobre esto último, hay que mencionar que, si bien se han realizado, por lo menos en México, miles de registros, su interpretación es de carácter cualitativo y con este trabajo se plantea por lo menos una metodología para que sea cuantitativa.

Cabe recalcar que, al contar con información correlacionada entre pozos, se tendrán más elementos para calibrar las interpretaciones que se han hecho del subsuelo de la CM, reducir incertidumbres y tener más información para la toma de decisiones.

Capítulo 1. Marco geológico - hidrogeológico del acuífero del Valle de México

La CM, de acuerdo con Tapia et.al. (2002), fue formada debido a procesos volcánicos y tectónicos que fueron desarrollados a partir del Eoceno. Estos procesos produjeron espesores hasta de dos kilómetros de lava, toba y brecha. Se ubica dentro de la Región Hidrológica XIII (Figura 1), es alargada en dirección NE-SW y está delimitada por las sierras de Pachuca, Río Frío, Nevada, Chichinautzin, las Cruces y Volcán Ajusco, (Límites de las Sierras), éste último forma parte de la Sierra Chichinautzin (Figura 2). En general, presenta una geología muy compleja ya que se sitúa en el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT), (Tapia et.al., 2002).

La complejidad se identifica por la gran actividad magmática y tectónica que generó rocas volcánicas con diferente composición y fracturamiento. En cuanto a la distribución de éstas, también es complicada ya que los eventos magmáticos (lavas) se presentan distribuidos en conos cineríticos, domos volcánicos y derrames de lava; en tanto, los eventos eruptivos (rocas piroclásticas) se distribuyen en áreas mayores, planicies con variación de tamaño de grano (Figura 3). Esta situación hace variar cualquier medición geofísica que se realice; sin embargo, con base en el análisis de los registros geofísicos de rayos gamma y de resistividad, se pretende correlacionar la respuesta de pozos relativamente cercanos con la geología que se presenta en el subsuelo y proponer la aplicación de la técnica que se plantea en este trabajo como una herramienta adicional para conocer mejor su geometría.



Figura 1. Región hidrológico-administrativa XIII (Modificada de CONAGUA, 2010).

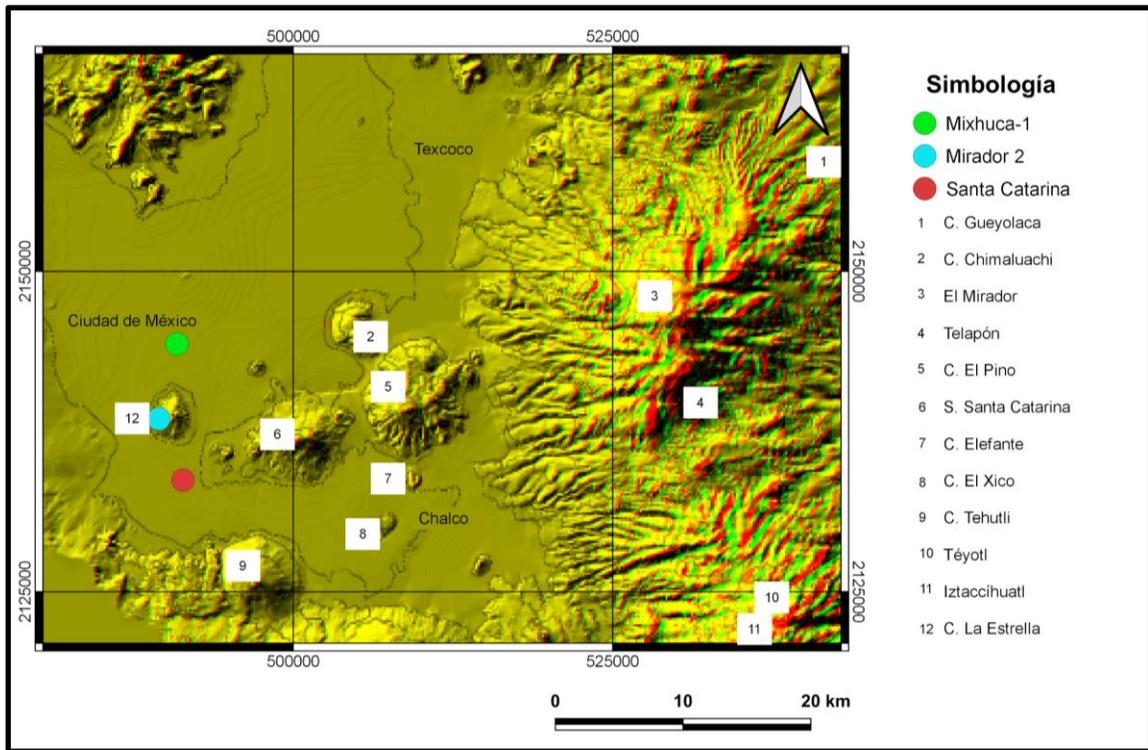


Figura 2. Mapa Estereoscópico de una porción de la CM (Tomado y modificado de Tapia et al., 2002).

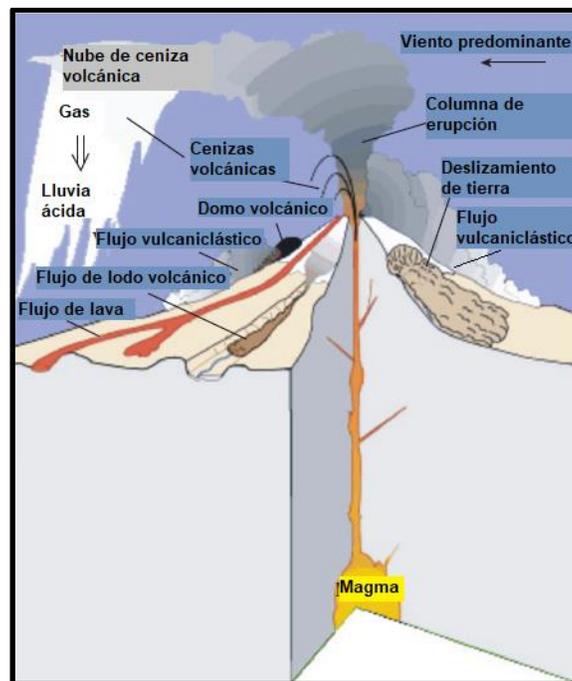


Figura 3. Proceso de vulcanismo (Tomada y modificada de Zou, 2013).

En cuanto a la geomorfología, la zona donde se ubican los pozos corresponde a planicies aluviales, compuesta de material acumulativo aluvial, secuencias piroclásticas, tobas eólicas y brechas de pómez, presentando en su superficie caliche. Los depósitos de piedemonte están compuestos de lavas, tobas, cenizas y depósitos epiclásticos y de flujos piroclásticos; algunos de ellos con forma de abanico con composiciones basálticas y basalto andesíticas. Otra parte del área corresponde a laderas de montañas y a planicies lacustres. Las laderas están compuestas de domos, conos volcánicos y derrames de lavas, de rocas básicas e intermedias, lavas andesíticas, dacitas, riolacitas y tobas con material piroclásticos.

En la Figura 4, se muestran las unidades morfogénicas de la zona a evaluar. Con base en esta distribución, es de esperarse que el subsuelo presente también variaciones en la morfología, unidades litológicas y condiciones estructurales que se depositaron en la zona del valle, lo cual puede variar las propiedades físicas que se propone analizar en este trabajo. En la Tabla 1, se detallan características de cada una de las unidades morfogénicas mostradas en la Figura 4.

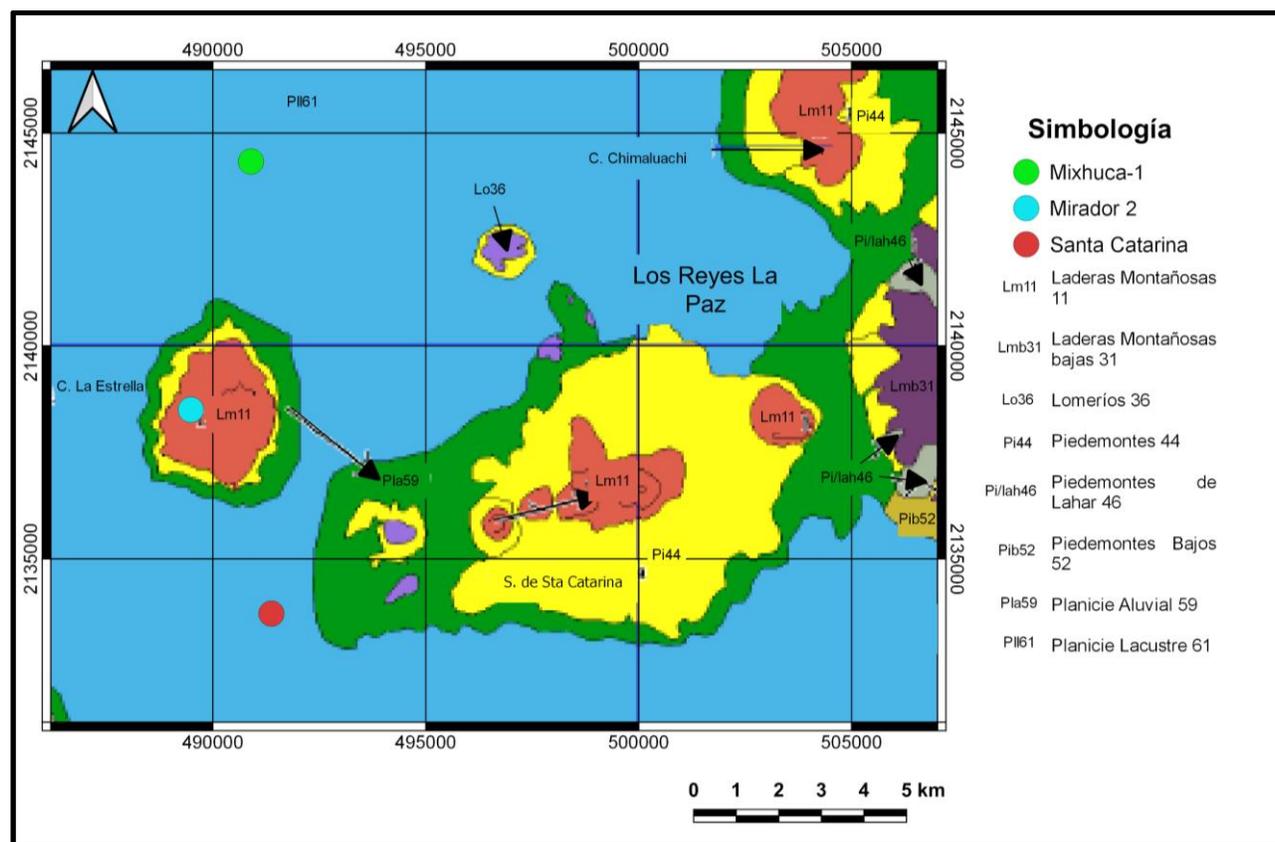


Figura 4. Mapa de unidades morfogénicas de una porción de la CM (Tomado y modificado de Tapia et.al., 2002).

Tabla 1. Unidades morfogénicas de una porción de la Cuenca de México (Tomada y modificada de Tapia et.al., 2002).

Simbología	Origen del relieve	Tipo de relieve	Edad	Litología	Altitud media [m]
Lm11	Endógeno volcánico (muy tectonizado)	Laderas montañosas	Pleistoceno-Holoceno	Andesita, andesita basáltica y flujos piroclásticos	2340 - 3460
Lmb31	Endógeno volcánico modelado (denudatorio, muy tectonizado)	Laderas montañosas bajas	Pleistoceno y Holoceno	Andesita basáltica, basalto, dacita y flujos piroclásticos	2380 - 2500
Lo36	Endógeno volcánico y volcánico modelado (denudatorio, tectonizado)	Lomeríos	Pleistoceno y Holoceno	Rocas básicas e intermedias, tobas, cenizas y depósitos epiclásticos y flujos piroclásticos	2420 - 2580
Pi44	Exógeno acumulativo (denudatorio, tectonizado)	Piedemontes	Pleistoceno y Holoceno	Compuestos de lavas, tobas, cenizas y depósitos epiclásticos; basalto y basalto andesítica; flujos piroclásticos, lahar, tobas, cenizas y pómez.	2500 - 2740
Pi/lah46	Exógeno acumulativo (denudatorio, muy tectonizado)	Piedemontes de Lahar	Pleistoceno y Holoceno	Pequeños abanicos de lavas, cenizas, depósitos epiclásticos y laháricos, vulcanitas básicas e intermedias y flujos piroclásticos	2260 - 2380
Pib52	Exógeno acumulativo (denudatorio)	Piedemontes bajos	Pleistoceno y Holoceno	Coladas, cenizas, depósitos epiclásticos, vulcanitas básicas e intermedias con flujos piroclásticos	2260 - 2380
Pla59	Exógeno acumulativo (aluvial)	Planicie aluvial	Pleistoceno y Holoceno	Depósitos clásticos; en la parte inferior, de material aluvial y lahárico en forma de grava cubierta con tobas eólicas y aluviales, brechas de pómez que cambian a arenas; arenas limosas y arcillas volcánicas	2260 - 2300
PII61	Exógeno acumulativo (lacustre)	Planicie lacustre	Pleistoceno y Holoceno	Concentración de sedimentos clásticos y productos piroclásticos depositados en ambiente lacustre	2260 - 2300

******En relación al trabajo que se presenta es importante tener en mente cómo se distribuyen las UM, ya que deben presentar un comportamiento similar en el subsuelo y sobre todo, por las propiedades físicas que se van a analizar (radiactividad natural y resistividad) conocer su comportamiento y su respuesta.

1.1 Ubicación de la zona de estudio

Los pozos por evaluar se ubican en las alcaldías de Iztacalco (Mixhuca-1), Iztapalapa (Mirador 2) y Tláhuac (Santa Catarina 3-A). En la Figura 5, se muestra la ubicación en imagen de satélite y en la Tabla 2, sus coordenadas.

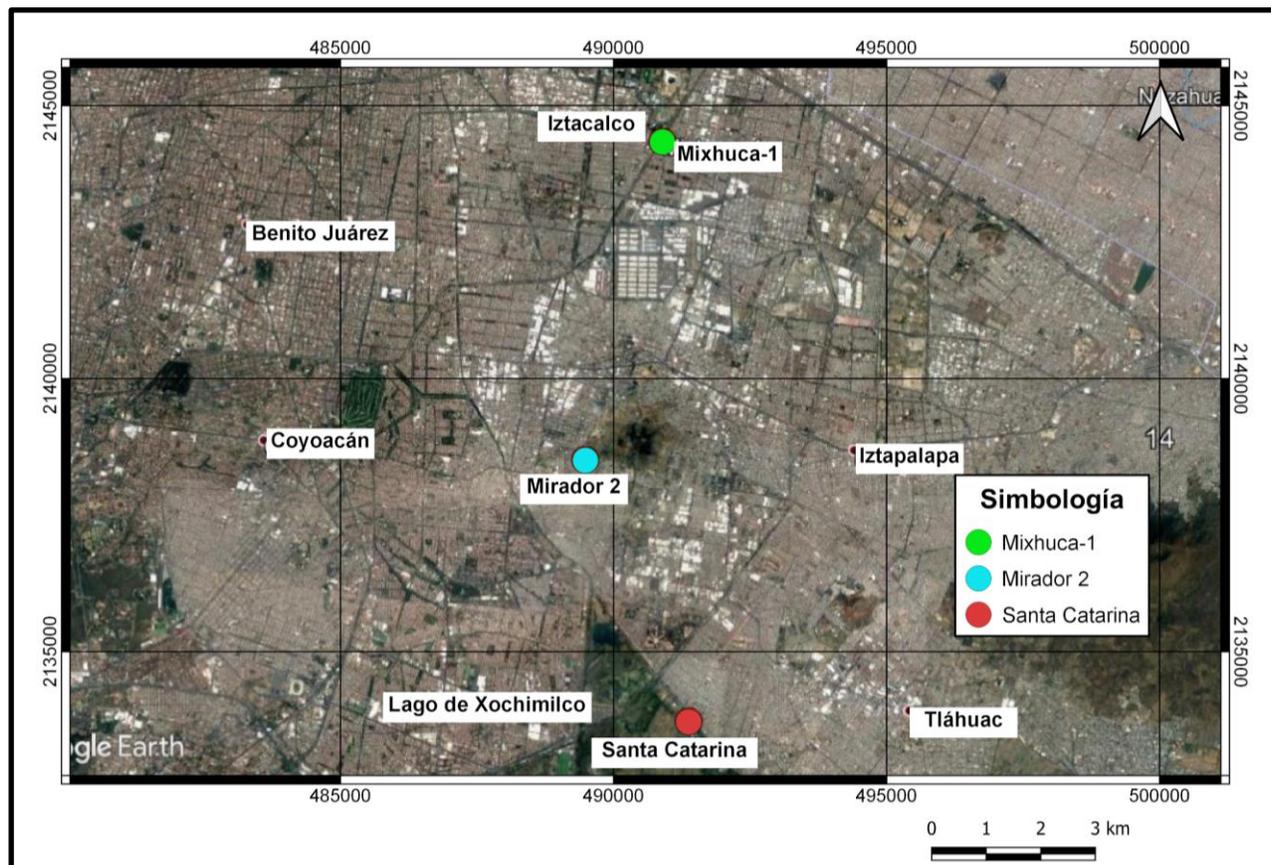


Figura 5. Mapa de ubicación de los pozos de estudio (Tomada y modificada de Google Earth).

Tabla 2. Coordenadas de la ubicación de los pozos (WS84-14Q).

Pozo	UTM X	UTM Y	Latitud	Longitud
Mixhuca-1	490896.09 [m] E	2144334.36 [m] N	19° 23' 35.41"	99° 05' 12.14"
Mirador 2	489485.5 [m] E	2138504.9 [m] N	19° 20' 25.74"	99° 06' 0.38"
Santa Catarina 3-A	491376 [m] E	2133715.1 [m] N	19° 17' 49.9379"	99° 04' 55.5052"

1.2 Geología, estratigrafía e historia geológica de la Cuenca de México

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (2002), el área que abarca el acuífero donde se encuentran los pozos de estudio comprende distintos tipos de litologías pertenecientes a la Era Cenozoica, tanto del periodo Paleógeno y Neógeno como Cuaternario. Los tipos de roca presentes en el acuífero son los siguientes: aluvión del Holoceno; pertenecientes al Neógeno, andesita-dacita y toba andesítica; andesita-basalto del Holoceno y del Pleistoceno, además de basalto-andesita (Figura 6). Hay que mencionar que debajo de estos depósitos se encuentran también, en forma aislada, algunas sucesiones de roca sedimentaria del Cretácico.

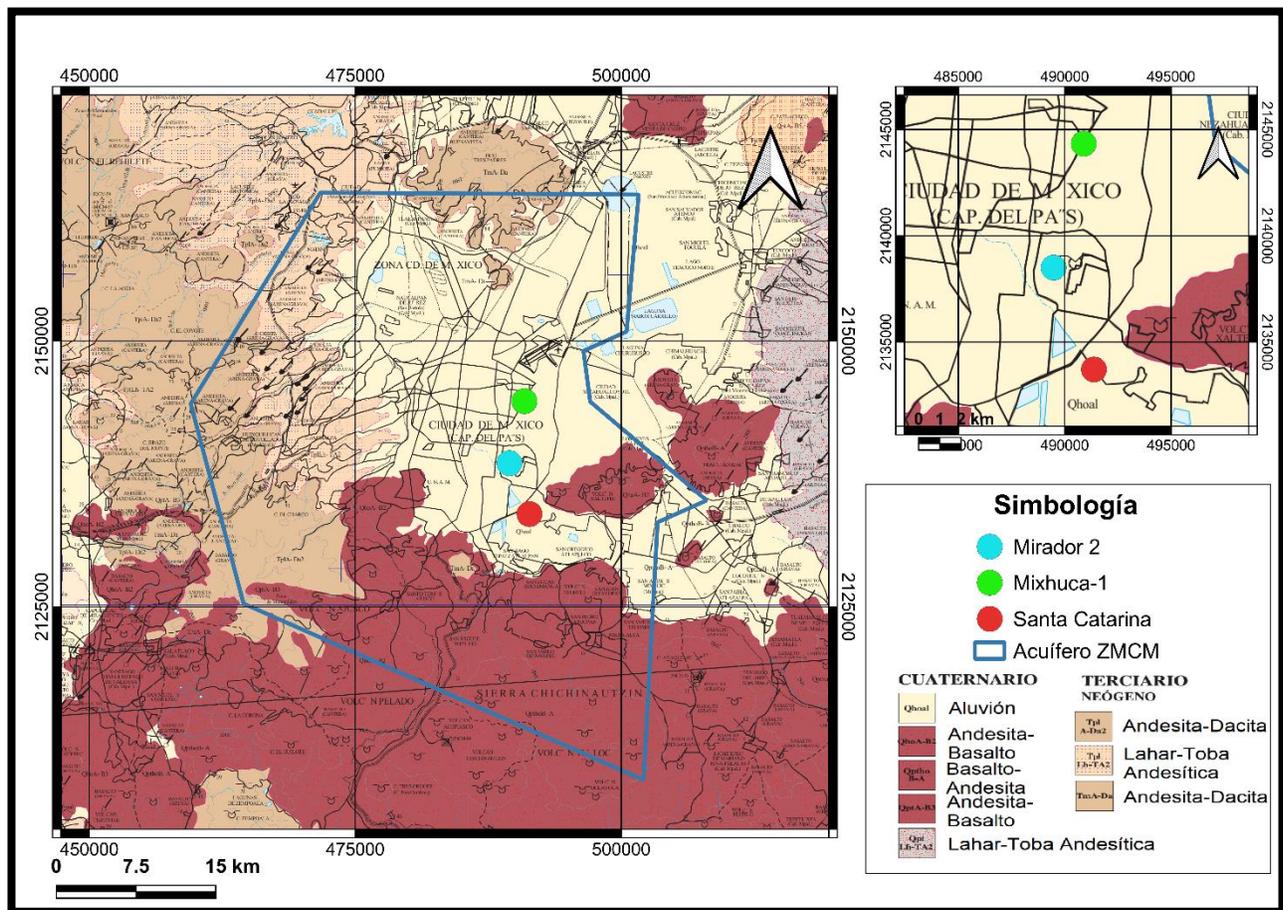


Figura 6. Geología de la zona de estudio, abarcando la zona correspondiente al acuífero ZMCM y los pozos estudiados (Tomada y modificada de SGM, 2002).

A lo largo de su evolución, la CM formó parte de un mar somero, después se convirtió en una planicie costera, luego en una zona volcánica asociada a una zona de subducción, en forma paralela a la actividad

volcánica, se han desarrollado procesos de subsidencia y, finalmente, en algunos sectores se registra la existencia de una cuenca lacustre. Los principales acontecimientos que dieron origen y transformación a la CM sucedieron en los últimos 25 millones de años aproximadamente, eventos que ocurrieron en diferentes periodos geológicos comenzando en el Mioceno, Plioceno y Pleistoceno.

Arce et. al. (2019) hace una descripción de las unidades litológicas presentes en el subsuelo de la CM; el valor que tiene el trabajo, entre otros, es la datación de las rocas. Para los fines de este trabajo, hace referencia a los pozos Mixhuca y San Lorenzo Tezonco donde indica que las ignimbritas tienen una edad del orden de los 3 Ma. Cabe mencionar que en este trabajo no se consideró el registro geofísico del pozo San Lorenzo Tezonco porque el equipo de adquisición no cumplió los estándares para un trabajo de la calidad de información que se requería. El análisis que presenta identifica la presencia de varias secuencias volcánicas provenientes de varias fuentes (piroclastos, derrames, flujos de lava, pumicitas de composición química), las cuales afectan la respuesta de los registros geofísicos de pozo. Hace también referencia a las características tectónicas de la cuenca, donde menciona una serie de fallas geológicas. En específico, para el área evaluada, la falla Mixhuca con una dirección NW-SE y el graben de Santa Catarina.

En cuanto al trabajo relacionado por Arce t. al. (2019) al análisis del registro geofísico del pozo San Lorenzo Tezonco, el pozo se ubica en la zona correspondiente al graben de Santa Catarina, pero la profundidad de perforación no llegó a la caliza. Por lo que respecta al análisis de los eventos volcánicos, hay presencia de una mayor cantidad de flujos de lava que de depósitos piroclásticos. Se indica, en un intervalo, la presencia de materia que es común de la sierra de Las Cruces. Los flujos de lava son de composición basalto-andesítica y riolita con andesita.

El relieve original de la cuenca se relaciona con una intensa actividad volcánica del Neógeno. Las estructuras que lo caracterizan evolucionaron sobre sedimentos plegados del Mesozoico que forman parte del sector sur de la Sierra Madre Oriental. Con la evolución de los eventos volcánicos, se dieron las condiciones para que se formaran cuencas endorreicas, rellenas después con materiales volcanoclásticos estratificados de características litológicas de rocas volcánicas y, finalmente, se depositaron en rocas sedimentarias asociadas a ambiente lacustre. El basamento volcánico es perteneciente al Paleógeno y Neógeno, asociado a hundimientos y fosas tectónicas debido a fracturas y fallas en la corteza, la parte inferior de la fosa se caracteriza por derrames de lava, de origen andesítico basáltico provenientes del Plioceno. A finales de esta época, se produjeron fracturas por las que se tuvieron efusiones de basalto. La cuenca está rellena principalmente de materiales volcánicos, además de depósitos lacustres superficialmente y derrames de lava, materiales epiclásticos y depósitos piroclásticos en el basamento (González et.al., 2015). Bajo el contexto anterior, es de esperarse que estas rocas presenten fracturamiento y, si existe una fuente de alimentación de agua, pueden ser potencialmente favorables para acumular agua.

La zona urbana de la Ciudad de México tiene un área aproximada de 1500 km², área que representa aproximadamente el 16% de la superficie total de la cuenca y que alberga alrededor de 21.4 millones de personas (González et.al., 2015). Esto representa problemas asociados con factores de riesgo geológicos, como la subsidencia que excede los 350 mm por año en promedio en zonas críticas. A ésta se le relacionan

procesos de fracturamiento y fallamiento, por eso es importante conocer la geología de la cuenca (Figura 7). Se demuestra que las rocas volcánicas y el material granular están relacionados hidráulicamente por la subsidencia que se presenta en la Ciudad de México.

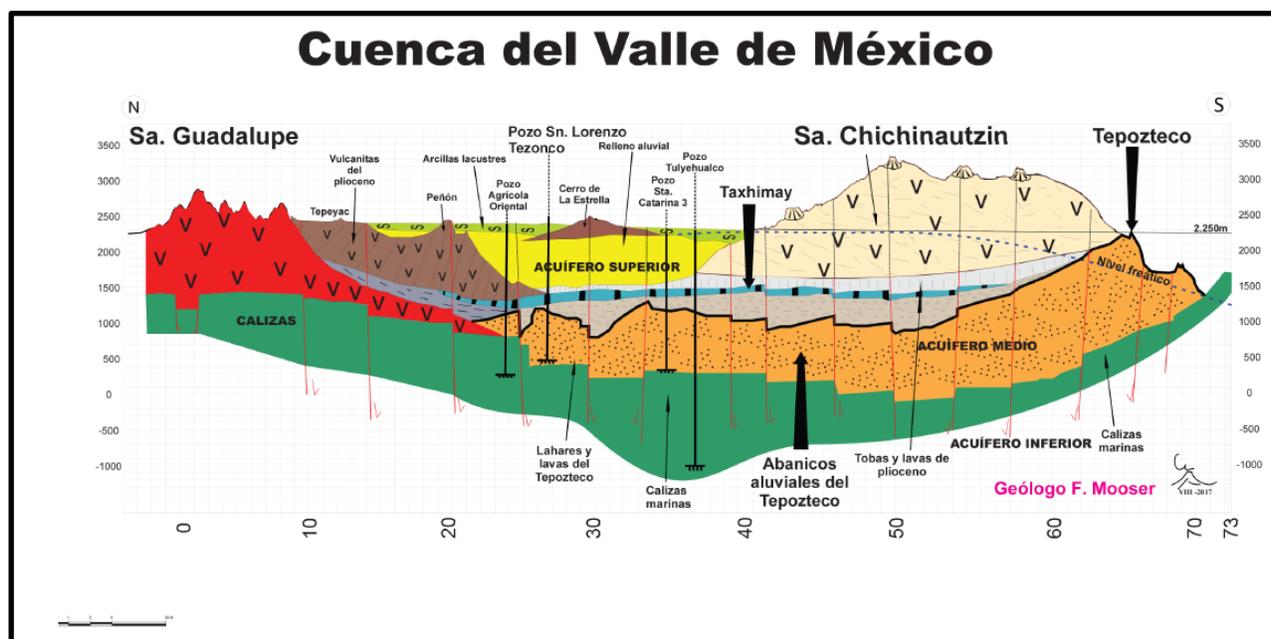


Figura 7. Sección geológica de la Cuenca de México (Tomada de Mooser, 2018).

Algunos de los conjuntos volcánicos complejos de la cuenca son: el Popocatepetl, el Iztaccíhuatl, el Ajusco, el Xitle, Sierra de Guadalupe, Cerro de la Estrella y Sierra de Santa Catarina, entre otros. También cuenta con sistemas de fracturas y fallas regionales (Figura 8).

Los sistemas de fallas asociados a los sistemas montañosos de origen volcánico que delimitan la CM tienen orientaciones preferenciales E-W y NE-SW. Al sur de la CM, se encuentran los sistemas de fallas normales Xochimilco y Xicomulco con orientación E-W; su bloque caído se encuentra al norte. De forma casi paralela al sur del sistema Xochimilco, se ubica el sistema de fallas normales La Pera; su bloque de techo se ubica hacia Cuernavaca, Morelos y éste define el pilar tectónico de Chichinautzin. Estructuralmente, el norte de la cuenca está definido por un sistema de fallas con orientación NE-SW: Tizayuca, Texcoco y Apan-Tláloc. En el interior de la cuenca, se encuentra una falla normal con dirección NW-SE que cruza la Ciudad de México, conocida como Falla de Mixhuca, además de un sistema de fallas con orientación NE-SW denominado Zona de Cizallamiento Tenochtitlan, donde se encuentra el graben de Santa Catarina (Figura 9) (González et.al., 2015).

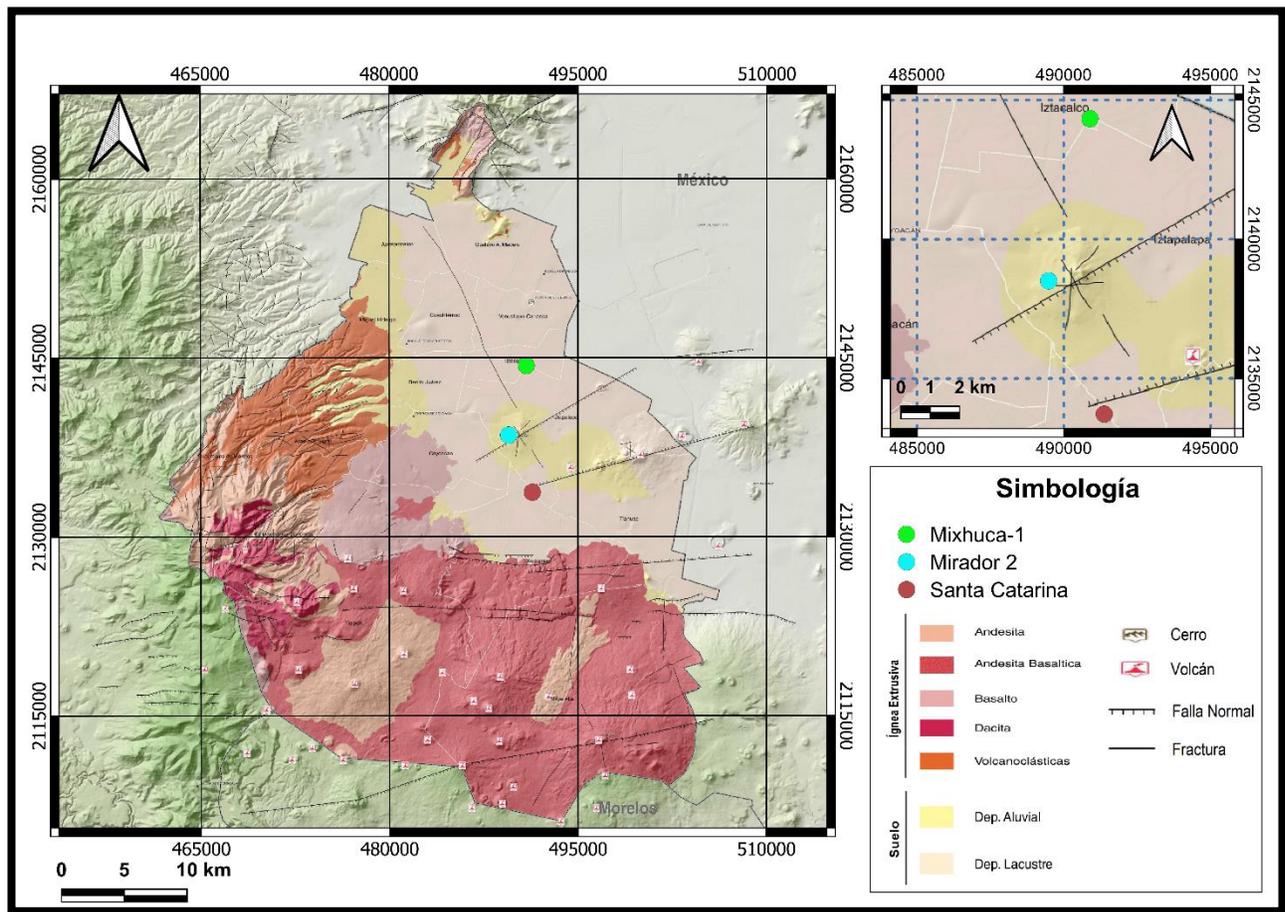


Figura 8. Mapa geológico-estructural del Valle de México donde se muestran los distintos tipos de roca y las estructuras presentes en la zona (Tomada y modificada de Protección Civil CDMX, 2017).

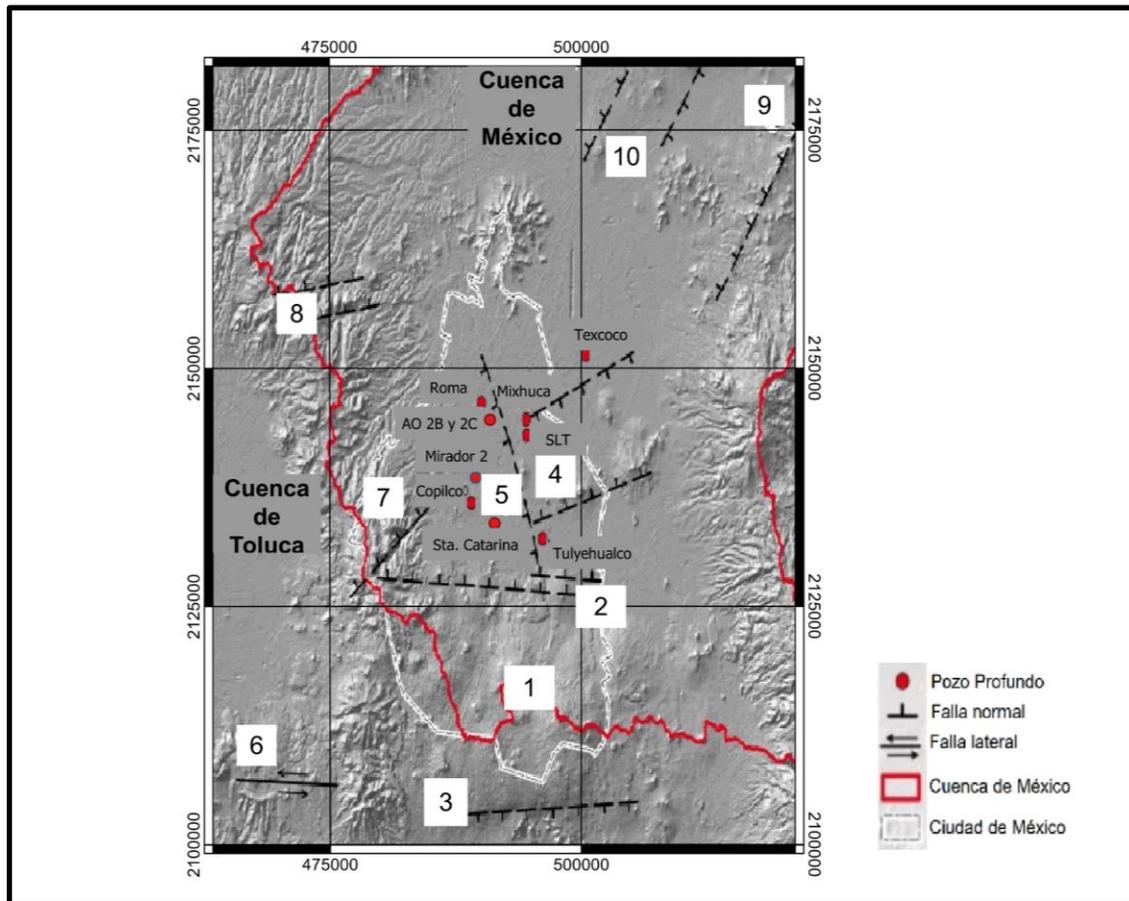


Figura 9. Modelo de elevación de la Cuenca de México donde se muestra la ubicación de seis pozos profundos perforados en la CM, además de estructuras geológicas tales como: (1) Pilar (horst) de Chichinautzin, (2) Sistema de Fallas de Xochimilco y Xicomulco, (3) Sistema de Fallas de la Pera, (4) Graben de Santa Catarina, (5) Falla Mixhuca, (6) Sistema de Fallas Tenango, (7) Falla Contreras, (8) Sistema de Fallas de Ixtlahuaca y Otomí, (9) Falla Texcoco y (10) Sistema de Fallas Tizayuca (Tomada y modificada de G3n3lez et.al., 2015).

La CM es de tipo endorreico, aunque es considerada abierta artificialmente por el tajo de Nochistongo y obras civiles de desagüe de la Ciudad de México (Figura 10) (Mooser, 2018). El basamento de la cuenca se constituye por secuencias sedimentarias del Mesozoico que se encuentran a profundidades de entre 1600 y 3200 metros. Se considera que el relleno más antiguo se compone por depósitos continentales del Cenozoico de espesor menor a los 100 metros, que sobreyace a secuencias marinas cretácicas. El basamento pertenece a la Formación Morelos (Cretácico Inferior) y se constituye por depósitos de conglomerados calcáreos y anhidritas similares al Grupo Balsas. El relleno está formado por depósitos lacustres en la parte superior y por productos volcánicos, como derrames de lavas (desde basaltos hasta dacitas, dominando las andesitas), depósitos piroclásticos de tobas e ignimbritas y materiales volcanoclásticos (González et.al., 2015).

separados por un acuitardo arcilloso con espesor de aproximadamente 50 metros. El acuífero alcanza profundidades mayores a 800 metros y en él existen pozos con profundidades de entre 100 y 400 metros. Pertenece a la región Hidrológica 26 Alto Pánuco y se clasifica como semiconfinado debido a que presenta irregularmente material arcilloso que actúa como confinante o semiconfinante. Su contenedor impermeable está constituido por rocas volcánicas y calizas, además de que se tiene un sistema acuífero complejo debido al paquete sedimentario. Este sistema está formado por tres grandes cuerpos. En la parte superior, un paquete arcilloso de alta porosidad, baja permeabilidad y gran heterogeneidad en su constitución, formando un acuitardo de espesor variable que actúa como semiconfinante en el centro de la cuenca. Debajo, el acuífero que está siendo explotado, formado por material granular más grueso que el del acuitardo: piroclastos y conglomerados de origen volcánico, con espesor variable y mayor a 200 m, además de propiedades hidráulicas variables. Le subyacen rocas volcánicas fracturadas, cuya base llega a estar a 2000 m en el centro, disminuyendo hacia las márgenes de la cuenca. Estas tres unidades están conectadas hidráulicamente, en especial la de rocas volcánicas y la de material granular. Gracias a la subsidencia que afecta a la CDMX, se ha demostrado la interrelación del paquete arcilloso y el material granular. El acuífero se recarga por infiltraciones de la precipitación y las sierras de los alrededores actúan como áreas de recarga importantes. La extracción de agua subterránea de la cuenca representa cerca del 70% del abastecimiento.

2. **Cuenca.** Mooser (2018) describe que se encuentra localizada en el centro de la Faja Volcánica Transmexicana y constituida litológicamente por sedimentos lacustres. Se definen capas delgadas de sedimentos volcánicos, intercaladas en el conjunto lacustre. Entre el conjunto de eventos geológicos volcánicos, destacan aquellos que forman lagos. Cuando fluyen lavas y éstas rellenan los fondos de valles, las aguas detrás de dichas lavas forman a menudo lagos en los que se depositan sedimentos de arcillas. Hubo tres eventos importantes de formación de lagos en la CM de acuerdo con Mooser (2018):
 - a. Después de la erupción de una gran cantidad de lavas y lahares del Tepozteco. Sus masas obstruyeron las salidas aluviales de la cuenca al sur a fines del Mioceno, formando un grueso estrato de arcillas de aproximadamente 100 m de espesor en el subsuelo de la cuenca, a unos 1000 m debajo de la superficie.
 - b. En el norte de la cuenca, cerca de Tula, otras erupciones volcánicas obstruyeron importantes cauces fluviales durante el Terciario superior, creando así los potentes depósitos de arcillas lacustres Taxhimay de 50 a 100 m de espesor.
 - c. Finalmente, en el Cuaternario Superior, al crecer la Sierra de Chichinautzin se cerró la Cuenca de México por segunda vez, formándose las arcillas blandas del Valle de México, desde Xochimilco hasta Huehuetoca.

González et.al. (2015) describe a la CM como de tipo endorreico y se encuentra ubicada en la porción centro-oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), con superficie aproximada de 9540 km². Es una depresión profunda que se originó debido a la intensa actividad volcánica y tectónica de la región. Los materiales de relleno son predominantemente volcánicos: depósitos

lacustres en la parte superior; derrames de lava, materiales epiclásticos y depósitos piroclásticos en la parte inferior.

Contiene una extensa planicie lacustre delimitada por las siguientes sierras de origen volcánico: Sierra Chichinautzin, Sierra de las Cruces (sierra más antigua de la CM), Sierra Nevada y Sierra de Pachuca y Tezontlalpan, además alberga conjuntos volcánicos como las sierras de Guadalupe y de Santa Catarina.

De acuerdo con CONAGUA (2020), la CM de tipo endorreico y con sedimentación lacustre del Pleistoceno-Holoceno debido al intenso volcanismo que originó la Sierra Chichinautzin, presenta intenso fracturamiento debido a los grandes esfuerzos producidos en la corteza. Se cerró en el Cuaternario Superior y las aguas pluviales formaron un conjunto de lagos someros. El fondo de la CM es una superficie lacustre que se mantiene seca artificialmente. Su parteaguas se extiende por la zona montañosa circundante. La Cuenca de México forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana, con dirección E-W y zona donde predominan derrames basálticos, volcanes y lagos. La Zona Metropolitana de la CDMX está delimitada por la Sierra de Guadalupe, Sierra de las Cruces, Sierra Chichinautzin, Volcán del Ajusco y Sierra Nevada. Existen también volcanes aislados, como aquellos que conforman la Sierra de Santa Catarina, el Peñón de los Baños y el Cerro de la Estrella. El valle de México se quedó sin drenaje al exterior por la interrupción de sus corrientes superficiales debido a la salida de productos volcánicos a través de conos que dieron origen a la Sierra de Chichinautzin. Esto causó que se acumulara agua en el centro y nacieran los lagos de Zumpango, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac. La CM tiene un área de 9600 km² y está rodeada de montañas, limitada por las Sierras Nevada, Río Frío, Sierra de las Cruces, Sierra Chichinautzin, Sierra de Guadalupe, Cerro de Chiconautla y Sierra Patlachique.

- 3. Unidades.** De acuerdo con Mooser (2018), el sustrato de rocas marinas cretácicas se encuentra a 1500 metros de profundidad, bajo la superficie lacustre, donde se apoya la gran unidad geológica Tepoztlán, de cientos de metros de espesor, origen volcánico y coluvial, inferida a 1000 m de profundidad en la alcaldía Iztapalapa, CDMX, hasta Tepoztlán, Morelos, donde aflora. En secuencia hacia la superficie, se presentan rocas volcánicas del Plioceno; en la cima se tienen sedimentos lacustres del Cuaternario. En la base, a profundidades de entre los 1500 y 3000 m, se encuentran depósitos marinos del Mesozoico superior. Un poco arriba del nivel del mar hasta 1000 m aproximadamente debajo de él, yacen calizas y lutitas del Cretácico Superior intensamente plegadas. Sobre el basamento marino complejo, se acumularon desde principios del Terciario hasta la actualidad, productos de un vulcanismo que consiste en lavas, tobas, cenizas, brechas, lahares, depósitos fluviales y aluviales; paleosuelos y arcillas lacustres con un espesor total de 1500 a 3000 metros. Las erupciones volcánicas irrumpieron a través de un gran número de fracturas y fallas que rompieron la corteza desde profundidades de 5 hasta 15 km, donde descansan las cámaras magmáticas.

De acuerdo con González et.al. (2015), la base de la CM se define como una superficie irregular, constituida por secuencias sedimentarias del Mesozoico a profundidades de entre 1600 y 3200 m.

Se sugiere que el relleno más antiguo de la CM está constituido por depósitos continentales de cuencas del Cenozoico, con espesor máximo de 100 m, que sobreyacen a las secuencias marinas cretácicas. El relleno de la cuenca está conformado por cuatro unidades, descritos de la base a la cima:

- a) *Basamento*, constituido por calizas del Cretácico.
- b) *Unidad Volcánica Inferior (UVI)*, constituida por productos volcánicos efusivos y piroclásticos. Esta unidad se correlaciona con la provincia ignimbrítica de la Sierra Madre Occidental.
- c) *Unidad Volcánica Superior (UVS)*, constituida principalmente por rocas piroclásticas, además de rocas efusivas, en menor proporción. Esta unidad corresponde a las rocas de la FVTM.
- d) *Unidad de depósitos lacustres y fluviales* representados por arcillas, limos y arenas.

CONAGUA (2020) describe que el subsuelo está constituido por intercalaciones de productos volcánicos como lavas, tobas y cenizas, que incluyen materiales granulares transportados por ríos y arroyos. Estos materiales están cubiertos por arcillas y arenas finas, con espesores variables y producto del sedimento de lagos antiguos.

- 4. Geología estructural.** Mooser (2018) describe que, gracias a estudios tectónicos, se ha comprobado la existencia de al menos cinco sistemas de fallas en la CM, con direcciones típicas. Existen también fallas circulares producidas por colapsos volcánicos a profundidad, como la Caldera del Iztaccíhuatl.

González et.al. (2015) mencionan que existen sistemas de fallas asociados a los sistemas montañosos de origen volcánico, con orientaciones E-W y NE-SW. Al sur de la CM, se tienen los sistemas de fallas normales Xochimilco y Xicomulco, con orientación E-W. Al sur del sistema Xochimilco, se ubica el sistema de fallas normales La Pera. La Sierra de las Cruces está constituida por tres bloques delimitados por fallas con dirección E-W y está definida por un lineamiento N-S. Al norte de la CM, se tiene un sistema de fallas con orientación NE-SW, como las fallas Tizayuca, Texcoco y Apan-Tlálloc. Dentro de la CM, se tiene una falla normal con dirección NW-SE, denominada Falla de Mixhuca, que atraviesa la CDMX; además, existe un sistema de fallas y lineamientos regionales con orientación NE-SW, denominado zona de cizallamiento Tenochtitlan, del que forma parte el graben de Santa Catarina.

De acuerdo con CONAGUA (2020), el relieve está relacionado con una intensa actividad volcánica que inició a principios del Neógeno y se desarrolló durante el Pleistoceno Inferior. El conjunto de estructuras que lo caracterizan evolucionó sobre sedimentos mesozoicos plegados que se asocian a la Sierra Madre Oriental. Al evolucionar los fenómenos volcánicos, se formaron cuencas endorreicas que fueron rellenadas con materiales volcanoclásticos de características litológicas de rocas volcánicas en un medio lacustre y estratificado.

Existen distintos sistemas de fracturas y fallas regionales, dentro de los que destacan tres: el primero con dirección NW-SE y que afectó a rocas mesozoicas; los otros dos con orientación N-S y E-SW, que afectaron a rocas volcánicas del Mioceno.

5. **Estratigrafía.** González et.al. (2015) mencionan que, gracias a distintos pozos profundos, se ha integrado la estratigrafía del subsuelo de la CM. La base está constituida por la Formación Morelos del Cretácico inferior y por depósitos de conglomerados calcáreos y anhidritas similares al Grupo Balsas. El relleno está formado por depósitos lacustres en la cima y productos volcánicos, que incluyen derrames de lavas de composición variable, desde basalto a dacita, donde predominan las andesitas; depósitos piroclásticos de tobas e ignimbritas; una amplia variedad de materiales volcanoclásticos con edades del Oligoceno hasta el Cuaternario.
6. **Pozos.** González et.al (2015) indican que se pudo conocer una columna estratigráfica continua de la CM gracias al pozo Texcoco, se llegó a una profundidad de 2065 m, donde se encontraron depósitos de conglomerado calcáreo y capas de anhidrita. Fueron perforados cuatro pozos profundos que proporcionaron información estratigráfica, geocronológica y estructural del subsuelo de la CM. Gracias a los pozos Mixhuca-1 y Roma-1, se sabe que el basamento se encuentra a profundidades de entre 1600 a 3200 m, los pozos cortan a conglomerados y brechas. Los seis pozos profundos perforados en la CM alcanzan una profundidad desde 2008 a 3200 m, esta última profundidad se obtuvo en el pozo Roma-1, que no alcanzó el basamento de calizas. El pozo Mixhuca-1 corta las calizas a aproximadamente 1600 m de profundidad.

CONAGUA (2020) describe que, en los pozos ubicados en el acuífero ZMCDMX, predominan los siguientes materiales: a 50 m de profundidad, arena fina, mediana y gruesa; en algunos pozos, limo hasta una profundidad de 70 m; intercalaciones de arenas y gravas hasta los 300 m. Los pozos del Ramal Tláhuac están constituidos por tobas alteradas y cristalinas con intercalaciones de arenas finas.

Para el análisis relacionado con este trabajo es necesario identificar la respuesta eléctrica (resistividad) y radiactiva que generan las diferentes unidades litológicas.

1.3 Hidrogeología

De acuerdo con CONAGUA (2020), el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Figura 11), ubicado en la CM, está caracterizado como semiconfinado; se compone de un contenedor impermeable constituido por rocas volcánicas y calizas, mientras que las rocas sedimentarias originan un sistema acuífero complejo formado por tres cuerpos:

- **Acuífero somero** (600 m). Constituido por material lacustre, arcillas de alta porosidad y baja permeabilidad que forman un acuitardo que actúa como semi-confinante en el centro de la cuenca. Después, se tienen rocas vulcano-sedimentarias, denominadas por Mooser (2018) como Formación Taximai.

- **Acuífero intermedio.** Formado por derrames, piroclastos de roca volcánica (básica y ácida) y conglomerados de origen volcánico de la Formación Balsas.
- **Acuífero profundo.** Se tienen rocas volcánicas fracturadas con un espesor máximo en el centro de 2000 metros (CONAGUA, 2020). En la base, se tienen calizas del Cretácico Superior e Inferior.

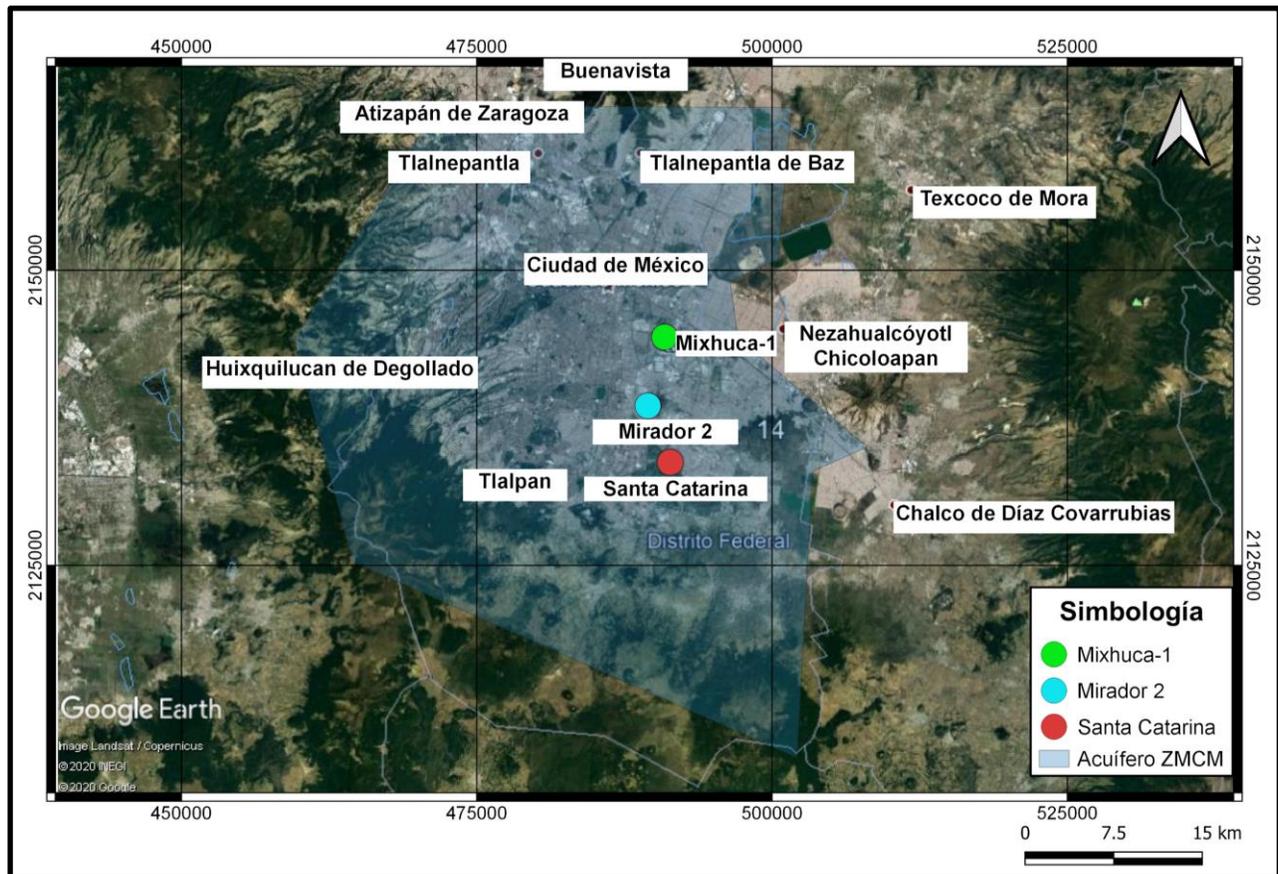


Figura 11. Ubicación del acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México y localización de los pozos de estudio (Tomada y modificada de Google Earth, basada en CONAGUA, 2020).

Tomando en cuenta que los pozos de estudio se encuentran ubicados dentro del mismo acuífero e integrando la información anterior con los registros de pozos, se considera que el material que se registra en cada uno de los pozos es similar entre sí, además es posible usar dicha información relacionada a estudios geológicos en alguno de los pozos de estudio, como algunos eventos geológicos. Finalmente, este estudio corrobora la hipótesis para poder hacer una correlación de los pozos. El saber qué tipo de material es el que predomina en el acuífero profundo, ayudará a identificar a éste con los registros de cada pozo, considerando que se encuentran en el mismo ambiente geológico.

1.4 Geología particular de los pozos profundos

Hasta el año 2008, se habían perforado seis pozos profundos en la cuenca, con un rango de profundidad de 2008 a 3200 metros, entre los años de 1967 y 1986: Texcoco (con profundidad de 2068 m), Roma (3200 m), Mixhuca (2452 m), Copilco (2258 m), Tulyehualco (3000 m), y San Lorenzo Tezonco (2008 m), con distintos fines, como petroleros y geotécnicos, los últimos cinco perforados a raíz del sismo de 1985 (González-Torres, et.al., 2015).

A partir del año 2008, el Gobierno de la Ciudad de México emprendió un proyecto de evaluación del subsuelo del acuífero, con fines hidrogeológicos; ha perforado los siguientes pozos: Mixhuca, San Lorenzo Tezonco, Santa Catarina y Mirador 2. En este trabajo, se presenta la correlación de la información geofísica y geológica con la finalidad de definir la continuidad de la estratigrafía del subsuelo de tres pozos debido a que en el primero no se obtuvo la información requerida para este tipo de perforaciones, registros geofísicos con fines petroleros.

1.4.1 Mixhuca-1

Se considera este pozo (Figura 12), perforado el 24 de noviembre de 1986, debido a la información continua que presentan los registros geofísicos de resistividad y rayos gamma naturales. La geología del pozo Mixhuca se divide en distintos eventos, diferenciables unos de otros, debido a sus tipos de rocas y los distintos ambientes de depósitos en que sucedieron. Tiene una profundidad de 2542 metros.

Cárdenas (1987) describe la geología de la siguiente forma, las rocas más antiguas del pozo pertenecen al Cretácico Medio. En el pozo, se puede observar a partir de los 1832 m de profundidad, teniendo un espesor de 620 m; la litología de esta unidad es caliza de tipo *mudstone*, parcialmente recristalizada y, además, la presencia de fracturas rellenas por calcita y ocasionalmente por material arcilloso. La descripción se hace de la parte profunda a la somera.

La formación que sobreyace pertenece al Cretácico Superior, la posición de esta formación se debe a la presencia de una falla normal. Esta formación se logra identificar entre los 1736 y los 1832 m de profundidad, teniendo un espesor de 96 m. Esta capa se caracteriza como caliza de tipo *mudstone*, presenta abundantes fracturas verticales y horizontales, selladas por calcita blanca y arcilla gris claro.

Producto de la actividad generada por la falla normal, la formación Cretácico Medio tiene presencia a partir de los 1573 a los 1736 m. Las fracturas en este intervalo se encuentran rellenas de caliza, siendo esta unidad la que finaliza los procesos geológicos pertenecientes al Mesozoico.

La unidad volcánica más antigua que se presenta en el pozo y que da inicio al Cenozoico es una secuencia de basaltos y tobas, se encuentra de los 948 hasta los 1573 m de profundidad, con un espesor de 625 m.

La unidad que sobreyace se encuentra de los 817 m a 948 m de profundidad, teniendo como espesor 131 m. Se denomina “Unidad de tobas y basaltos” debido a que hay una mayor presencia de tobas que en la unidad anterior, está intercalada con capas de basalto gris oscuro y café rojizo.

Sobre la unidad anterior se encuentra la Unidad de tobas, basaltos y brechas, se localiza a una profundidad de entre 675 a 817 m, teniendo un espesor de 142 m. Está caracterizada por intercalaciones de tobas, basalto y brecha volcánica, con una matriz areno-tobácea.

La siguiente unidad está compuesta de brechas y basaltos, con textura vesicular y toba verde, inmersos en una matriz areno-tobácea, las capas de basaltos tienen textura vesicular. Esta unidad se encuentra a partir de los 592 m hasta los 675 m de profundidad, con un espesor de 83 m.

Sobre esta última se encuentra la unidad de tobas, andesitas y conglomerados, se encuentra entre 272 a 592 m, con un espesor de 320 m.

La unidad que se encuentra a una profundidad entre 160 m a 272 m se denomina como Unidad de conglomerados, arcillas y tobas, tiene un espesor de 112 m. La matriz es poco consolidada de tipo areno-arcillosa.

La unidad que sobreyace es nombrada “Unidad de basaltos, arcillas y tobas” y está localizada entre los 90 y 160 m de profundidad.

Los últimos 90 metros se componen de sedimentos lacustres.

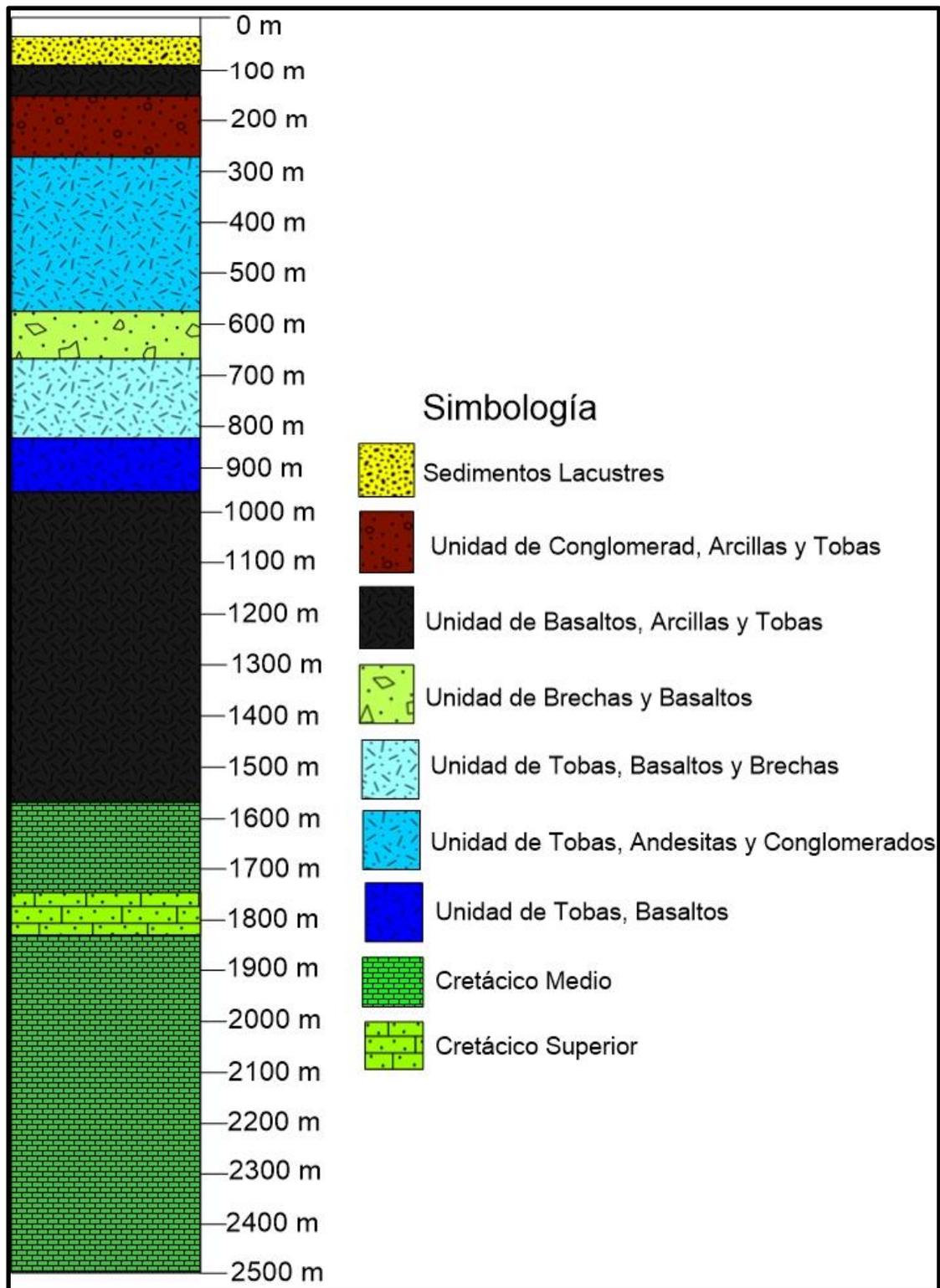


Figura 12. Columna litológica inferida del pozo Mixhuca-1 (Basada en Cárdenas, 1987).

1.4.2 Santa Catarina

Santiago (2018) infirió la geología del pozo Santa Catarina 3-A gracias a la descripción de las muestras de canal recuperadas en la perforación, a los registros geofísicos de pozo que fueron tomados y al índice de litología de Rayos Gamma y Resistividad, con el objetivo de hacer una columna litológica completa y lo más acertada posible (Figura 13). Otras herramientas que utilizó fueron la correlación con la información correspondiente al acuífero superior, la parte más superficial y con la litología de pozos cercanos, como el Santa Catarina 2 y Ampliación Tláhuac 21 (Santiago, 2018).

Como se puede observar en la columna litológica, se tiene una capa de arcillas y arenas en la superficie. Le subyacen tobas y basaltos, intercalados con arenas y conglomerados. Entre los 600 y 700 m de profundidad, se pueden encontrar andesitas y, al final, se tienen intercalaciones de tobas y basaltos. En la Figura 14, se muestra la clasificación hidrogeológica del pozo.

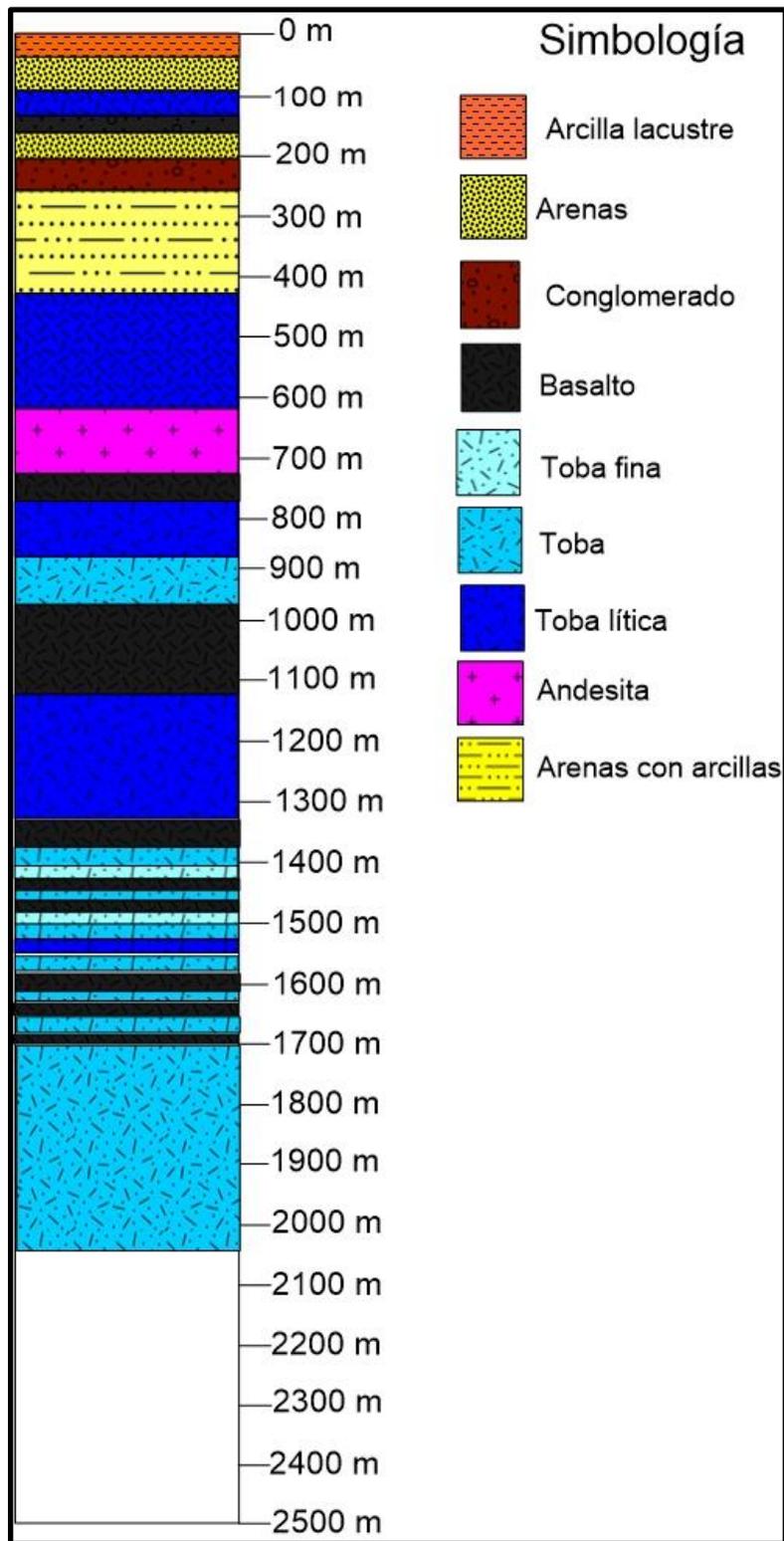


Figura 13. Columna litológica inferida del pozo Santa Catarina (Basada en Santiago, 2018).

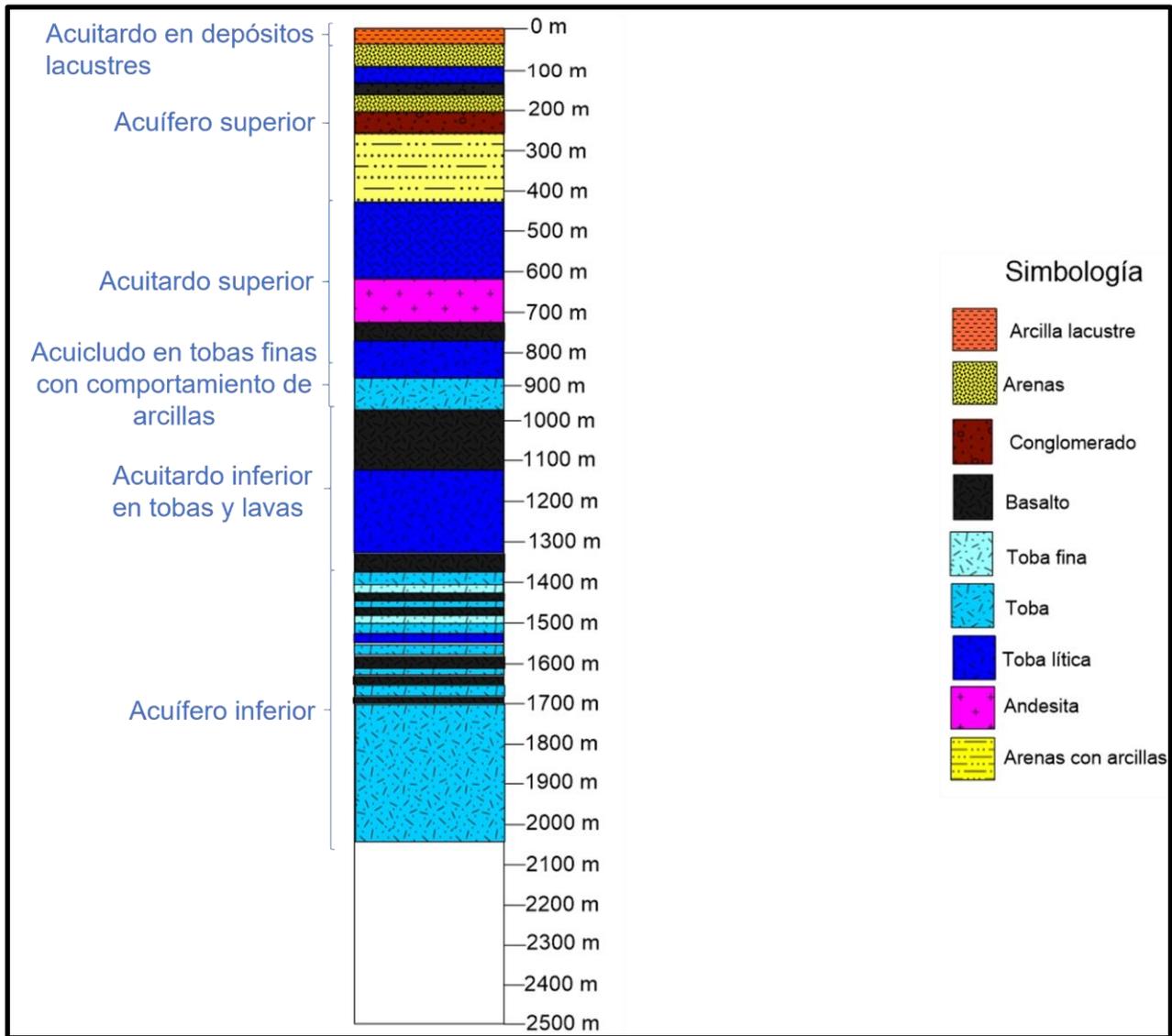


Figura 14. Clasificación hidrogeológica general del pozo Santa Catarina (Basada en Santiago, 2018).

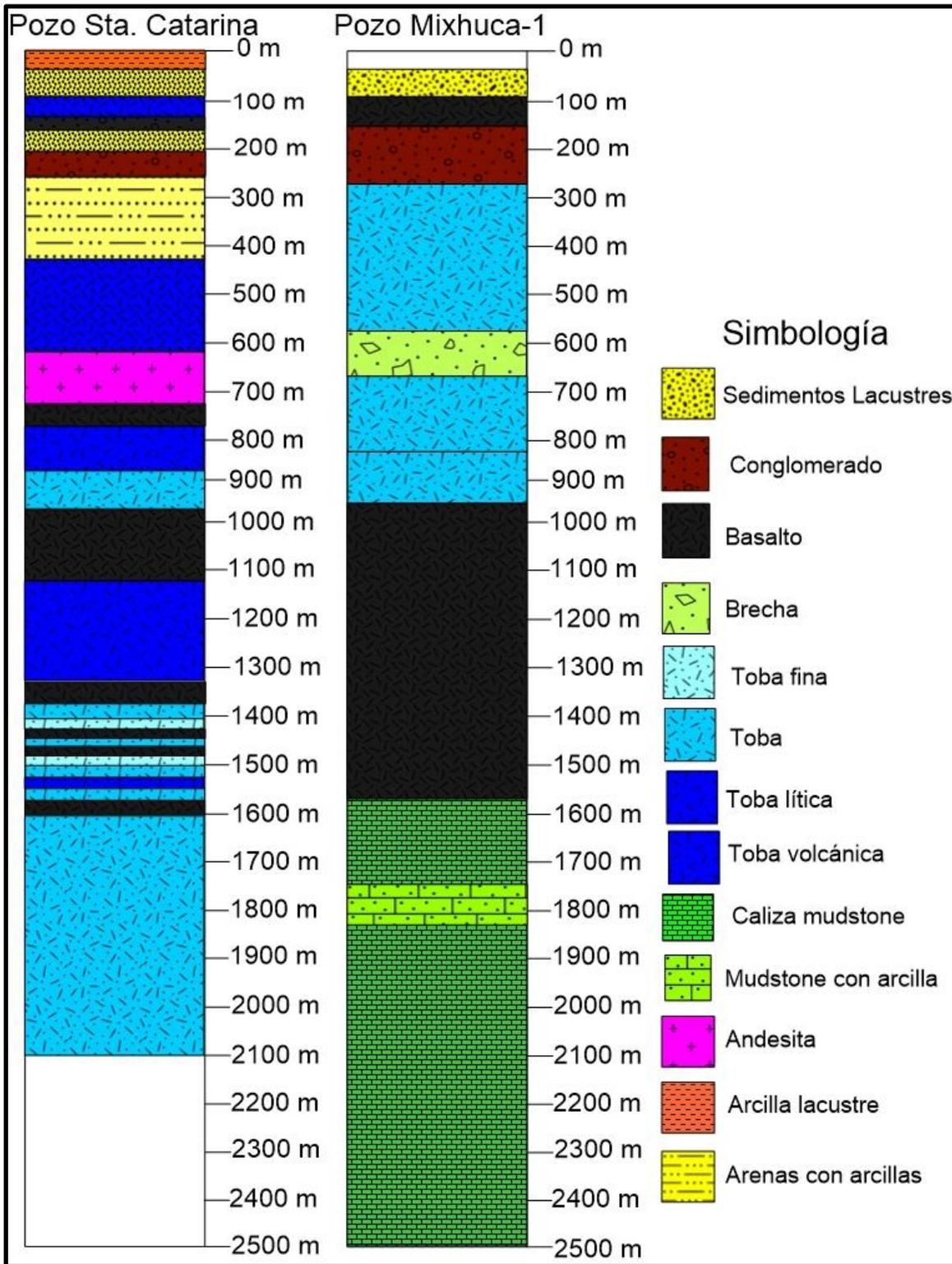


Figura 15. Comparación de las columnas litológicas de los pozos Santa Catarina 3-A y Mixhuca-1.

Capítulo 2. Análisis de señales

Para la geofísica el uso de instrumentos es necesario, por lo que cada uno de estos tiene una interacción con el medio y genera un tipo de respuesta diferente con respecto al tipo de propiedad que se está midiendo. El resultado de un registro geofísico de pozo de radiactividad natural es una señal estocástica, por lo que este tipo de señales tienen un rango diferente de valores y la adquisición de datos es a manera de apilamiento de datos en segmentos equidistantes a lo largo del pozo.

En el análisis de estos datos es necesario suavizar la señal, para esto el uso de filtros ayuda a poder tener una mejor visualización de la curva de datos, discriminando algunos datos de la señal hace que los datos restantes de la señal se adecuen a una línea de tendencia, para el caso de este estudio fue utilizado un filtro de media móvil. Su aplicación requiere de un muestreo con un intervalo determinado, debido al número de datos de la muestra es que se suaviza la curva, por lo tanto, a mayor número de datos en la muestra, mayor es el grado de suavizado en la curva, pero es importante considerar que mientras mayor sea el tamaño de muestra, hay más pérdida de datos en el análisis. Para el caso de este estudio, el filtro tiene un tamaño de muestra de 59 datos (el intervalo de adquisición de datos del registro es de 0.1524 m. lo que representa que se estará trabajando en un intervalo de 9 m, que para fines hidrogeológicos no impacta en el resultado), con este tamaño de muestra, son eliminados los valores de la curva que no se asemejan a la línea de tendencia, haciendo más visibles los cambios en los patrones de comportamiento de la curva y, con respecto a esto, poder determinar los cambios de litología en el pozo. Cabe mencionar que el uso de este filtrado es para definir mejor las unidades estratigráficas. Se aplicó al registro de Rayos Gamma, que se considera de tipo litológico.

Hay casos en los que, para poder trabajar lo antes mencionado, es necesaria la aplicación de algunas correcciones al registro, tal es el caso de los registros de resistividad, en los que se deben aplicar correcciones antes de comenzar con el procesado. Para poder efectuar estas correcciones, se requieren algunos parámetros de información adicional que sirven para añadir o quitar información al registro inicial. Si hacen falta estos parámetros, se puede utilizar el mismo registro en el procesado, pero es importante hacer la notificación.

Como éste es el caso de los registros de los pozos que se están estudiando, se usan los pozos con los datos crudos, debido a que la información del encabezado del registro no proporcionaba los datos suficientes para la aplicación de las correcciones.

2.1 Tipos de señales

Mnoney (2009), considera que las señales se pueden clasificar en términos de sus variables, ya que pueden ser dependientes o independientes, y también de la respuesta de variables dependientes con respecto a variables independientes, pero las clasificaciones de las señales digitales se basan en su dimensión. Para este tipo de señal, se aplica usando secuencias de tiempo discretas.

La clasificación con respecto a sus variables se divide en las siguientes:

- **Señal analógica:** las variables dependientes o independientes definen si una señal es continua en tiempo y amplitud. Esto quiere decir que, en cada instancia de tiempo, la señal tiene un valor de amplitud específico.
- **Señal de tiempo continuo:** la variable de tiempo es continua para el rango de valores donde la señal es definida. Es un tipo de señal donde la variable independiente es representada por algunas letras, por ejemplo, X , mientras que la variable de tiempo es comúnmente representada con la letra t ; la función de la señal se representa $x(t)$.
- **Señal de tiempo discreto:** la variable de tiempo es discreta para un rango donde la señal es definida. La variable de tiempo y la variable independiente son muestreadas en una instancia de tiempo, por lo tanto, una señal de tiempo discreta es referida como una señal muestreada, ya que se emplea analizando un tramo específico de la señal. La amplitud de la señal muestreada puede tomar cualquier valor dentro de un rango de amplitud especificado y, por esta razón, se define que la amplitud de la señal de tiempo discreto es continua.
- **Señal digital:** este tipo de señal es discreta en tiempo y en amplitud, además de que es representada de la misma manera que una señal de tiempo discreta.

La clasificación de las señales por medio de la respuesta de sus variables dependientes con respecto a sus variables independientes se puede dividir en:

- **Señal determinista:** se define a una señal que la variable dependiente es predecible en cualquier instancia de tiempo de la variable independiente. Las señales deterministas se interpretan mediante una expresión matemática explícita.
- **Señal aleatoria:** este tipo de señal sólo se puede definir en términos de sus propiedades estadísticas, por lo que la variable dependiente es impredecible en cualquier momento con respecto de la variable independiente de tiempo.

Las clasificaciones anteriores de señales digitales se pueden también clasificar en términos de su dimensión:

- **Señal unidimensional:** una señal discreta de tiempo es una señal unidimensional ya que solo tiene una variable independiente (t) de tiempo discreto y una variable dependiente de amplitud $x(t)$.
- **Señal bidimensional:** tienen dos variables independientes y una sola variable dependiente. El muestreo de las variables independientes es en el dominio del espacio y una señal bidimensional es discreta en el dominio del espacio. Una forma de representar estas señales es de la siguiente manera: $x(t, m)$.
- **Señal tridimensional:** consta de tres variables independientes y una variable dependiente. Una de estas variables independientes se encuentra en el dominio de tiempo, mientras que las otras dos son en el dominio espacial. Estas tres variables definen el comportamiento de la variable dependiente.

Para el caso de este estudio, el tipo de señal con el que se trabaja es digital. La variable de tiempo es sustituida por una variable de profundidad que representa los metros que se profundiza y ésta es la variable independiente; la otra variable es la respuesta obtenida por los artefactos, en este caso son dos registros: el registro de rayos gamma y el registro de resistividad. Estos registros representan a las variables dependientes, ya que es necesario profundizar hasta ese punto para obtener esa respuesta de registro. Además, la señal es de tiempo discreto debido a que las lecturas fueron tomadas a un determinado intervalo, es decir, se medía cada 0.1524 m.

2.2 Teorema de muestreo

El teorema de muestreo también se puede conocer por los nombres teorema de Nyquist-Shannon, teorema de muestreo Whittaker-Nyquist-Kotelnikov-Shannon o también criterio de Nyquist; éste tiene una gran utilidad en la teoría de señales.

El teorema funciona para demostrar una reconstrucción con exactitud de una señal periódica continua en banda base a partir de sus muestras. En términos matemáticos, la señal debe de estar limitada en banda, esto quiere decir que la señal se encuentra limitada tanto por un valor máximo y un valor mínimo que es resultado del muestreo o aplicación del filtro, y su tasa de muestreo debe ser superior al doble de su ancho de banda, este término se refiere al rango de frecuencias contenidas en una señal, por lo tanto, para este estudio el rango de frecuencias son el rango de frecuencia de los registros GR y de resistividad. Pero no debe ser relacionado con el tema de cuantificación, ya que es un proceso posterior al muestreo en la digitalización de una señal y no es reversible, ya que ocurre una pérdida de datos que es nombrada error o ruido de cuantificación y establece un límite teórico superior a la relación señal-ruido. Este teorema es matemáticamente posible si la señal está limitada en banda y la tasa de muestreo es superior al doble de su ancho de banda.

2.3 Filtro media móvil

Este tipo de filtro funciona aplicando una suma escalonada o promedio del número de datos determinada. Para el caso de este filtro, el comportamiento de la suma promedio comienza a tener un desplazamiento progresivo en los datos, pero la dimensión de la muestra no se modifica. La expresión matemática de un filtro de media móvil es de la siguiente manera:

$$y_n = a_0x_n + a_1x_{n-1} + a_2x_{n-2} + \dots + a_Nx_{n-N} = \sum_{k=0}^N a_k x_{n-k}$$

Este tipo de filtro se describe como un filtro de convolución, ya que, para calcular el valor en un punto determinado, examina los valores que tienen los datos colindantes y, con el fin de suavizar la imagen, busca adecuar cada uno de los valores con el anterior y con el siguiente.

La mayor desventaja de la aplicación de un filtro es la pérdida de datos. En el caso de media móvil, a mayor dimensión de la muestra, mayor será la pérdida de datos en los extremos del registro, por lo que es importante considerar hasta qué punto es útil el uso del filtro; dependiendo del tamaño de muestra posiblemente se pierda la relación directa con la señal original. Otro factor importante para considerar con respecto al filtro es el porcentaje de error. Este factor es proporcional con la pérdida de datos y es la que ayuda a determinar qué tan diferente es la curva con respecto a la curva de señal original.

Para el caso de la tesis, la dimensión de la muestra, es decir, n , es de 59 datos, con el fin de suavizar la señal obtenida y poder delimitar cada una de las litologías identificadas. Se pierden ciertas características cada 0.1524 m, pero se hicieron pruebas con el fin de encontrar n que arrojara mejores resultados. Se tomó en cuenta que el promedio de error no fuera demasiado grande, además de que para fines de hidrogeología el error es mínimo.

En el caso de este estudio, para la señal obtenida de los instrumentos, hay ciertos datos que se necesitan tomar en cuenta para poder hacer un análisis de la señal, así como la aplicación del filtrado de la señal, estos datos se enlistan en la siguiente tabla:

Tabla 3. Resumen del resultado del filtrado de datos.

Pozo	Mixhuca-1	Mirador 2	Santa Catarina 3A
Digitalización de registro [m]	0.1524	0.1524	0.1524
Número de datos sin filtrar	16045	12559	11218
Número de datos filtrados	15985	12501	11110
Promedio de % Error de GR	15.6502%	6.36666%	9.8062%
Promedio de % Error de AT90	41.2832%	73.1912%	93.5339%
Profundidad total [m]	2449.96	2376.9828	1773.4788
Profundidad con filtro [m]	2445.354	2372.5632	1769.0592
Distancia total recorrida [m]	2435.9616	1908.048	1764.6396

En la tabla anterior, se puede observar que la cantidad de datos varían entre sí, además de que, después de limpiar los datos con error de adquisición, algunos tuvieron una mayor reducción que otros, como lo es en el pozo Santa Catarina, mientras que los otros pozos tuvieron un número menor de datos con este tipo de

error. Estos datos tienen una digitalización cada 0.1524 m hasta una profundidad específica en cada uno de los pozos.

Aplicando el filtro de media móvil y al tener un rango de muestreo de 59 datos, se pierden los valores en los extremos, teniendo una pérdida de 29 datos y longitud de tramo de registro de 4.42 m. Al hacer un análisis del porcentaje de error de cada uno de los registros de los pozos se puede observar que es distinto para cada uno, esto depende mucho de la calidad de los datos que se registraron, además del rango de muestreo aplicado, ya que, al aumentar el rango, crece la probabilidad de que el error aumente con ello. Como se puede observar en el caso del registro de resistividad, se tiene un rango de error mucho mayor, debido a que la respuesta que se tiene registrada contiene segmentos donde los valores difieren en gran medida de los demás segmentos del registro, esto puede ser debido a los problemas asociados a la perforación del pozo.

En la Figura 16, se muestra la secuencia del proceso aplicado desde la obtención de los datos en campo hasta la integración de los datos con la geología de cada pozo, señalando los puntos importantes, así como los requisitos.

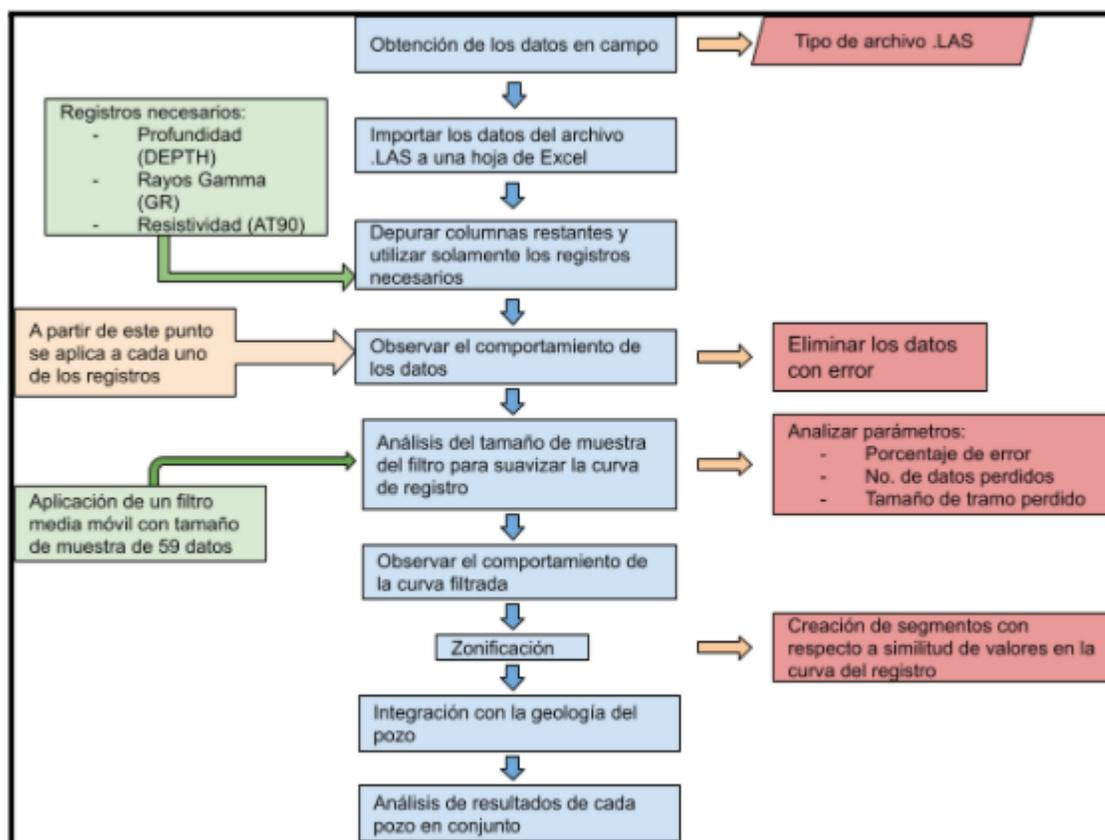


Figura 16. Representación de los procesos aplicados en el análisis de las señales para cada uno de los registros de pozos.

Capítulo 3. Respuesta física de las unidades litológicas identificadas a partir de los registros geofísicos de pozos

Los registros geofísicos son el resultado numérico de la adquisición gráfica o digital de propiedades físicas de las formaciones (Arroyo y Roig, 1987), atravesadas por un pozo por donde bajan los dispositivos para obtener datos puntuales en función de la profundidad. Son de gran utilidad para correlacionar y obtener modelos físicos del subsuelo. Para contar con más información que permita realizar un mejor análisis, se toman múltiples registros, obteniendo diferentes propiedades físicas. Los utilizados para este trabajo son los de Rayos Gamma, que registra propiedades intrínsecas de las rocas relacionadas con la litología, y de Resistividad, que necesita una fuente externa y obtiene propiedades de las rocas de forma indirecta, relacionada con la porosidad que pueda presentar el medio. Si bien se están correlacionando dos propiedades que son completamente distintas, donde los registros de radiactividad natural responden a interacciones electrónicas-iónicas y, por otro lado, el registro de resistividad responde a la cantidad de fluido que puede tener el medio granular o fracturado, lo que se trata en este trabajo es buscar una correlación de las respuestas de ambos registros con base a su contenido radiactivo (rayos gamma), su resistividad (asociada a la porosidad con base en el contenido de una solución de agua) y el medio geológico.

3.1 Respuesta radiactiva y resistiva en rocas volcánicas

En geofísica, cada uno de los registros se enfoca en medir cierta propiedad perteneciente a la roca. Esta propiedad puede deberse a sus características químicas, físicas o pertenecientes a agentes externos a la roca. Este tipo de mediciones obtienen diferentes valores dependiendo del tipo de roca que se encuentre en el medio, por lo tanto, las rocas sedimentarias no tendrán una misma medición en los registros que las rocas volcánicas. Esto es debido a que la petrogénesis, composición y ambiente de ambos tipos de roca son diferentes, por lo que presentan factores propios, los cuales hacen posible un análisis geofísico específico por cada tipo de roca.

De acuerdo con Zou (2013), las rocas volcánicas con litología similar y en diferentes intervalos muestran diferentes respuestas en los registros, así como las rocas volcánicas con diferente litología en un mismo intervalo muestran también diferentes respuestas. En la siguiente tabla (Tabla 4), se muestran los valores generales que tienen las rocas volcánicas, tanto de radiactividad como de resistividad.

Tabla 4. Características generales de las propiedades de rocas volcánicas (Basada en Zou, 2013).

Rocas volcánicas	Propiedades
Basalto	Valor de rayos gamma naturales bajo Resistividad relativamente alta
Andesita	Valor de rayos gamma naturales medio Resistividad media
Riolita	Valor de rayos gamma naturales relativamente altos Resistividad relativamente baja
Traquita	Valor de rayos gamma naturales altos Resistividad alta
Toba	Valor de rayos gamma naturales medio Resistividad baja
Traquita basáltica	La respuesta de los registros tiene las características entre las de basalto y traquita

De acuerdo con Zou (2013), basándose en la información proporcionada por la Tabla 4, se pueden identificar diferentes litologías volcánicas en diferentes intervalos, clasificando así los registros de litofacies volcánica en los siguientes:

1. Facies explosiva: perfil irregular con una magnitud media a baja en el registro de curvas. La subfacies de flujo clástico tiene como componente principal toba soldada, mientras que la de base caliente consiste en toba cristalina; finalmente, la subfacies de caída libre se compone de aglomerado, brecha, brecha soldada y lava de brecha.
2. Facies efusiva: perfil ligeramente irregular y en bloques en el registro de resistividad con magnitud media a alta. La subfacies más baja está compuestas de riolita de baja porosidad, la media tiene como componente riolita compacta y la superior consiste en riolita vesicular.
3. Facies de conductos volcánicos: perfil irregular con magnitud media a alta en el registro de curvas. Se compone principalmente de brecha soldada y lava de brecha.
4. Facies extrusiva: la subfacies de intrazona contiene perlita con perfiles esféricos y en forma de almohada en los registros de imagen; la de mesozona contiene perlita masiva y riolita aplítica; finalmente, la de la zona exterior se compone de lava de brecha con estructura riolítica deformada.
5. Facies sedimentaria volcánica: perfiles rítmicos en registro de curvas con grandes diferencias en el espesor. Predominan las rocas volcanoclásticas con clastos terrígenos que fueron introducidos durante el periodo de inactividad volcánica.

La roca volcánica puede ser clasificada en dos tipos (Tabla 5): roca eruptiva y roca intrusiva poco profunda o roca subvolcánica. Así mismo, la roca eruptiva puede subdividirse en subfacies de cráter y de pendientes volcánicas.

Las rocas intrusivas generalmente se distribuyen a lo largo de estratos, teniendo contacto discordante con los estratos suprayacentes y subyacentes. Las rocas intrusivas poco profundas se dividen en tres secciones verticales: sección corrosivamente metamórfica superior e inferior, sección de transición superior e inferior y sección central. Además, estas rocas son clasificadas lateralmente en subfacies central, de transición y de borde. Los tipos de espacios de reserva en estas rocas son fracturas, poros y cavernas disueltas, y vesículas. Al ser comparadas con las rocas eruptivas, las intrusivas tienen menor espacio poroso, pero tienen más fracturas y cavernas disueltas en una escala relativamente grande.

Tabla 5. Litofacies y propiedades de rocas volcánicas (Tomada y modificada de Zou, 2013).

Tipo de roca	Litofacies	Propiedades
Roca intrusiva superficial	Subfacies central	Perfil de bloqueo con alta resistividad y densidad, bajo valor de rayos gamma naturales
	Subfacies de transición	Tres perfiles verticales en registros eléctricos.
	Subfacies de borde	Baja densidad y resistividad, valor alto de rayos gamma naturales
Rocas eruptivas volcánicas	Subfacies de cráter	Alta densidad y resistividad, valor bajo de rayos gamma naturales. Los cambios largos en el diámetro de agujero pueden estar relacionados al desarrollo de fracturas.
	Subfacies de pendiente volcánica	Alta resistividad y rayos gamma naturales. Variación larga de densidad.
	Subfacies efusiva	Alta resistividad, valor bajo de rayos gamma naturales con larga variación.

En general, la resistividad de las rocas volcánicas es alta, lo que hace posible identificarlas al realizar estudios eléctricos (Tabla 6).

Tabla 6. Resistividad de rocas volcánicas (Basada en Zou, 2013).

Periodo	Litología	Resistividad promedio [Ω m]
Cretácico	Toba	7.6
	Andesita	31.8
	Brecha volcánica	11.7
	Basalto	32.5

El estudio realizado por Zou (2013), como se muestra en las tablas anteriores, es lo que ayuda a clasificar las rocas volcánicas de acuerdo con la respuesta tanto resistiva como radiactiva, lo que da origen a la clasificación de éstas en una gráfica cruzada de resistividad-rayos gamma, como se puede ver en la Figura 17. Los registros de rayos gamma muestran un incremento en los valores cuando se tiene un cambio de roca volcánica básica a ácida y, los registros de resistividad, un decremento (Figura 17).

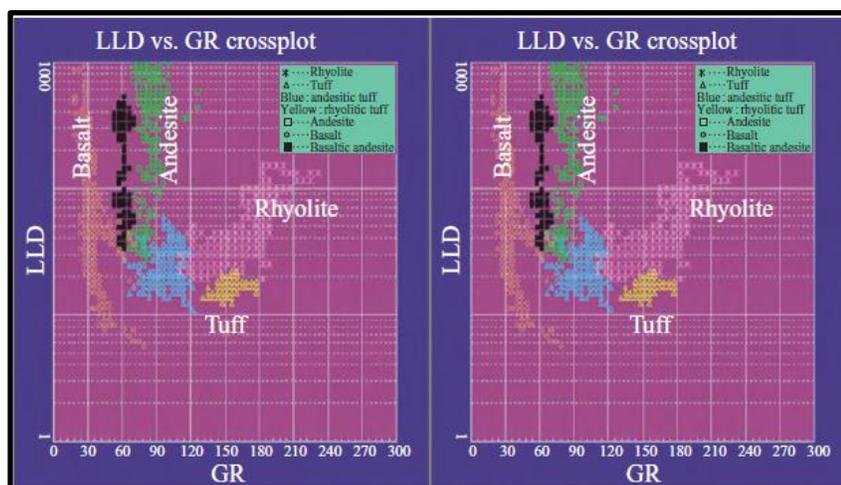


Figura 17. Respuesta de los registros de rocas volcánicas (Tomada y modificada de Zou, 2013).

Se hace la aclaración que lo antes expuesto es el resultado de un sinfín de estudios realizados por Zou. Para el caso de este trabajo, el conocimiento del acuífero en un ambiente geológico volcánico requiere de un

mayor número de pozos distribuidos para identificar, clasificar y definir con mayor detalle, los posibles ambientes geológicos que se presentan en el subsuelo del acuífero Zona Metropolitana Ciudad de México. Se menciona en este trabajo como un área de oportunidad que se puede presentar para plantear mejor la metodología.

3.1.1 Problemas en la perforación y estabilidad de pozo

Los problemas en la perforación de un pozo, de igual manera, pueden afectar a la adquisición de datos en un registro geofísico, ya que dependiendo del tipo de error que se encuentre en el medio se pueden modificar los valores reales, haciendo que la curva aparezca con ruido; por lo tanto, es un punto importante de considerar al momento de hacer una interpretación.

Para Santos O. (2015), los principales problemas de perforación son los siguientes:

- **Fracturas.** En todas las formaciones existen fracturas; dependiendo del tipo de material, existe la posibilidad de que aumente su número. Comúnmente, las formaciones ya consolidadas y duras son las que tienen más fracturas, esto lleva a que las formaciones más antiguas, profundas y duras tienden a tener más fracturas que las zonas superficiales, blandas y poco consolidadas. Ahora bien, en el medio donde se está evaluando la CM se presenta, con base en los modelos propuestos en el apartado 1.2, una serie de eventos volcánicos donde el material fue expulsado a través de fallas o cámaras magmáticas, lo que hace suponer la presencia de fracturamiento por los esfuerzos que se presentaron.

En términos geofísicos, esto podría implicar la adquisición de lecturas erróneas, pero de igual forma se debe de considerar la posibilidad de que las formaciones que contienen fracturas se encuentren rellenas de cierto material, por ejemplo, arcillas o calcita u otro cementante, haciendo que la unidad tenga una lectura diferente.

- **Inestabilidad del agujero.** La inestabilidad de las rocas es un factor que compete al tipo de roca que se encuentra en la zona. En casos comunes, la roca que es más susceptible a este tipo de problemas es la lutita o arcillas, debido a su condición deleznable y frágil. Otro caso similar es con las arenas no consolidadas que se encuentran a poca profundidad. Para el caso de los basaltos o rocas compactas, el fracturamiento de boleos o bloques pueden reducir el diámetro del agujero (en términos de perforación hidrogeológica se les denomina sapos, donde el bloque se mueve y evita que la sarta de perforación se pueda sacar). En el proceso de perforación del pozo, este tipo de material puede ser erosionado por el fluido de perforación en flujo turbulento. Otro factor que ocasiona inestabilidad en el agujero es debido a los esfuerzos tectónicos aplicados en el medio o cuando la presión hidrostática del fluido de perforación es menor a la presión de los fluidos que pertenecen a la roca, particularmente cuando la permeabilidad es baja. Uno de los problemas más típicos es con la lutita, afectada por la cantidad de agua que contenga. Las lutitas causan más del 90% de los problemas de inestabilidad, dependiendo del tipo de arcilla que existe, ya que esto hace que pueda incrementar el grado de inestabilidad debido a la capacidad de absorción de cada uno.

Martinez H. (1997) define que el registro de rayos gamma tiene distintos factores que pueden afectar la respuesta, como son los siguientes:

- a) **Diámetro del pozo.** Este factor implica la relación entre el tamaño de diámetro de agujero del pozo y la intensidad de la radiactividad registrada; a mayor diámetro de agujero, mayor es la intensidad de registro de radioactividad, cuando se usa un lodo de tipo bentonítico.
- b) **Densidad de lodo.** Un comportamiento común es que, a mayor densidad de lodos, la cantidad de radiación detectada por el receptor es menor. Pero para el caso del lodo bentonítico, el comportamiento es diferente, ya que a mayor densidad del lodo la cantidad de radiación también es mayor.
- c) **Tubería de revestimiento.** El revestimiento debe ser apto para soportar diversas circunstancias, por lo tanto, el material que se utiliza es variado, ocasionando que se modifique la respuesta reduciendo la intensidad de la señal que recibe el detector.
- d) **Velocidad de registro.** Este factor modifica en gran medida la respuesta que se obtiene en el registro, debido a que, como se mencionó, al ser un proceso estadístico estocástico, se obtiene menor número de mediciones al incrementar la velocidad, así como también el valor promedio en el punto de adquisición es menor, distorsionando la respuesta.

3.2 Registro de Rayos Gamma

Los rayos gamma son ondas electromagnéticas de alta energía generadas a partir del decaimiento del átomo, emitidos al desintegrarse su núcleo atómico, donde también son emitidas partículas alfa y beta. Éstos son los únicos que pueden penetrar más lejos debido a que carecen de carga, además de que son los únicos que penetran la roca y, como consecuencia, los únicos que pueden ser medidos (Schlumberger, s.a.). Estos impulsos son emitidos espontáneamente por algunos elementos radioactivos, por ejemplo, el isótopo de potasio y los elementos radiactivos de las series de uranio y torio; cada uno de estos elementos emite rayos gamma, pero la cantidad y el nivel de energía varía dependiendo de cada uno (Ramos, 2008).

Poco se sabe del comportamiento de la radiactividad en rocas volcánicas, es por eso que hay que esperar a tener más registros para poder ver la respuesta de rayos gamma en eventos volcánicos y, así, poder analizar correctamente los registros, además de asociarlos a las litofacies que son propuestas por Zou (2013).

Ramos, H. (2008) se refiere a que la medición de este registro es por medio de la radioactividad natural de las formaciones rocosas. Las formaciones de tipo sedimentario generalmente reflejan el contenido de arcilla debido a que los elementos radioactivos tienden a concentrarse en arcillas y lutitas. Las formaciones con poco contenido de estos elementos, como lo son las de origen volcánico, representan un valor bajo de radiactividad, pero se puede considerar que otros agentes, como el tipo de roca (básica, intermedia o ácida), como basaltos, andesitas, riolitas o ignimbritas, así como cenizas volcánicas, residuos de granitos presentes o agua, contengan sales de radiación disuelta que puedan modificar el valor de radiactividad de la formación.

La base para medir rayos gamma es hacer distinciones entre los valores bajos y altos del registro (Schlumberger, s.a.).

Garduza, V. (2019) explica que, durante la meteorización de las rocas, los elementos radioactivos que éstas contienen se desintegran en partículas de tamaño arcilla, por lo tanto, las lutitas tienen mayor valor en comparación con las arenas. Los elementos radiactivos principales son: potasio (K), torio (Th) y uranio (U).

El nivel de radioactividad varía con la densidad de la formación, es decir, dos formaciones que tengan la misma cantidad de material radiactivo por unidad de volumen, pero con diferentes densidades mostrarán diferentes niveles de radioactividad. Las formaciones menos densas aparecerán con un valor más radiactivo (Ramos, 2008).

Bassiouni (1994) señala que la determinación del contenido de arcillas en un registro de rayos gamma total corresponde con los minerales radiactivos que están asociados a minerales arcillosos. Sin embargo, también existe la posibilidad de que una alta radiactividad esté asociada a otros agentes, por ejemplo, contaminación radioactiva en el medio, como son ceniza volcánica, lixiviado de granitos o sales disueltas en el agua de formación de algunas rocas, tales como areniscas con sales de Torio o Uranio. En el caso de una situación similar, la mejor forma de poder visualizar la respuesta del medio es excluir la curva de Uranio, esto hace que la evaluación tenga mayor certeza con respecto al contenido de arcilla.

Por lo que, si los valores de la curva se encuentran del lado izquierdo, indicarán el bajo contenido de arcilla y, si es un valor alto en contenido de arcilla, entonces se encontrará del lado derecho. Generalmente, el rango de valores va de 0 a 100, siendo la unidad de medida en grados API (Garduza, 2019), establecidas por el Instituto Americano del Petróleo (API, por sus siglas en inglés) (Schlumberger, s.a.).

Este registro funciona por medio de una sonda, ésta contiene un detector para medir la radiación que se origina en volumen de la formación que se encuentra cerca de la sonda. Se utilizan contadores de centelleo acoplados con un multiplicador y un amplificador-discriminador, ya que hoy en día es más eficaz debido a que sólo necesitan unas cuantas pulgadas de longitud y se obtiene detalladamente la formación. Este registro se corre en combinación con herramientas de registro en agujero abierto y cerrado (Ramos, 2008).

Como se puede observar en la Tabla 4 (apartado 3.1), Zou (2013) describe qué rango de valores toma el registro de rayos gamma de acuerdo al tipo de roca presente, es decir, las rocas volcánicas básicas toman valores bajos de radiactividad y las ácidas valores altos (Figura 16, apartado 3.1); por ejemplo, los basaltos toman valores bajos, mientras que las riolitas toman valores relativamente altos, las tobos presentan valores medios al igual que las andesitas.

La profundidad de investigación va de 10 a 15 pulgadas y ésta varía de acuerdo con la densidad de la formación. La resolución vertical varía con la velocidad a la que se toma el registro, pero aproximadamente es de 24 pulgadas. Si la resolución aumenta, entonces la profundidad de investigación disminuye. Es importante realizar el registro a una velocidad lo suficientemente baja para que se reduzcan las fluctuaciones en el registro.

Las aplicaciones de este registro son distintas, entre las que se encuentran la correlación, indicador de litología, identificación de ambientes de depósito, de material orgánico en rocas y de fracturas, además de la evaluación cuantitativa de contenido de arcilla. Gracias a este registro, pueden correlacionarse pozos entre sí y la profundidad entre distintos viajes de pozos.

El registro de Rayos Gamma obtenido para cada uno de los pozos se muestra en las figuras siguientes:

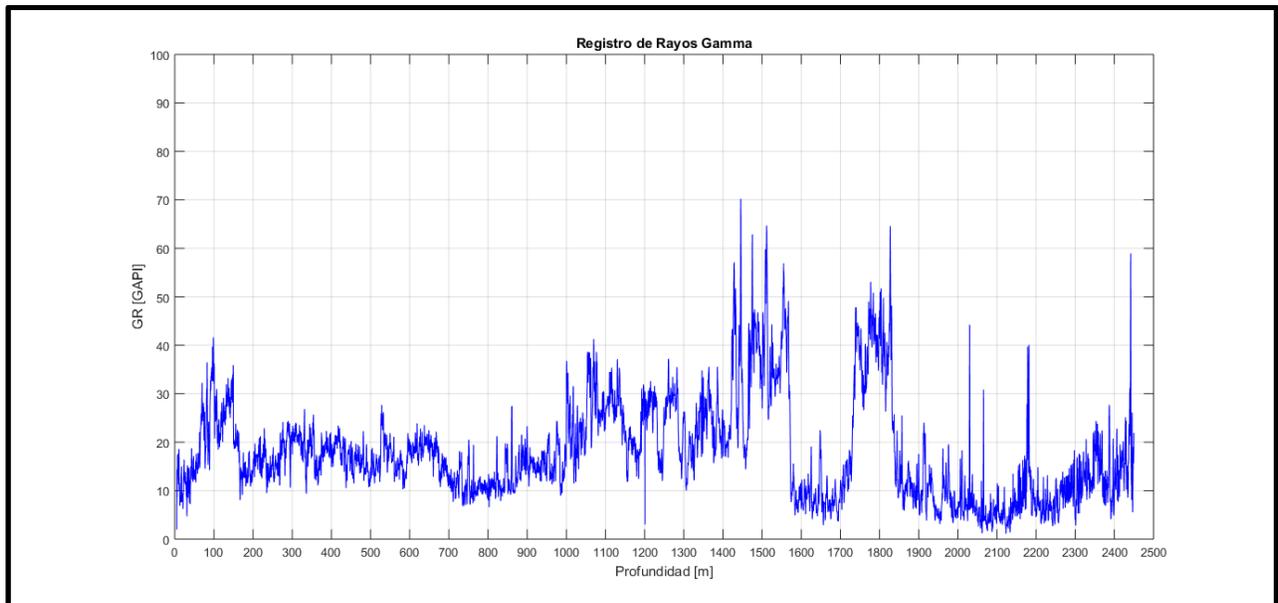


Figura 18. Registro crudo de Rayos Gamma del Pozo Mixhuca-1.

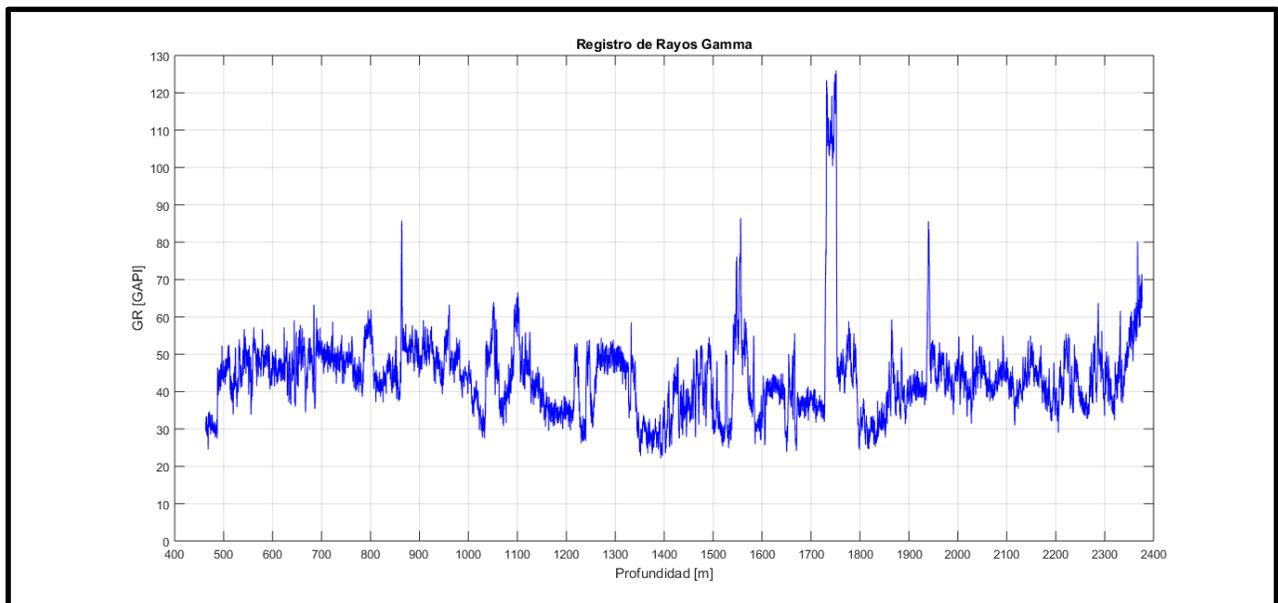


Figura 19. Registro crudo de Rayos Gamma del Pozo Mirador 2.

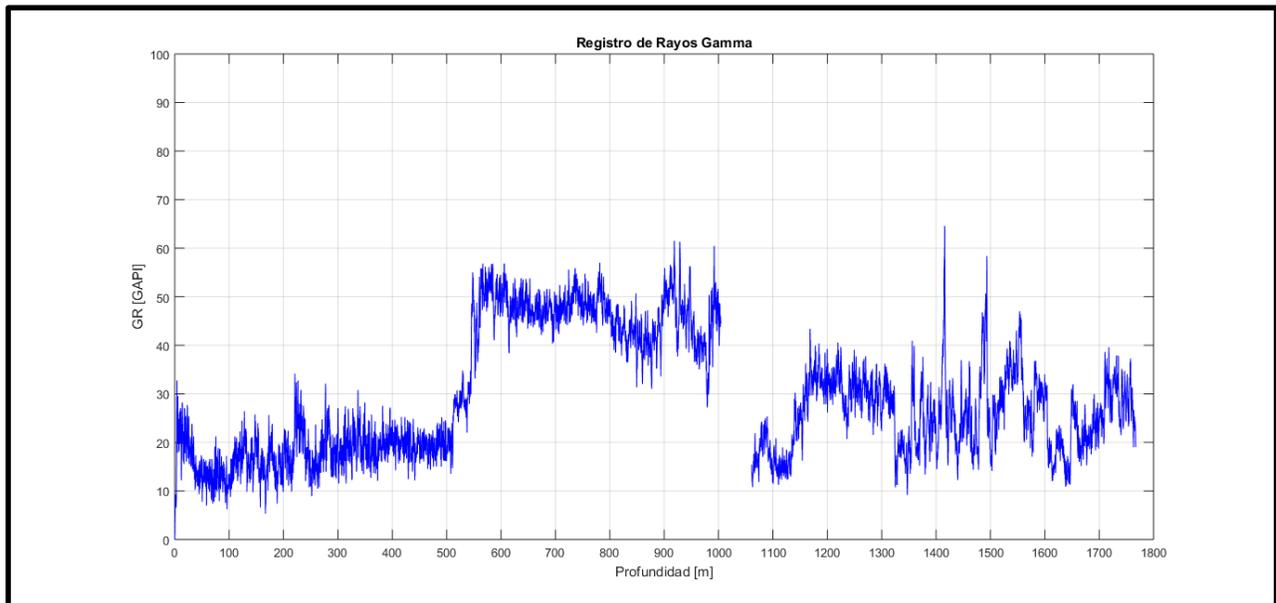


Figura 20. Registro crudo de Rayos Gamma del Pozo Santa Catarina 3-A.

3.3 Registro de Resistividad

La resistividad eléctrica es una propiedad física que indica la capacidad de impedir el flujo de corriente eléctrica a través de un medio; la unidad utilizada es el Ohm metro [Ωm]. El registro de resistividad que se utiliza en este estudio es un registro a profundidad y es nombrado también Registro Lateral Profundo (LLD, por sus siglas en inglés).

Según Ramos, H. (2008), el principio consiste en introducir corrientes en la formación por medio de electrodos, se miden los voltajes entre los electrodos receptores. Este voltaje es medido en un volumen específico de la formación y los voltajes son correspondientemente proporcionales a las resistividades de la formación. De acuerdo con Schlumberger (año), el volumen representa dos tipos de profundidad de investigación, la superficial y la profunda.

La herramienta Doble Lateral (DLT, por sus siglas en inglés) es usada para medir la resistividad de la formación y está diseñada para medir en ambientes conductores de lodos de perforación (Schlumberger, s.a.). Esta herramienta proporciona dos mediciones de resistividad, una de ellas es profunda (LLD) y es el registro que se utilizó en el pozo Mixhuca-1.

La formación contiene siempre alguna cantidad de agua, por lo tanto, conducirá electricidad que, si es que contiene sales disueltas, entre más grande es la concentración de sales, más baja es la resistividad. En condiciones donde hay presencia de sales disueltas en el medio, estas sales se disocian en cationes y aniones que, bajo la influencia del campo eléctrico, hacen que los iones transporten una carga eléctrica. Por lo tanto, si la concentración de sal es mayor, la respuesta de resistividad del agua en el medio es menor; también se

debe tomar en cuenta que, si la porosidad de la formación incrementa, aumenta la cantidad de agua en la formación y esto ocasiona que la resistividad del medio es menor.

Este tipo de registro es una herramienta que funciona de manera muy eficaz para poder generar una interpretación cuantitativa de la formación a estudiar, pero la principal condición es que se deben ocupar lodos conductivos en el pozo para que eso sea posible, ya que se necesita un medio conductor entre la herramienta y la pared del pozo, además para inferir la permeabilidad de la roca con base en la invasión que se presenta, ya que la cantidad de invasión que se tiene es dependiente de la permeabilidad del revoque y no de la porosidad de la roca.

Los lodos salados tienen dos clasificaciones principales, esto es dependiendo del nivel de salinidad que se encuentra disuelto en el lodo. Este tipo de lodos se utilizan para contrarrestar o controlar la salinidad del medio (si es que existe).

Para este estudio, se utilizó el registro de resistividad AT90, registro de resistividad de 90 pulgadas de profundidad de investigación a partir del centro del agujero, el cual es la curva más profunda, para los pozos Mirador 2 y Santa Catarina. De acuerdo con Garduza (2019), es un tipo de registro AIT (arreglo de inducción, por sus siglas en inglés), que permite generar imágenes profundas de resistividad gracias a la gran cantidad de mediciones que se hace. Este tipo de registro muestra las capas finas y efectos de invasión con alta precisión debido a la resolución vertical que tiene, que es de 12 pulgadas.

El registro de Resistividad obtenido para cada uno de los pozos se muestra en las figuras siguientes:

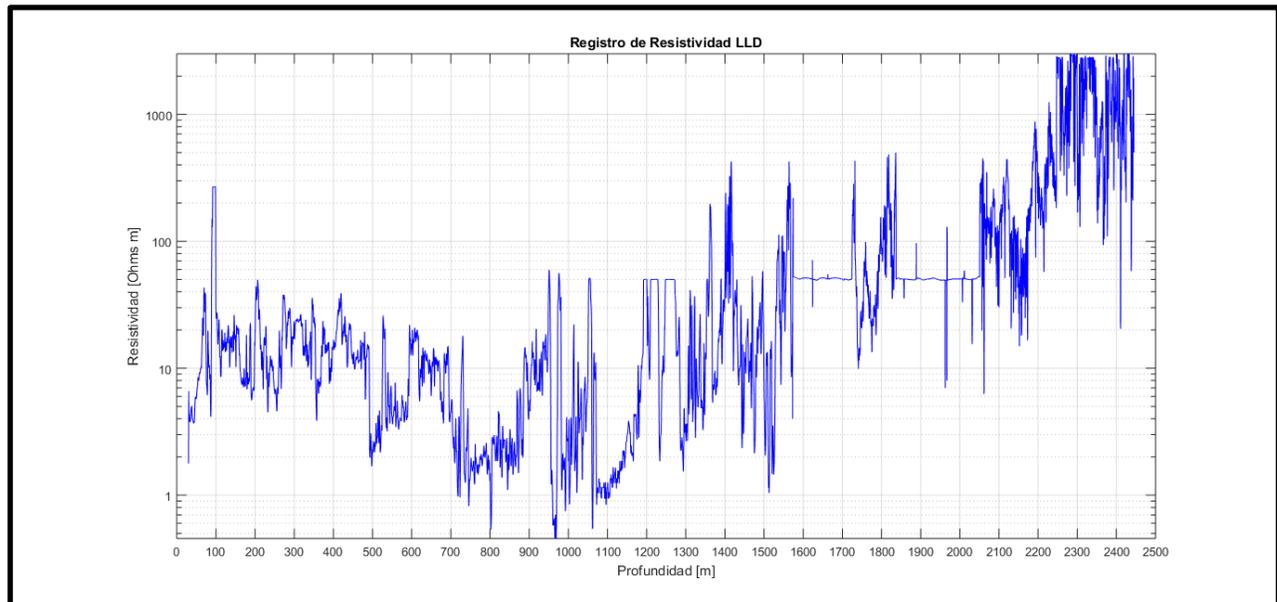


Figura 21. Registro crudo de Resistividad del Pozo Mixhuca-1.

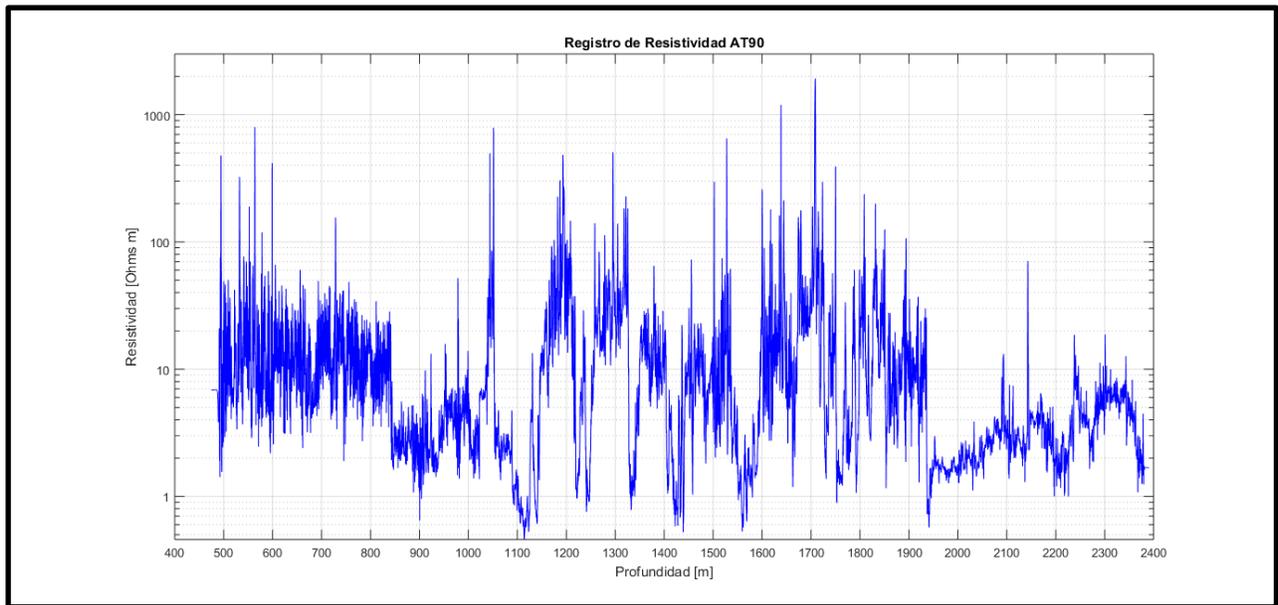


Figura 22. Registro crudo de Resistividad del Pozo Mirador 2.

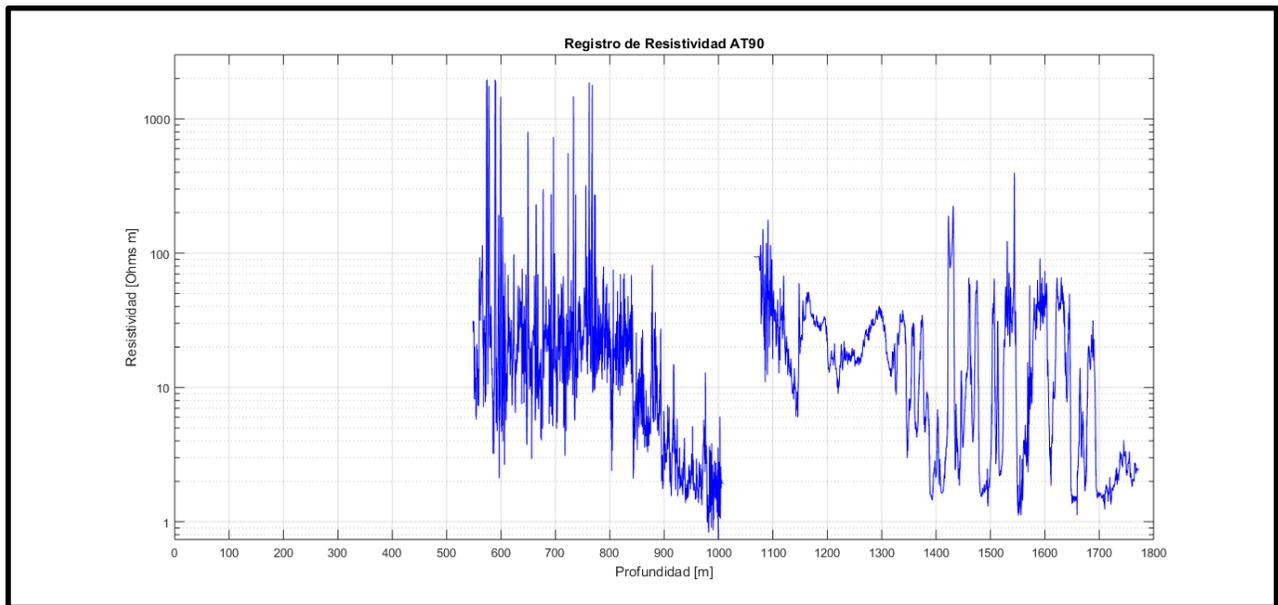


Figura 23. Registro crudo de Resistividad del Pozo Santa Catarina.

3.4 Filtrado y Zonificación de registros

Para los pozos Mirador 2 y Santa Catarina 3-A, los registros crudos se obtuvieron al unir distintas mediciones realizadas por tramos, con el fin de obtener un registro completo de cada pozo; en el pozo Santa Catarina

es donde se tiene un tramo de aproximadamente 90 metros (de 1009 a 1080 m de profundidad) donde no se tiene información de los registros. En donde coincidían las mediciones, se obtenía un promedio de éstas.

Una vez visualizados los registros crudos de cada uno de los pozos, se eliminaron los puntos fuera de tendencia y se procedió a filtrar cada uno con el objetivo de suavizar los registros y poder detectar zonas en cada uno. El filtro utilizado es el de media móvil con ventana de 59 datos, definida así también para no tener un margen de error alto. En las siguientes figuras, se muestra el registro filtrado obtenido, tanto de rayos gamma como de resistividad, y el error para cada uno de los pozos.

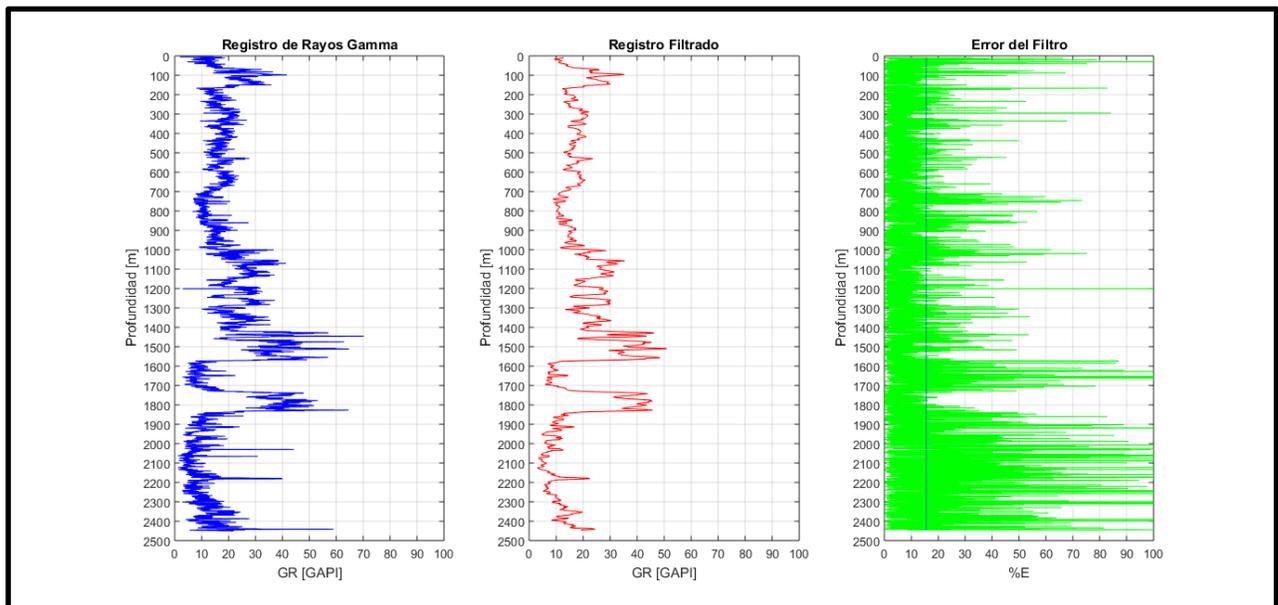


Figura 24. Registro de Rayos Gamma del Pozo Mixhuca-1. En la izquierda, los datos crudos del pozo; en el centro, el registro obtenido tras la aplicación de un filtro de media móvil (FMM); en la derecha, el porcentaje de error por cada uno de los valores obtenidos y el promedio de error.

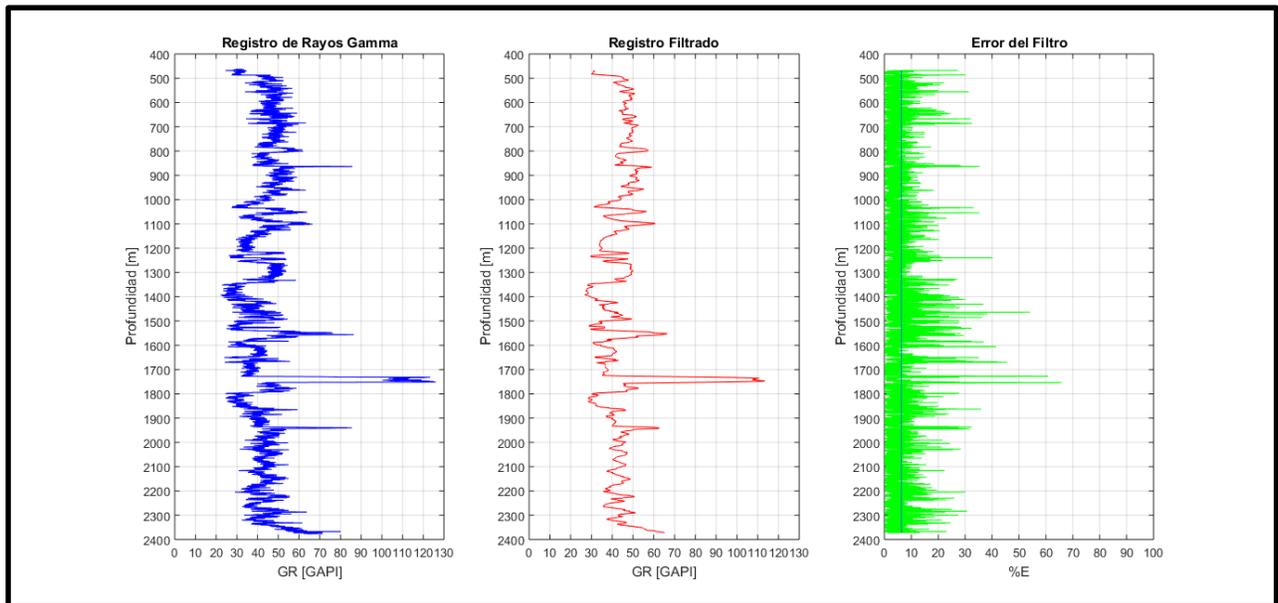


Figura 25. Registro de Rayos Gamma del Pozo Mirador 2. En la izquierda, los datos crudos del pozo; en el centro, el registro obtenido tras la aplicación de un filtro de media móvil (FMM); en la derecha, el porcentaje de error por cada uno de los valores obtenidos y el promedio de error.

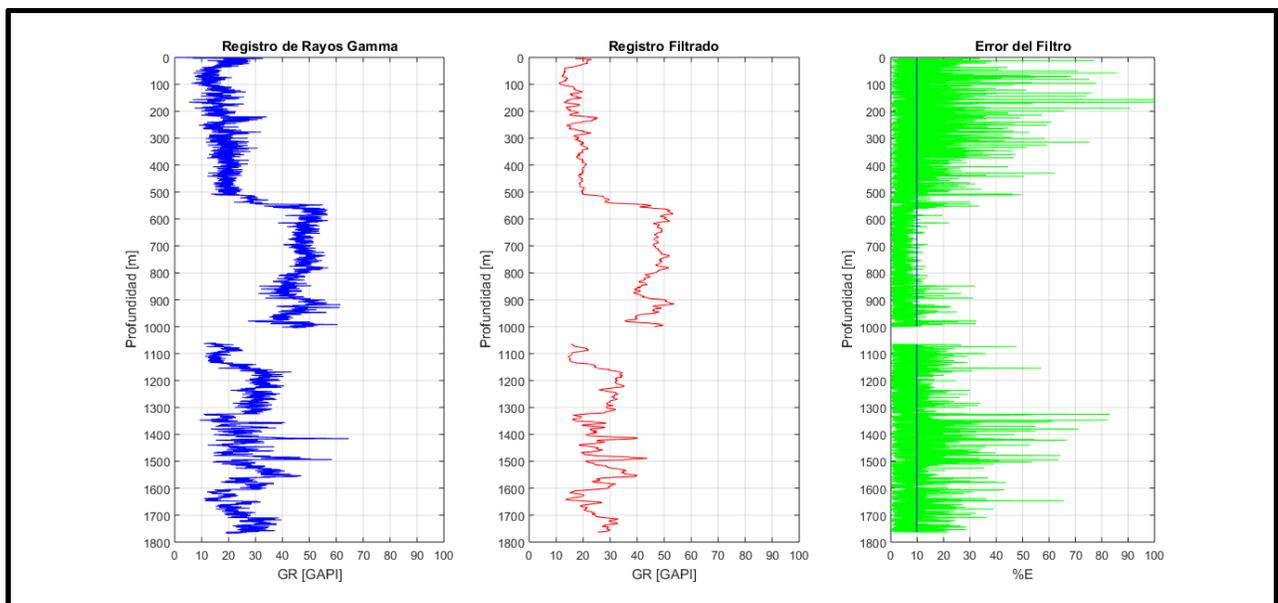


Figura 26. Registro de Rayos Gamma del Pozo Santa Catarina. En la izquierda, los datos crudos del pozo; en el centro, el registro obtenido tras la aplicación de un filtro de media móvil (FMM); en la derecha, el porcentaje de error por cada uno de los valores obtenidos y el promedio de error.

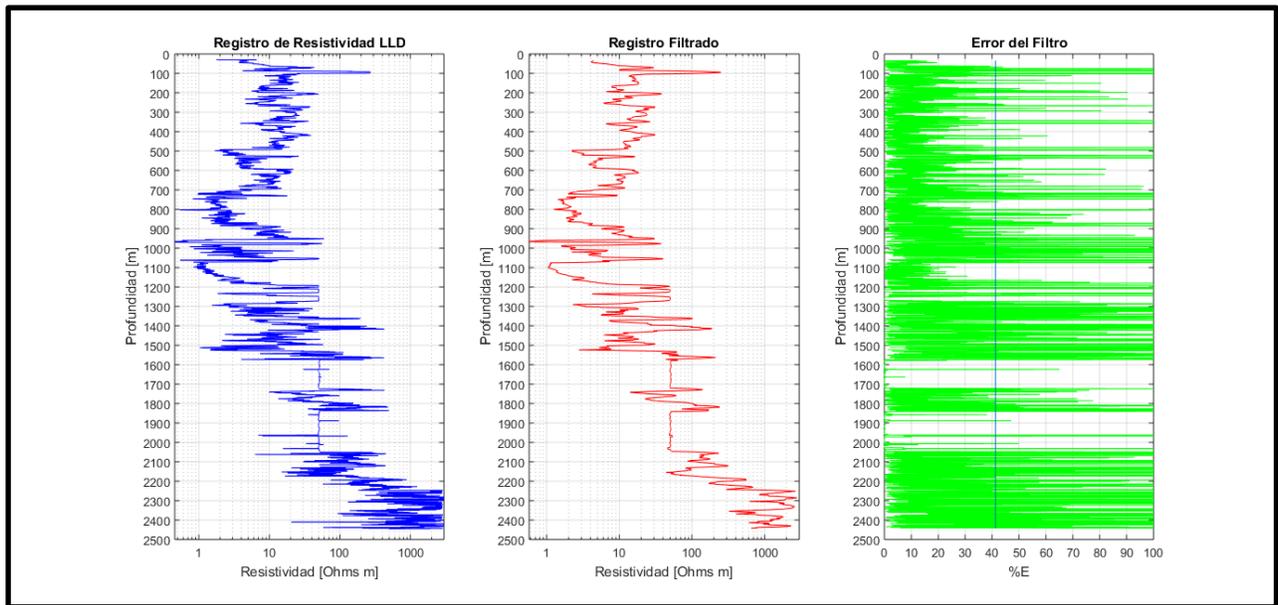


Figura 27. Registro de resistividad LLD del Pozo Mixhuca-1. En la izquierda, los datos crudos del pozo; en el centro, el registro obtenido tras la aplicación de un filtro de media móvil (FMM); en la derecha, el porcentaje de error por cada uno de los valores obtenidos y el promedio de error.

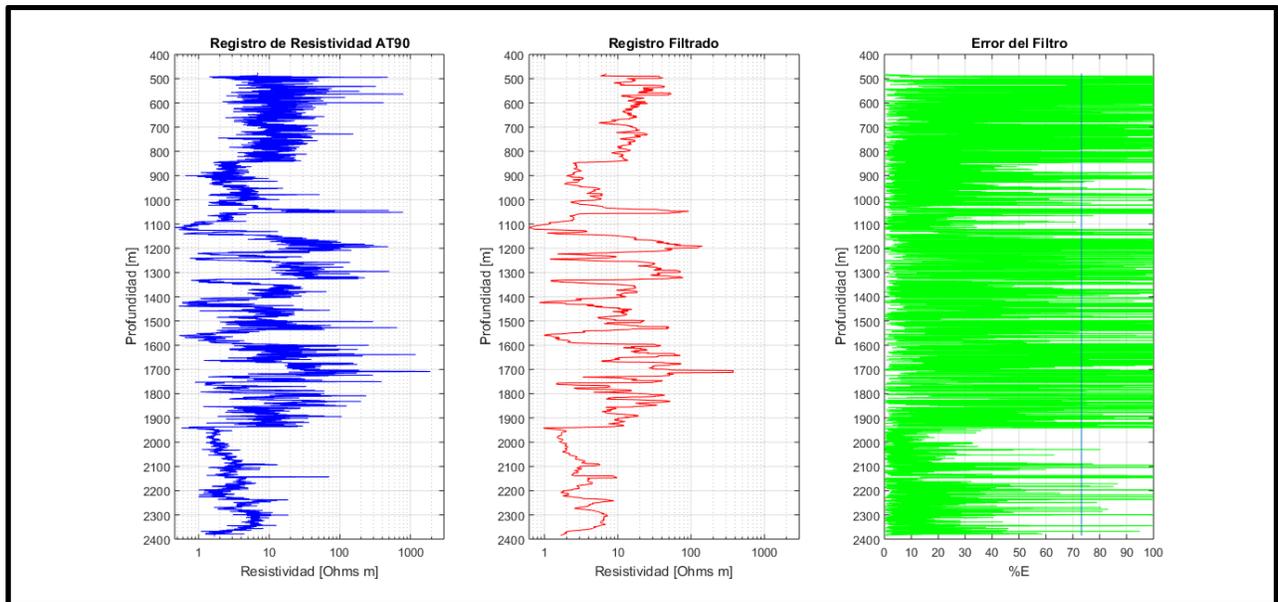


Figura 28. Registro de resistividad AT90 del Pozo Mirador 2. En la izquierda, los datos crudos del pozo; en el centro, el registro obtenido tras la aplicación de un filtro de media móvil (FMM); en la derecha, el porcentaje de error por cada uno de los valores obtenidos y el promedio de error.

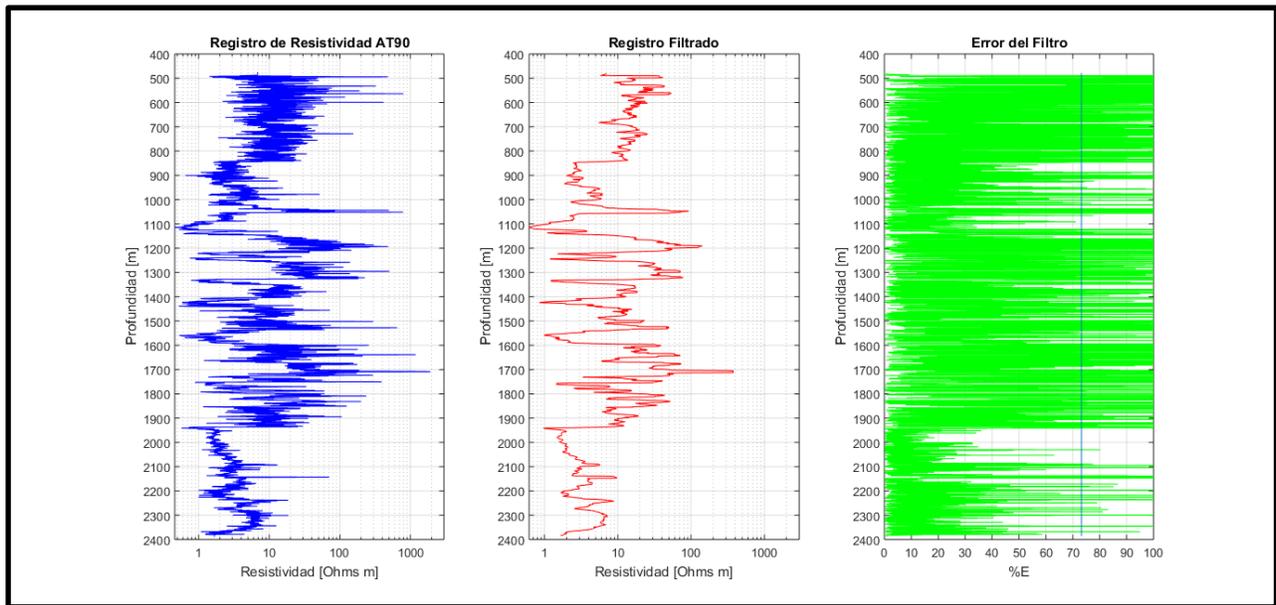


Figura 29. Registro de resistividad AT90 del Pozo Santa Catarina. En la izquierda, los datos crudos del pozo; en el centro, el registro obtenido tras la aplicación de un filtro de media móvil (FMM); en la derecha, el porcentaje de error por cada uno de los valores obtenidos y el promedio de error.

Después, se identificaron zonas de acuerdo al comportamiento de los registros en conjunto de cada uno de los pozos, obteniendo de cada zona tanto el promedio como la desviación estándar, con el fin de visualizar el margen de error. En la Tabla 8, se muestra la profundidad a la que se identifica cada zona en cada uno de los pozos y las zonas identificadas, a las que se les asignó una letra. Los resultados se muestran en las siguientes figuras.

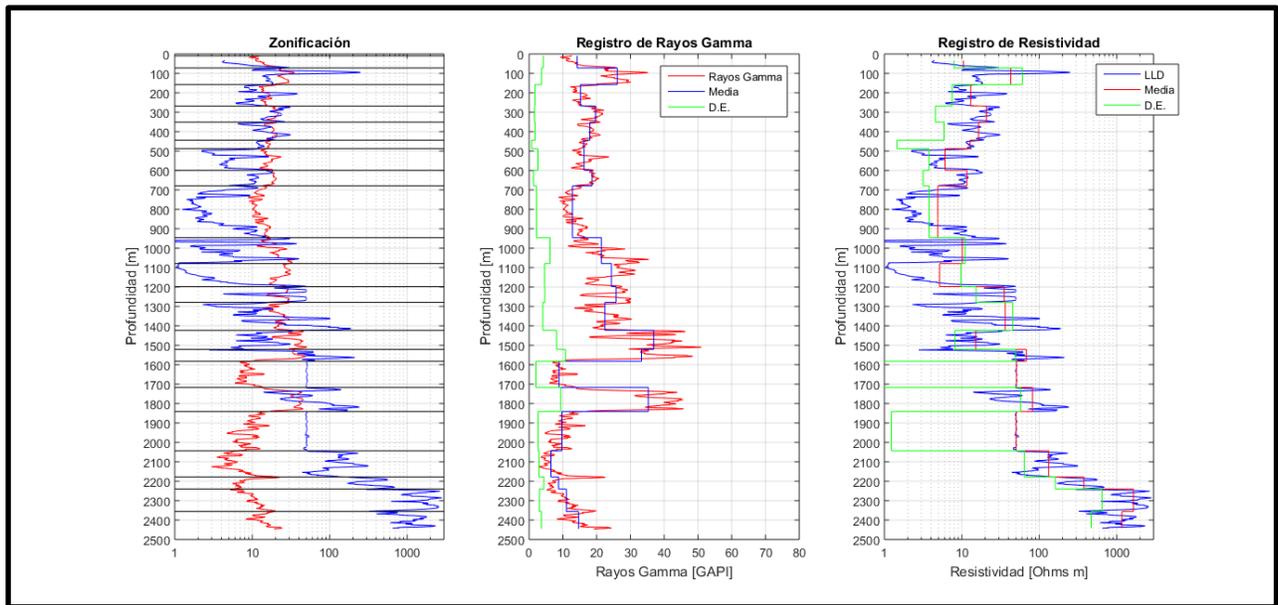


Figura 30. POZO MIXHUCA-1. En la primera gráfica (extrema izquierda), se muestran los registros tanto de rayos gamma (rojo) como de resistividad (azul) y la zonificación de éstos. En la segunda gráfica, el registro de rayos gamma con la media obtenida (azul) por cada una de las zonas identificadas y la desviación estándar (verde); en la tercera, el registro de resistividad con la media de cada zona identificada (rojo) y desviación estándar (verde).

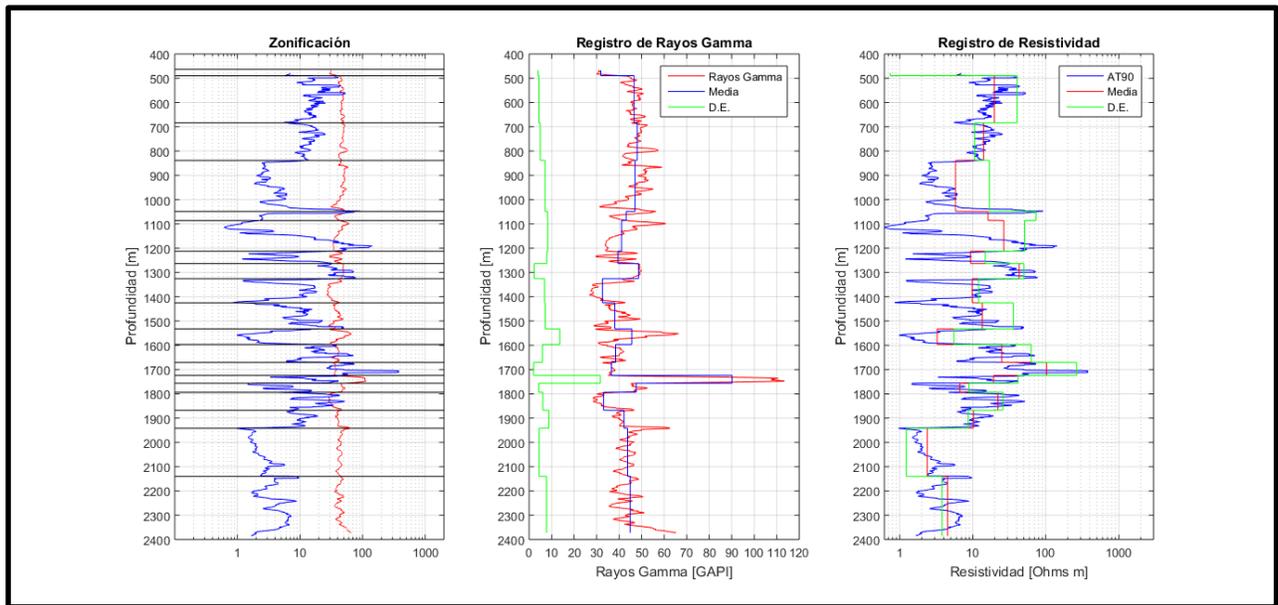


Figura 31. POZO MIRADOR 2. En la primera gráfica (extrema izquierda), se muestran los registros tanto de rayos gamma (rojo) como de resistividad (azul) y la zonificación de éstos. En la segunda gráfica, el registro de rayos gamma con la media obtenida (azul) por cada una de las zonas identificadas y la desviación estándar (verde); en la tercera, el registro de resistividad con la media de cada zona identificada (rojo) y desviación estándar (verde).

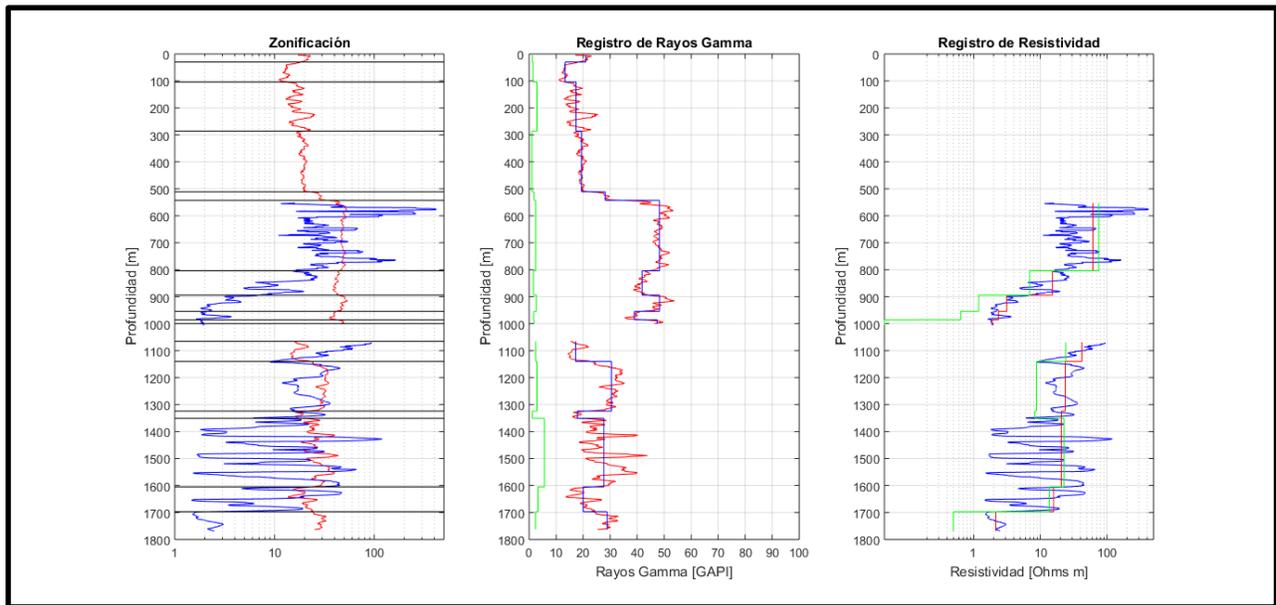


Figura 32. POZO SANTA CATARINA. En la primera gráfica (extrema izquierda), se muestran los registros tanto de rayos gamma (rojo) como de resistividad (azul) y la zonificación de éstos. En la segunda gráfica, el registro de rayos gamma con la media obtenida (azul) por cada una de las zonas identificadas y la desviación estándar (verde); en la tercera, el registro de resistividad con la media de cada zona identificada (rojo) y desviación estándar (verde).

En la siguiente tabla (Tabla 7), se simplifica la información de cada una de las zonas identificadas en los registros de cada pozo, como la profundidad a la que se encuentran, la media, la desviación estándar y el número de zonas, la cual servirá para correlacionar cuantitativamente los registros.

Tabla 7. Valores estadísticos de cada una de las zonas identificadas en los registros de los pozos de estudio.

MIXHUCA-1						
Zona	Rayos Gamma			Resistividad LLD		
	Intervalo de profundidad [m]	Media [GAPI]	Desviación estándar [GAPI]	Intervalo de profundidad [m]	Media [Ω m]	Desviación estándar [Ω m]
A	9.5 - 72.0	14.1958	4.2132	34.4 - 72.0	10.5020	7.9373
B	72.0 - 157.7	26.0816	3.6578	72.0 - 157.7	42.9079	60.8157
C	157.7 - 268.2	15.1977	1.7445	157.7 - 268.2	13.0019	7.4954
D	268.2 - 351.2	19.7045	1.6042	268.2 - 351.2	20.7659	4.5546

E	351.2 - 443.9	17.9886	1.8060	351.2 - 443.9	16.520	5.9164
F	443.9 - 487.5	16.1625	0.7391	443.9 - 487.5	12.7662	1.4485
G	487.5 - 599.2	16.2769	2.5883	487.5 - 599.2	6.0841	3.7723
H	599.2 - 679.1	18.6266	1.3405	599.2 - 679.1	11.6347	3.1612
I	679.1 - 946.1	12.8451	2.1971	679.1 - 946.1	4.9065	3.7897
J	946.1 - 1079.4	21.4127	6.1824	946.1 - 1079.4	10.1365	11.0247
K	1079.4 - 1197.9	24.3809	4.5746	1079.4 - 1197.9	5.1714	9.7477
L	1197.9 - 1279.3	25.7457	4.6455	1197.9 - 1279.3	35.2581	15.3018
M	1279.3 - 1422.9	22.4160	4.0883	1279.3 - 1422.9	36.3715	45.5144
N	1422.9 - 1521.2	36.9201	8.1547	1422.9 - 1521.2	15.1491	8.1431
U	1521.2 - 1582.1	33.2910	10.7372	1521.2 - 1582.1	68.1146	49.6333
P	1582.1 - 1717.5	8.8555	2.0098	1582.1 - 1717.5	50.7905	0.6104
Q	1717.5 - 1841.2	35.3153	9.3329	1717.5 - 1841.2	81.7872	57.4668
R	1841.2 - 2043.3	9.6771	2.6793	1841.2 - 2043.3	50.2334	1.2340
S	2043.3 - 2177.9	6.4235	2.9216	2043.3 - 2177.9	132.5385	64.0971
T	2177.9 - 2239.9	8.7212	4.3930	2177.9 - 2239.9	376.6271	161.5458
U	2239.9 - 2355.9	11.0120	3.0460	2239.9 - 2355.9	1643.284	646.0880
V	2355.9 - 2445.5	14.6080	3.6347	2355.9 - 2445.5	1168.493	468.9172

MIRADOR 2

Zona	Rayos Gamma			Resistividad LLD		
	Intervalo de profundidad [m]	Media [GAPI]	Desviación estándar [GAPI]	Intervalo de profundidad [m]	Media [Ω m]	Desviación estándar [Ω m]
A	467.5 - 489.8	31.8308	3.9679	478.9 - 489.8	6.5878	0.7425
B	489.8 - 683.8	46.6176	4.3372	489.8 - 683.8	19.8097	40.5407
C	683.8 - 838.3	48.0527	4.9330	683.8 - 838.3	14.0952	10.6049
D	838.3 - 1048.5	47.0446	7.0676	838.3 - 1048.5	5.8197	16.9827
E	1048.5 - 1086	43.1559	8.1976	1048.5 - 1086	16.2070	73.8383
F	1086 - 1212.4	41.1144	8.2633	1086 - 1212.4	26.6398	51.4667
G	1212.4 - 1263.2	39.4516	7.8372	1212.4 - 1263.2	9.3246	14.8171
H	1263.2 - 1325.5	48.6352	2.3266	1263.2 - 1325.5	43.3183	50.3063
I	1325.5 - 1425.0	32.5875	6.8824	1325.5 - 1425.0	9.8628	12.0621
J	1425.0 - 1532.5	38.0880	7.2040	1425.0 - 1532.5	13.5541	36.0931
K	1532.5 - 1596.6	45.6275	13.6517	1532.5 - 1596.6	3.2497	5.5285
L	1596.6 - 1670.7	38.4250	5.8984	1596.6 - 1670.7	24.9672	63.3978
M	1670.7 - 1724.4	36.5988	1.9947	1670.7 - 1724.4	102.8437	265.5522
N	1724.4 - 1756.2	90.1800	31.6232	1724.4 - 1756.2	19.2540	41.8281

U	1756.2 - 1793.5	47.5902	4.2136	1756.2 - 1793.5	6.6324	8.8569
P	1793.5 - 1867.5	33.0424	6.1311	1793.5 - 1867.5	22.1719	26.0072
Q	1867.5 - 1941.7	42.1961	8.7348	1867.5 - 1941.7	10.2245	8.6759
R	1941.7 - 2140	43.7656	4.4186	1941.7 - 2140	2.3892	1.2340
S	2140 - 2372.5	44.8850	7.7642	2140 - 2372.5	4.5175	3.7905

SANTA CATARINA 3-A

Zona	Rayos Gamma			Resistividad LLD		
	Intervalo de profundidad [m]	Media [GAPI]	Desviación estándar [GAPI]	Intervalo de profundidad [m]	Media [Ω m]	Desviación estándar [Ω m]
A	4.4 - 30.0	20.9636	1.2179	-	-	-
B	30.0 - 104.0	13.3231	1.4382	-	-	-
C	104.0 - 286.0	17.3796	2.9330	-	-	-
D	286.0 - 511.1	19.3932	1.0222	-	-	-
E	511.1 - 542.5	28.1831	1.8133	-	-	-
F	542.5 - 804.0	48.2250	2.4469	552.7 - 804.0	61.5502	75.2099
G	804.0 - 894.1	41.8166	1.6095	804.0 - 894.1	15.1946	6.9146
H	894.1 - 954.6	48.2919	2.7158	894.1 - 954.6	3.1404	1.1939
I	954.6 - 985.5	38.9632	1.6958	954.6 - 985.5	2.3517	0.6415
J	985.5 - 999.8	47.3724	1.8595	985.5 - 1005.0	1.8836	0.0459
K	1065.2 - 1140.1	17.2060	2.4358	1069.2 - 1140.1	42.0983	24.0339
L	1140.1 - 1324.0	30.5196	2.9143	1140.1 - 1324.0	23.6958	8.7476
M	1324.0 - 1351.0	17.8379	1.2024	1324.0 - 1351.0	20.8465	8.2730
N	1351.0 - 1605.0	27.6753	5.7056	1351.0 - 1605.0	20.7521	22.6772
O	1605.0 - 1697.1	20.0509	3.2705	1605.0 - 1697.1	15.8421	13.7027
P	1697.1 - 1762.6	28.9140	2.3921	1697.1 - 1769.0	2.1449	0.4973

Capítulo 4. Correlación geológica de los registros

Una vez que se obtuvieron los resultados de la zonificación de cada registro de los pozos, se correlacionaron los resultados de los tres pozos de estudio, cualitativamente, es decir, de acuerdo a la forma del registro. Los resultados obtenidos son los siguientes (Figura 33 y Figura 34).

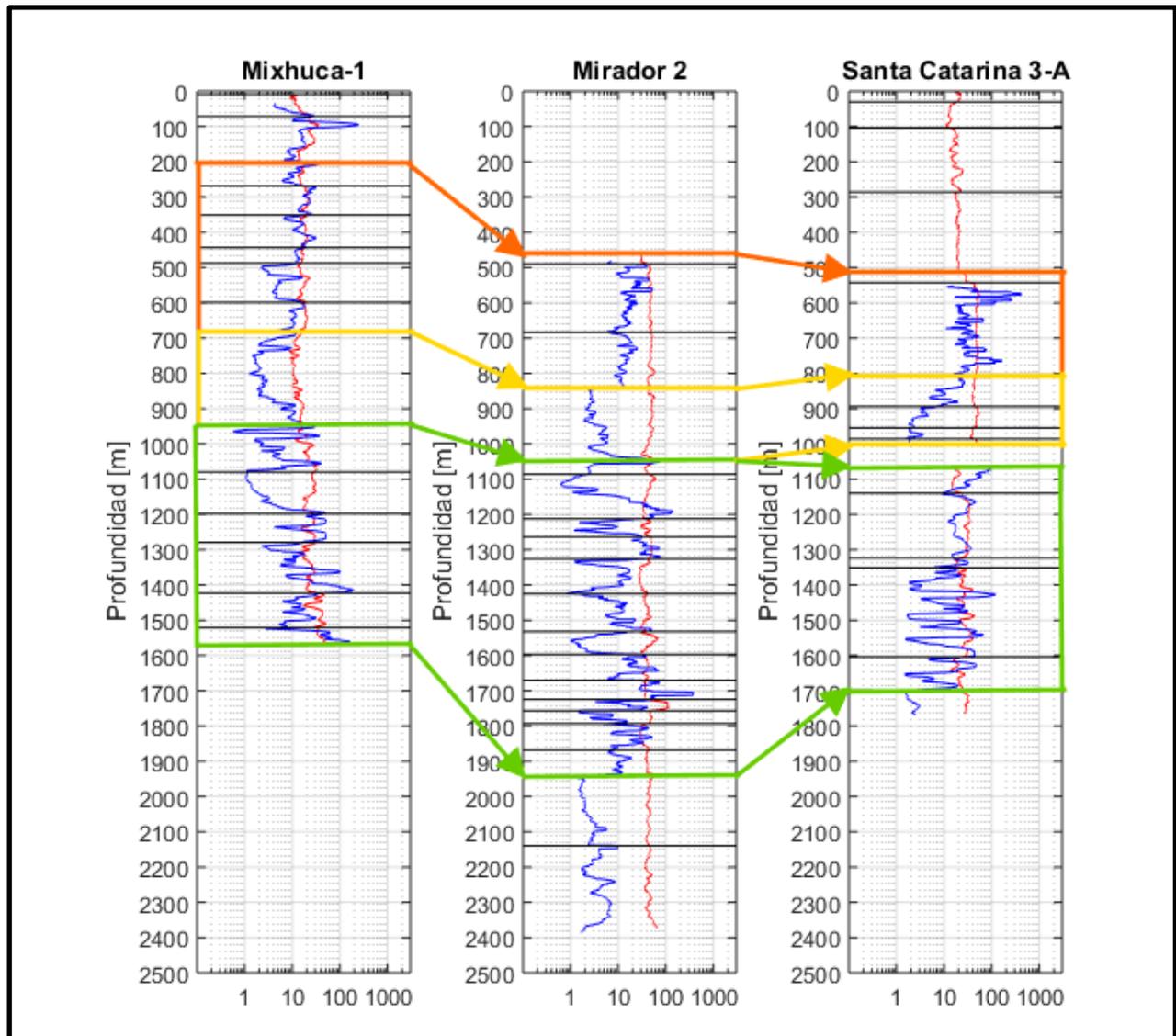


Figura 33. Correlación cualitativa de los registros de Rayos Gamma y Resistividad de cada uno de los pozos de estudio.

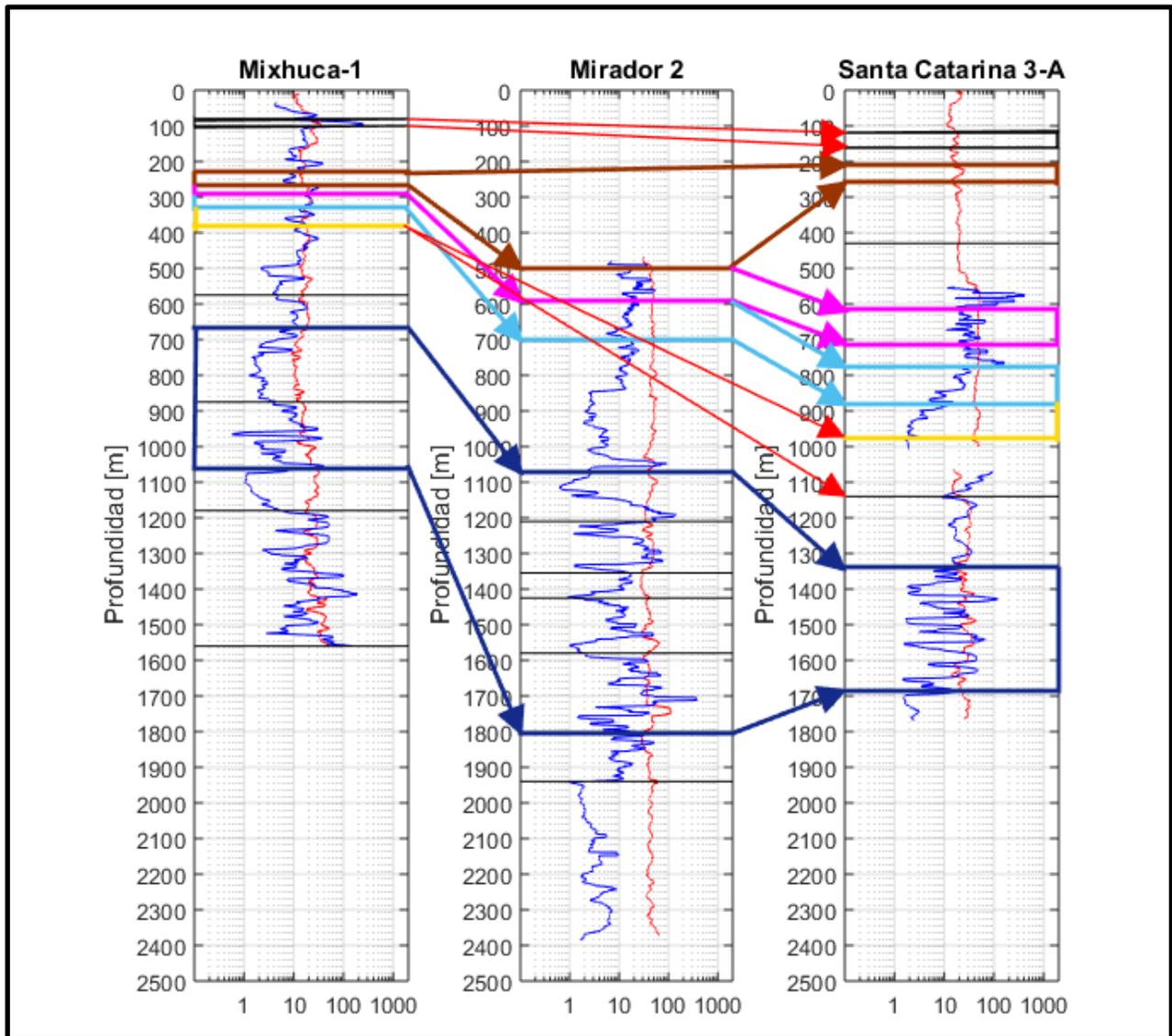


Figura 34. Correlación de los registros de Rayos Gamma y Resistividad de cada uno de los pozos de estudio, basada en la litología de los pozos Mixhuca-1 y Santa Catarina. El color negro representa a basaltos, marrón a conglomerados, rosa a andesitas, azul claro a tobas, amarillo a areniscas y azul marino a intercalación de tobas con basalto. Las flechas en rojo representan la correlación entre el pozo Mixhuca-1 y Santa Catarina 3-A, no se encontró correlación con el pozo Mirador 2.

Para identificar el tipo de roca volcánica existente en cada uno de los pozos de estudio, se realizaron los gráficos de Resistividad contra Rayos Gamma, basado en el trabajo de Santiago (2018) respecto al pozo Santa Catarina, además de la planteada por Arroyo y Mooser (Santiago, 2018) mostrada en la Figura 35, basada en el trabajo de Zou (2013) (Figura 36), realizado en rocas volcánicas en una región de China con diferentes condiciones que las que se tienen en la zona de estudio. Zou (2013) establece que, para predecir cualitativamente las reservas volcánicas, se debe basar en la clasificación de litofacies.

La serie de datos que se utilizó fue la de resistividad (AT90 para los pozos Mirador 2 y Santa Catarina, LLD para el pozo Mixhuca-1) y la de Rayos Gamma Naturales. No fue aplicada ninguna corrección a los datos de los pozos de estudio debido a que no se cuenta con información sobre las condiciones del tipo de lodo y de los arreglos geométricos de los electrodos utilizados para la obtención del registro de resistividad.

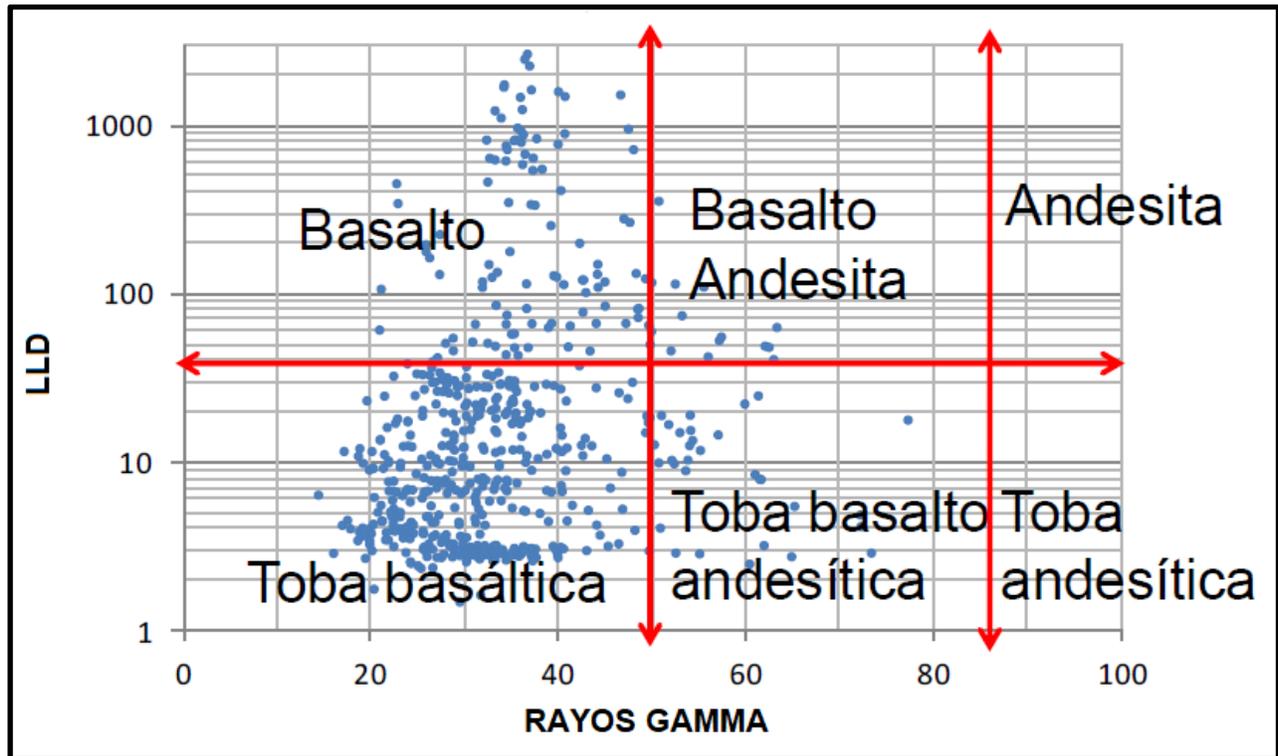


Figura 35. Gráfica cruzada de LLD vs. GR, planteada por Arroyo y Mooser para identificación de rocas volcánicas (Tomada de Santiago, 2018).

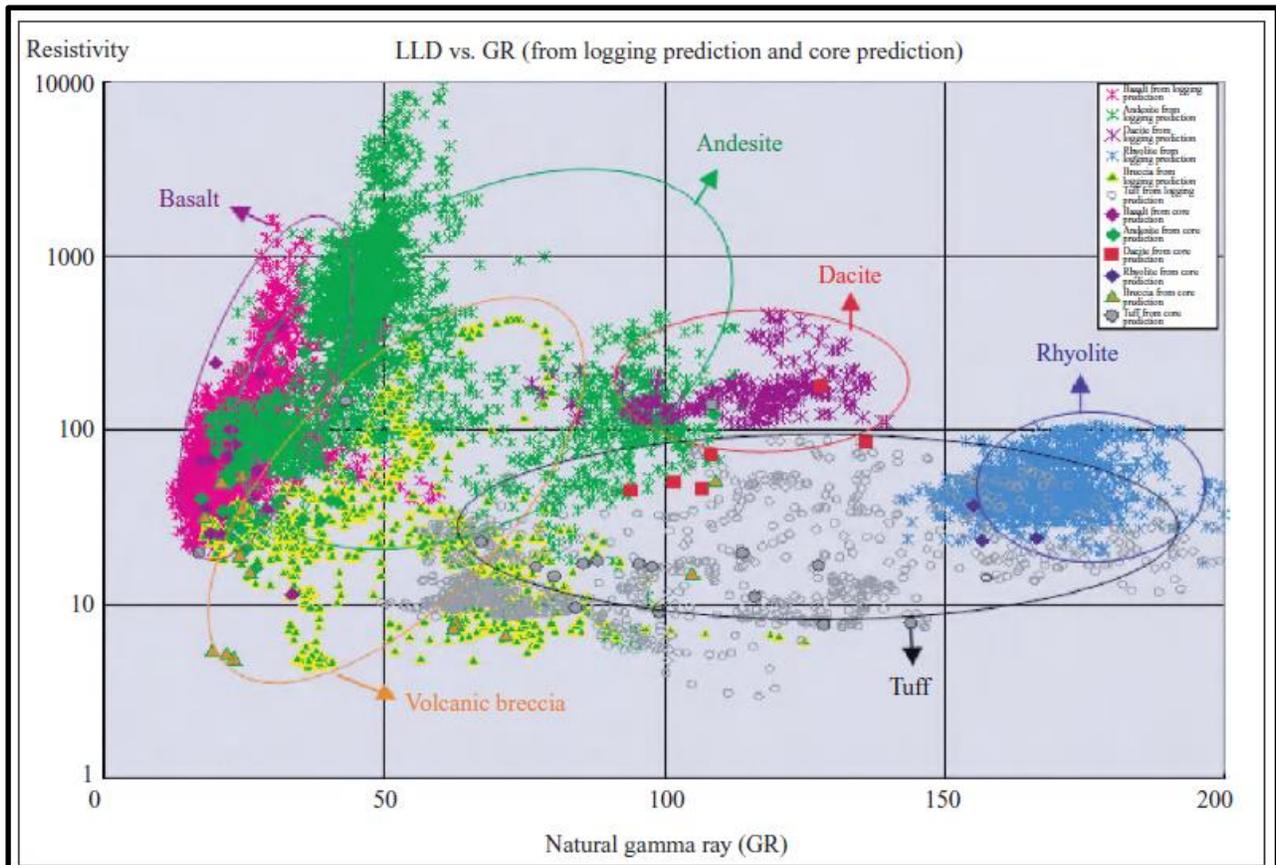


Figura 36. Gráfico de LLD vs. GR, planteado por Zou para identificación de rocas volcánicas (Tomada de Zou, 2013).

Primero, se hizo el análisis en cada uno de los intervalos correlacionados cualitativamente (Figura 33) con el propósito de comparar la correlación realizada con las gráficas cruzadas de dichos tramos y verificar si en cada pozo los resultados eran similares. El resultado se puede observar en la Figura 37, donde se puede ver que la distribución es semejante entre cada pozo, resaltando que sólo hay un pequeño desplazamiento en la del pozo Mixhuca-1, en los tramos A y B, que puede deberse al tipo de herramienta y al tipo de lodo emulsionado que se utilizó en el pozo.

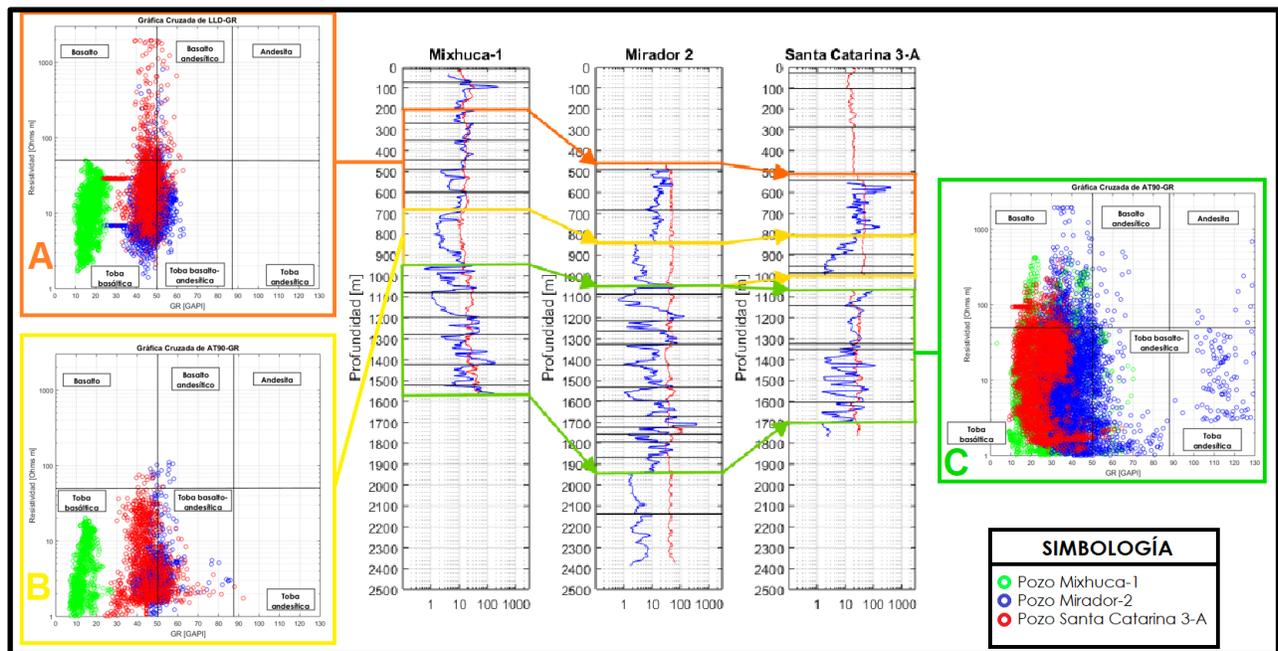


Figura 37. Comparación entre la correlación de los registros de Rayos Gamma y Resistividad de cada uno de los pozos de estudio y las gráficas cruzadas correspondientes a cada uno de los tramos identificados de la Figura 33: A, B y C.

También se puede observar que en el tramo A las litologías presentes son basaltos y tobas, predominando las tobas basálticas, mientras que en el tramo B predominan las tobas (basálticas y basalto-andesíticas), tramo que va de 700 a 1080 m, aproximadamente. En el tramo C, varía la litología y abarca las seis propuestas por Zou (2013), predominando las tobas basálticas.

Después, el análisis fue hecho para cada pozo y por intervalos, ya que se utiliza la información de Rayos Gamma Naturales, no de los calculados ni de los obtenidos tras la aplicación del filtro. Los resultados obtenidos para cada uno de los pozos son los siguientes:

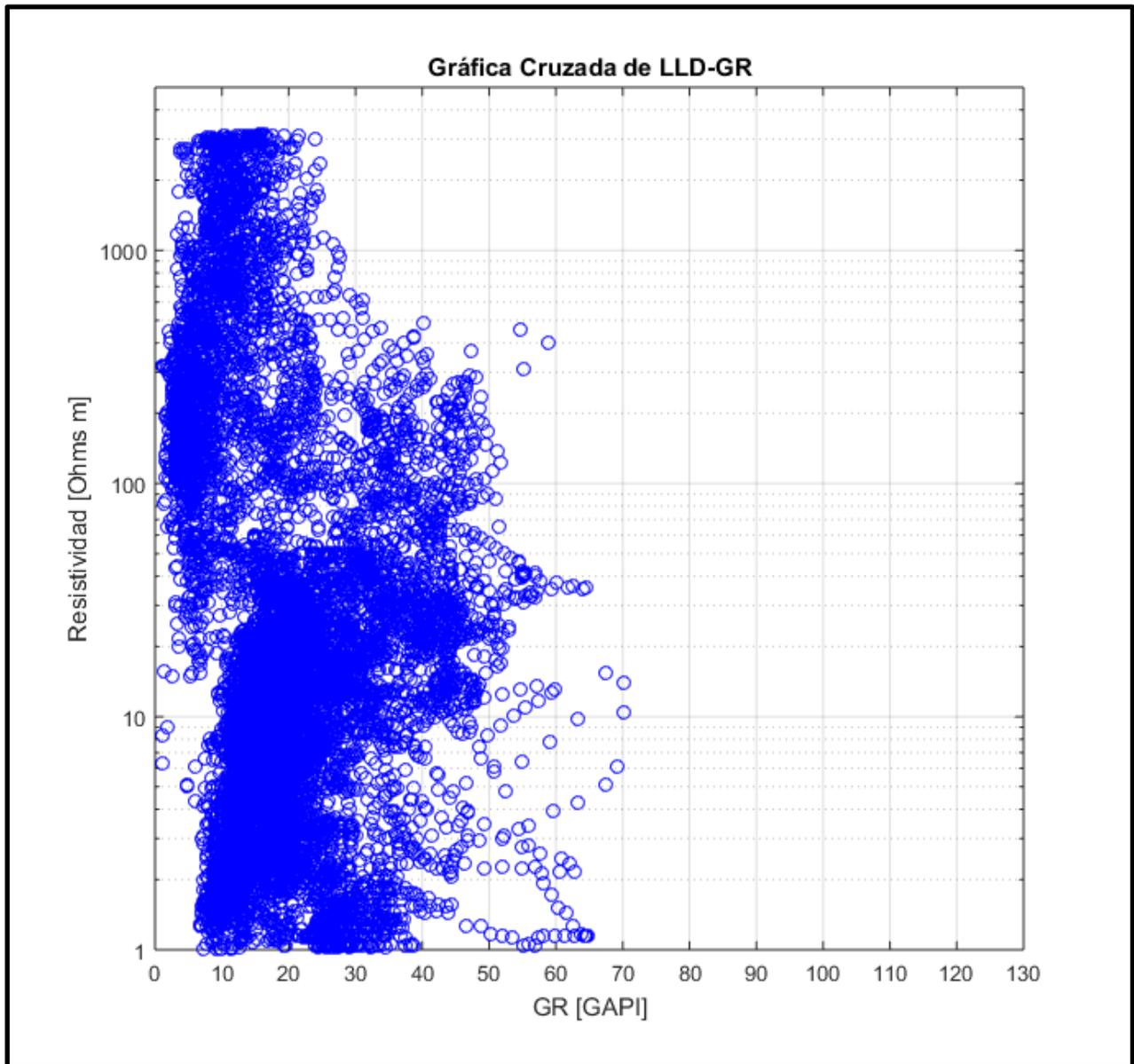


Figura 38. Gráfica cruzada LLD vs GR del pozo Mixhuca-1, correspondiente a la profundidad de 30 a 2446 metros.

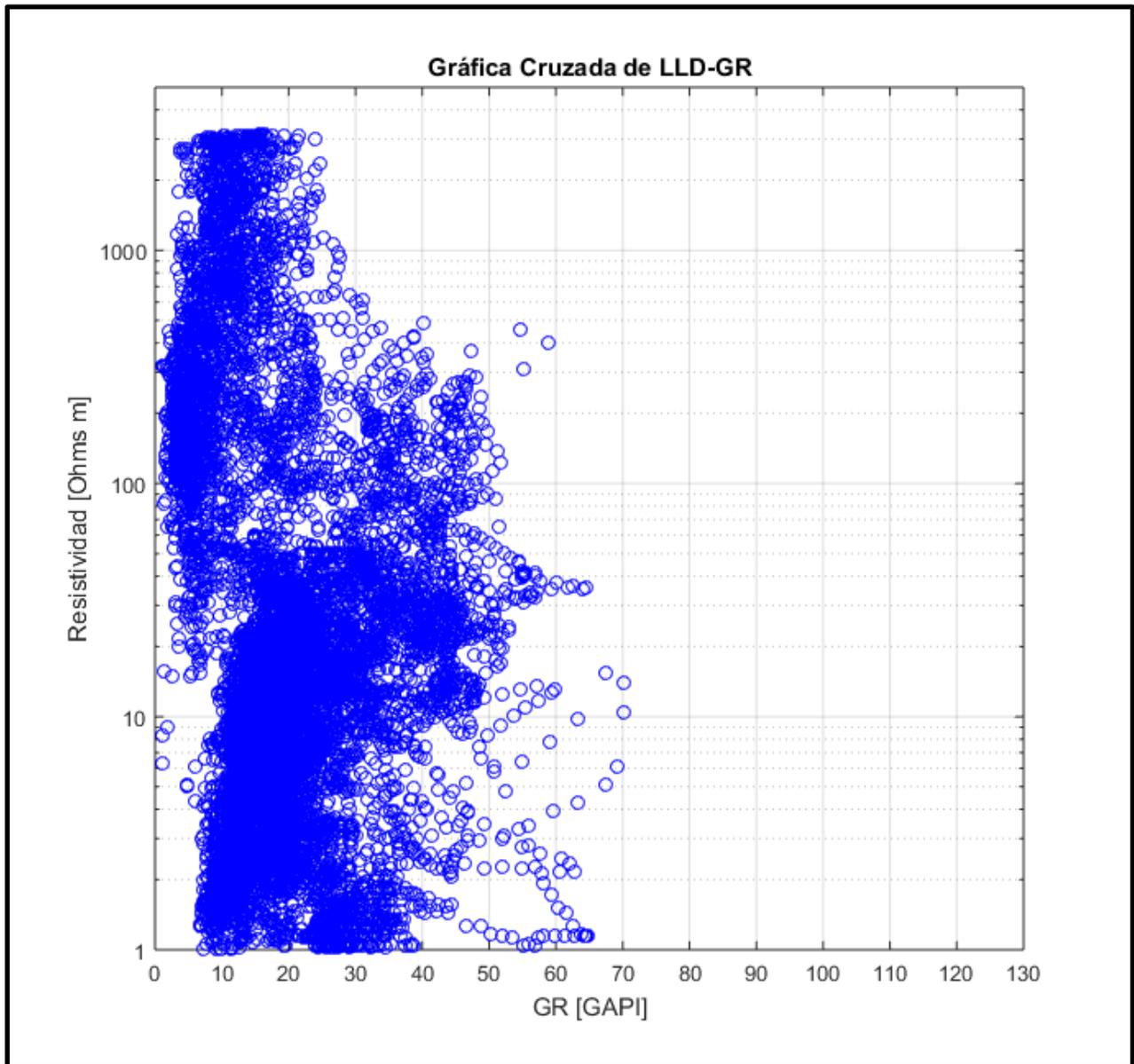


Figura 39. Gráfico AT90 vs GR del pozo Mirador 2, correspondiente a la profundidad de 463-2390 metros.

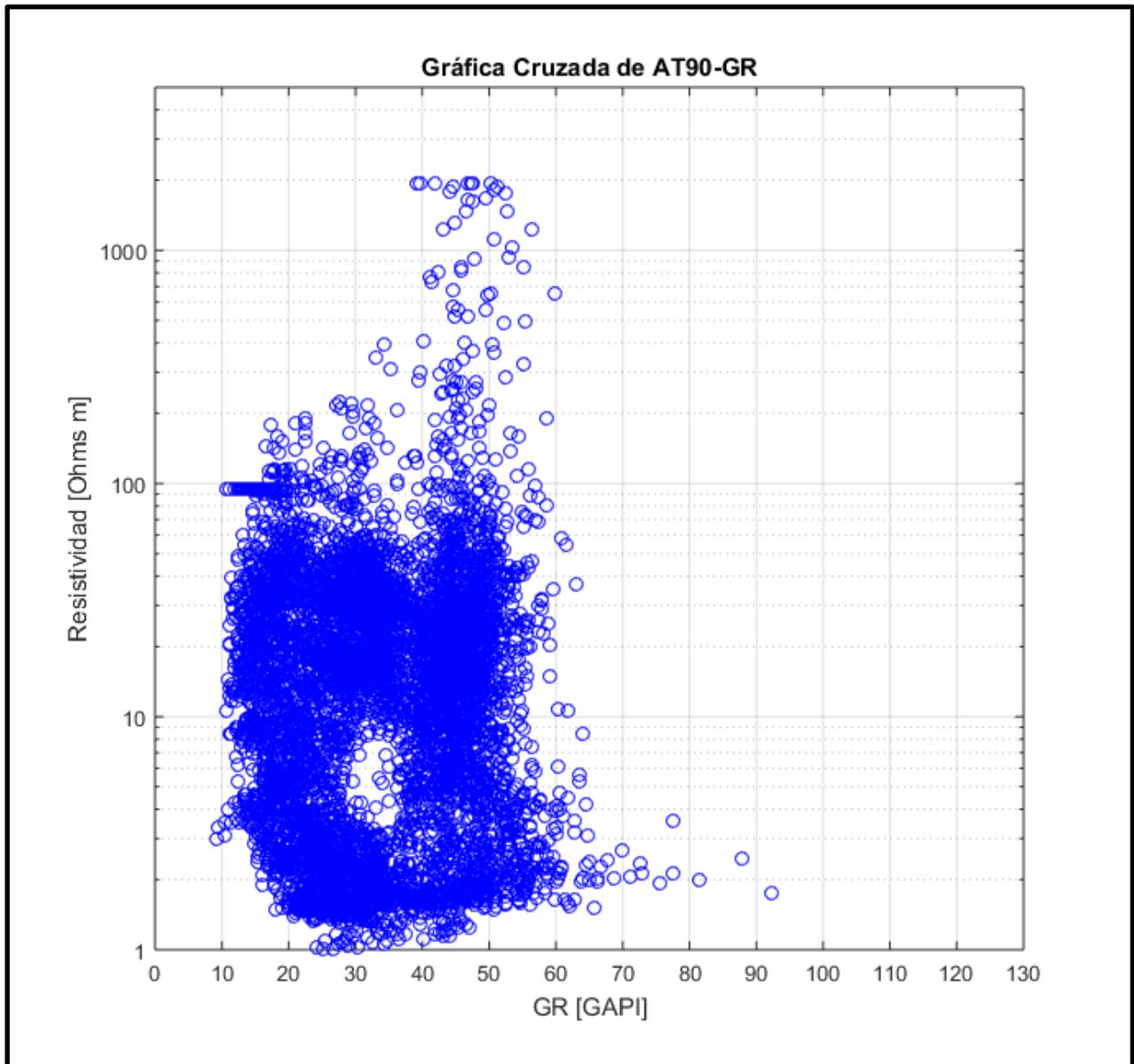


Figura 40. Gráfico AT90 vs GR del pozo Santa Catarina, correspondiente a la profundidad de 529-1773 metros.

Después, se analizó cada uno de los gráficos obtenidos, utilizando el criterio de Arroyo y Mooser, que consiste en separar por zonas (seis zonas) al gráfico que se tiene. La simbología utilizada se muestra en la Tabla 8, y fue definida de acuerdo a lo propuesto por los autores.

Tabla 8. Simbología del método utilizado para clasificar las rocas volcánicas presentes en los pozos de estudio.

Simbología	Tipo de Roca	Valores de Resistividad [Ωm]	Valores de Rayos Gamma [GAPI]
1	Basalto	>50	0-50
2	Basalto Andesítico	>50	50-87
3	Andesita	>50	>87
4	Toba Basáltica	<50	0-50
5	Toba Basalto-Andesítica	<50	50-87
6	Toba Andesítica	<50	>87

De acuerdo con la clasificación de Arroyo y Mooser, las rocas volcánicas predominantes a lo largo del pozo Mixhuca-1, en el tramo de 30 a 2446 metros de profundidad, son principalmente tobas basálticas, seguidas de basaltos; con menor frecuencia, se tienen tobas basalto-andesíticas y, por último, basaltos andesíticos (Figura 41).

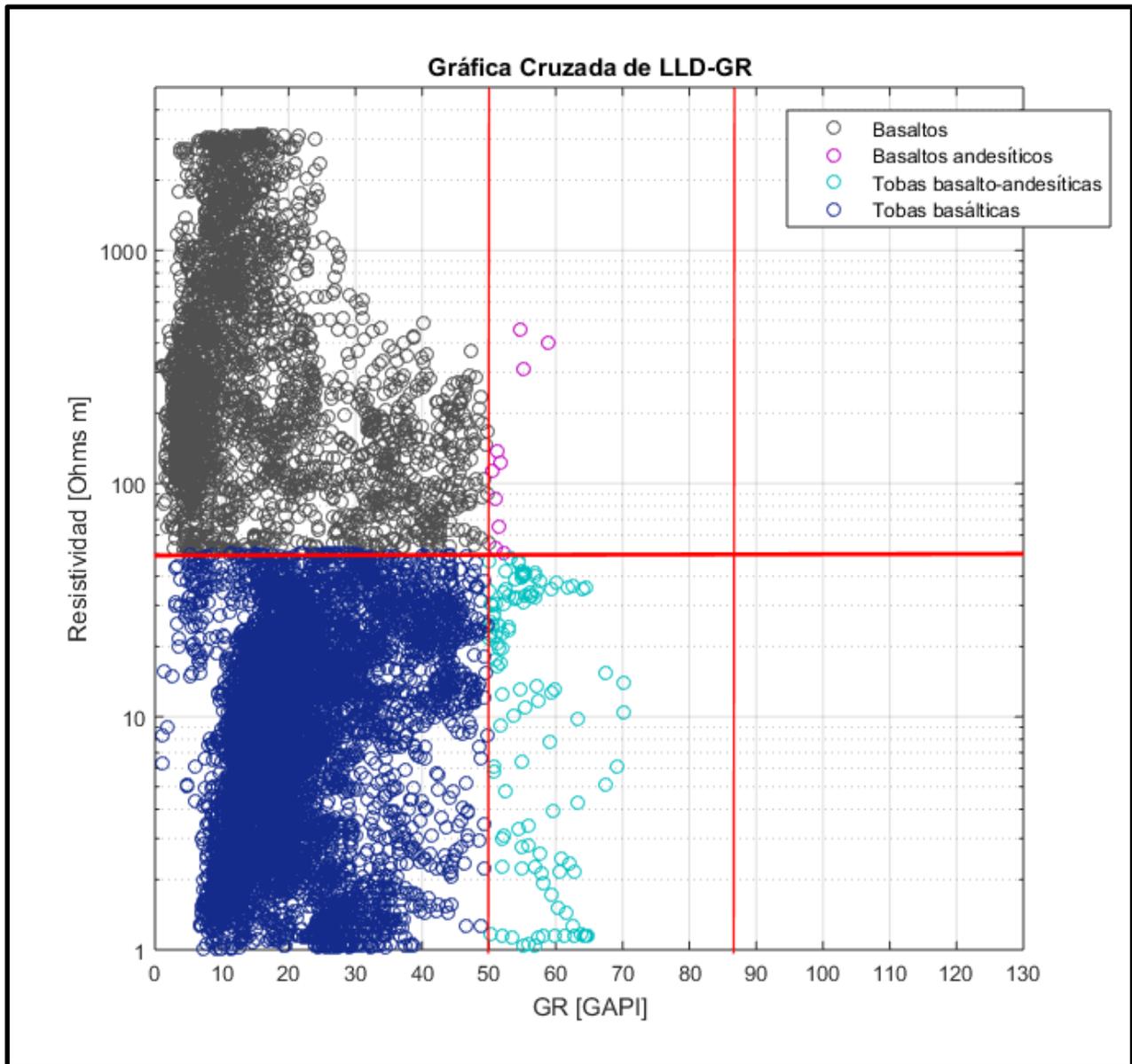


Figura 41. Análisis de la gráfica cruzada correspondiente al pozo Mixhuca-1 (30-2446 metros), usando el método de Arroyo y Mooser (Santiago, 2018).

Al clasificar la gráfica cruzada obtenida del pozo Mirador 2, a lo largo de los tres tramos donde se tienen registros de Rayos Gamma Naturales, se obtuvo la Figura 42. Se puede observar que predominan las tobas basálticas y las tobas basalto—andesíticas, seguidas de basaltos y tobas andesíticas, finalmente, basaltos andesíticos y andesitas.

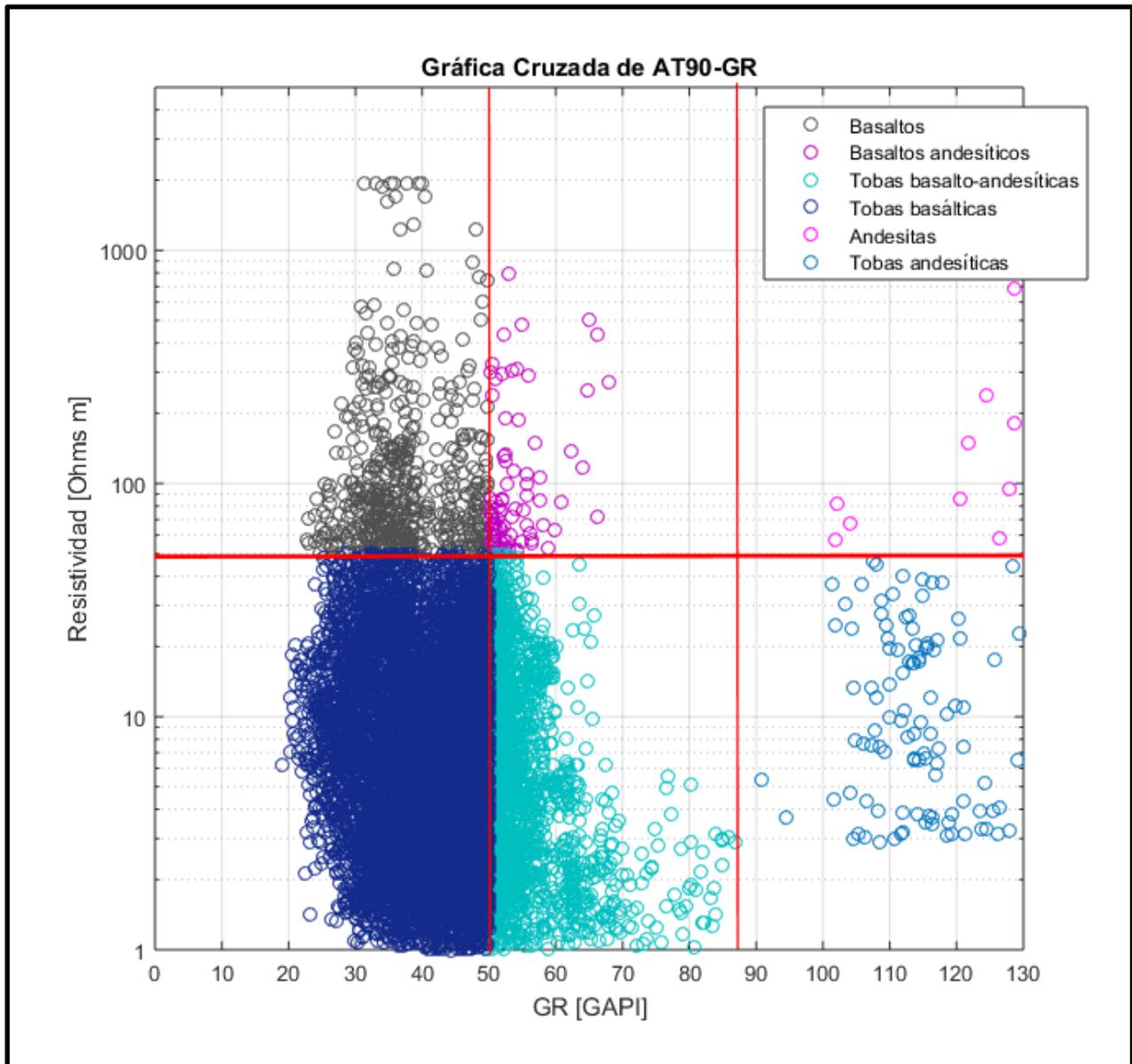


Figura 42. Análisis de la gráfica cruzada correspondiente al pozo Mirador 2 (463-2390 metros), usando el método de Arroyo y Mooser (Santiago, 2018).

En la gráfica cruzada obtenida con los datos tomados en el pozo Santa Catarina 3-A, en el tramo de 510 a 1009 metros (Figura 43), se observa que predominan las tobas basálticas, después las tobas basalto—andesíticas, seguidas de basaltos andesíticos, luego se tienen basaltos y finalmente, en menor cantidad, tobas andesíticas.

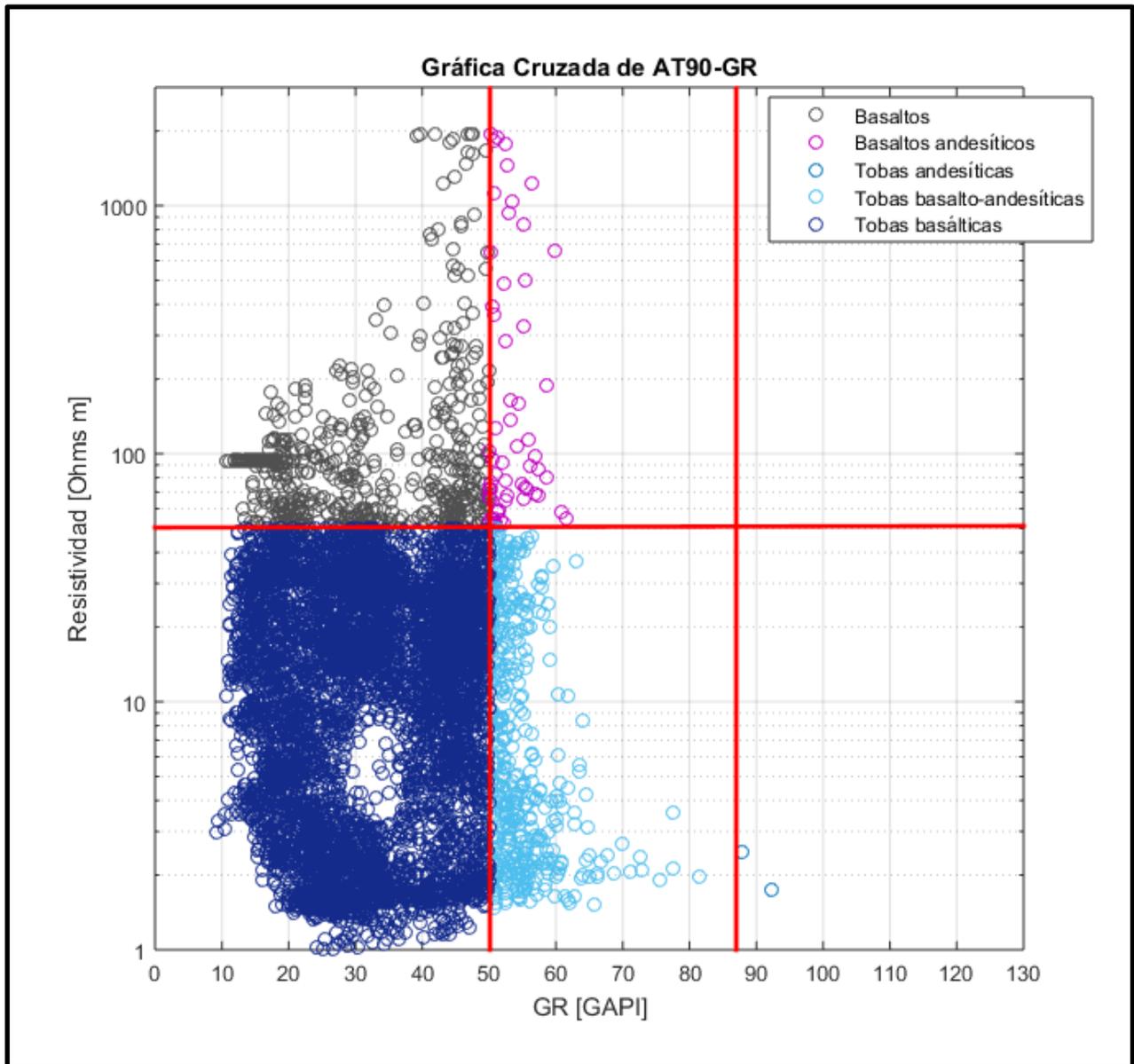


Figura 43. Análisis de la gráfica cruzada correspondiente al pozo Santa Catarina, en el tramo de 529 a 1773 metros, usando el método de Arroyo y Mooser (Santiago, 2018).

Una vez clasificados cada uno de los valores obtenidos en los pozos de estudio, se identificaron seis tipos de roca y se les fue asignado un valor con el fin de obtener un registro representativo de la litología de cada uno de los pozos, mostradas a continuación:

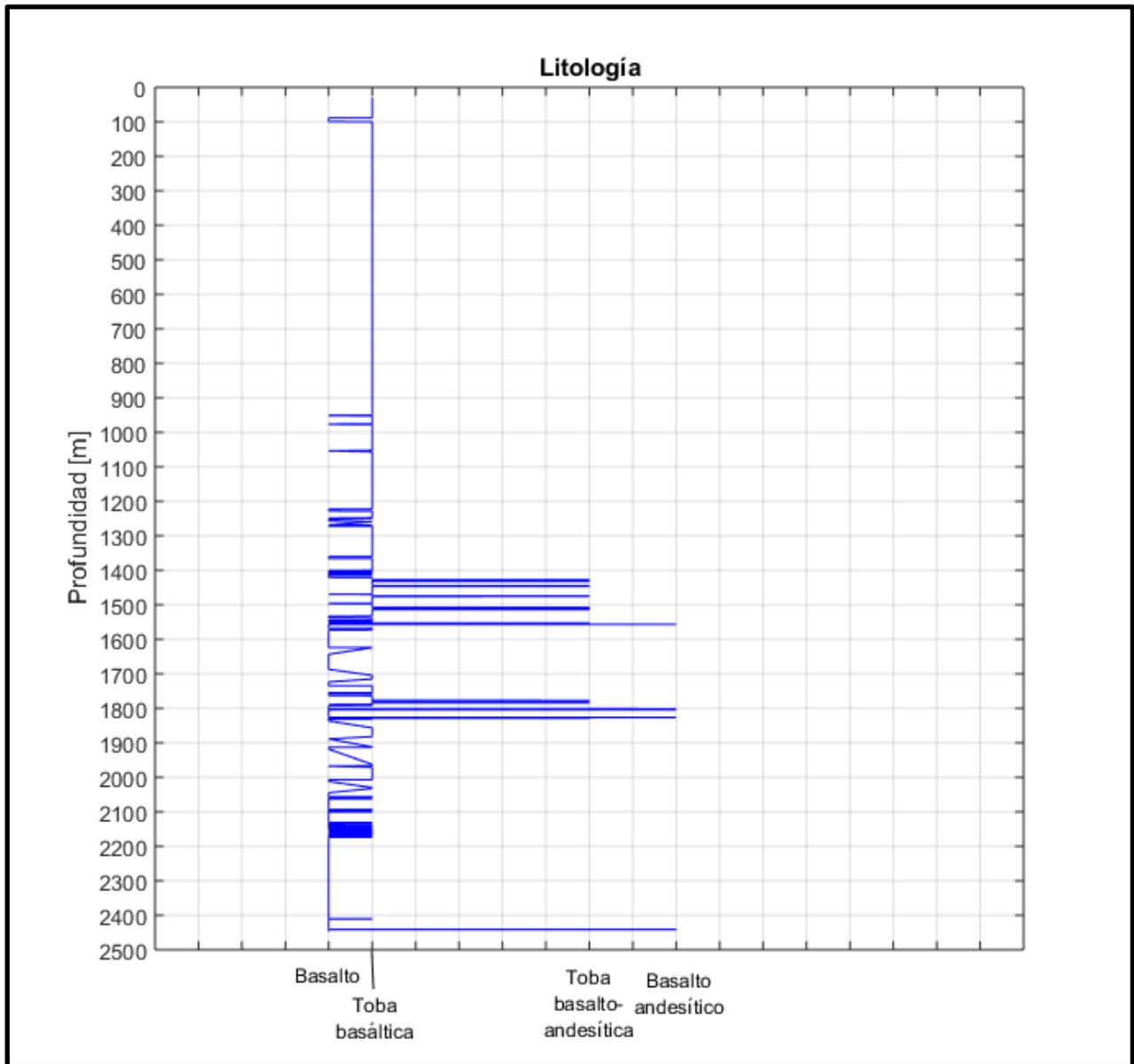


Figura 44. Registro de litología del pozo Mixhuca-1 (30 a 2446 metros), obtenido tras la aplicación del método de Arroyo y Mooser (Santiago, 2018).

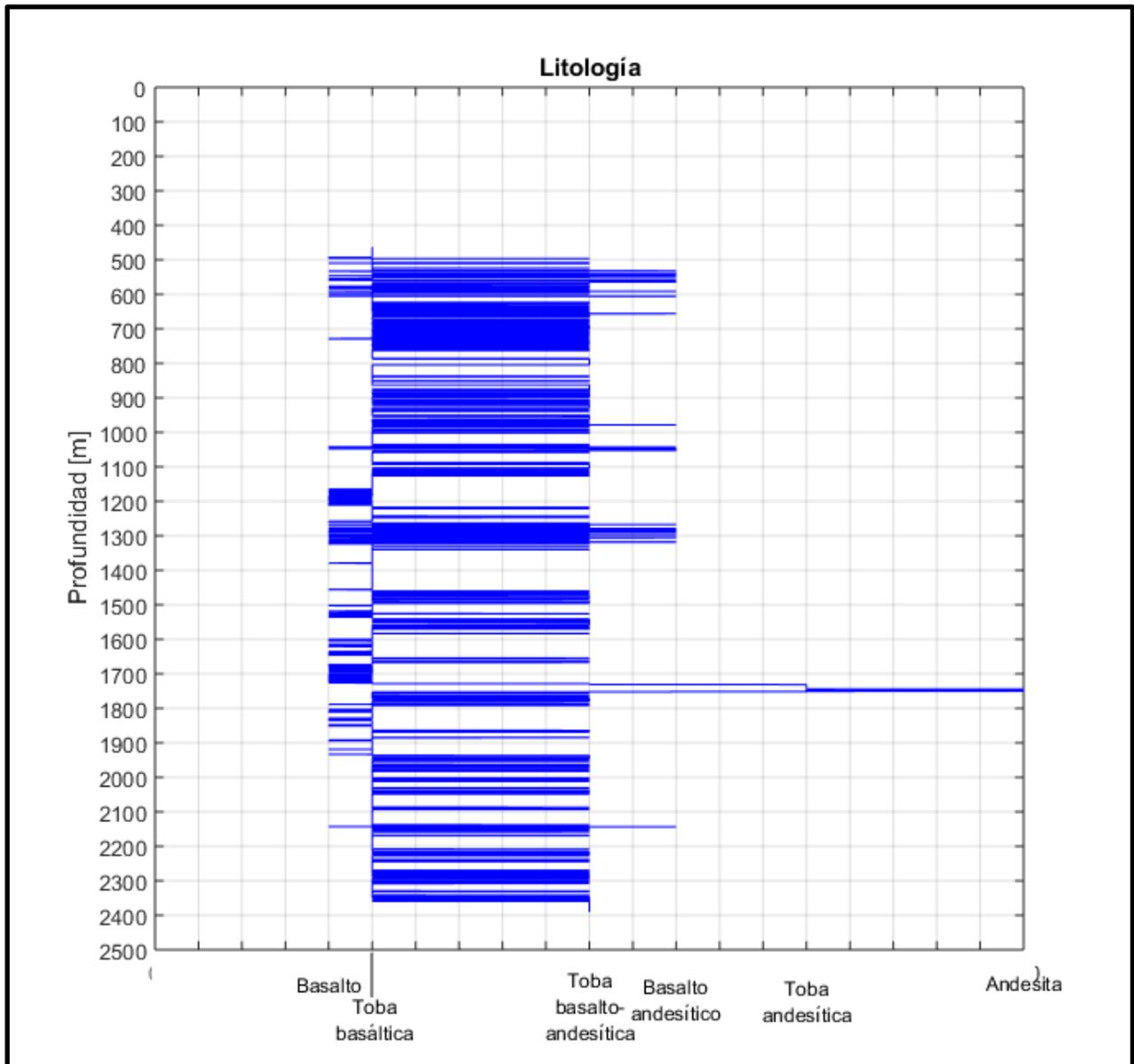


Figura 45. Registro de litología del pozo Mirador 2 (463 a 2390 metros), obtenido tras la aplicación del método de Arroyo y Mooser (Santiago, 2018).

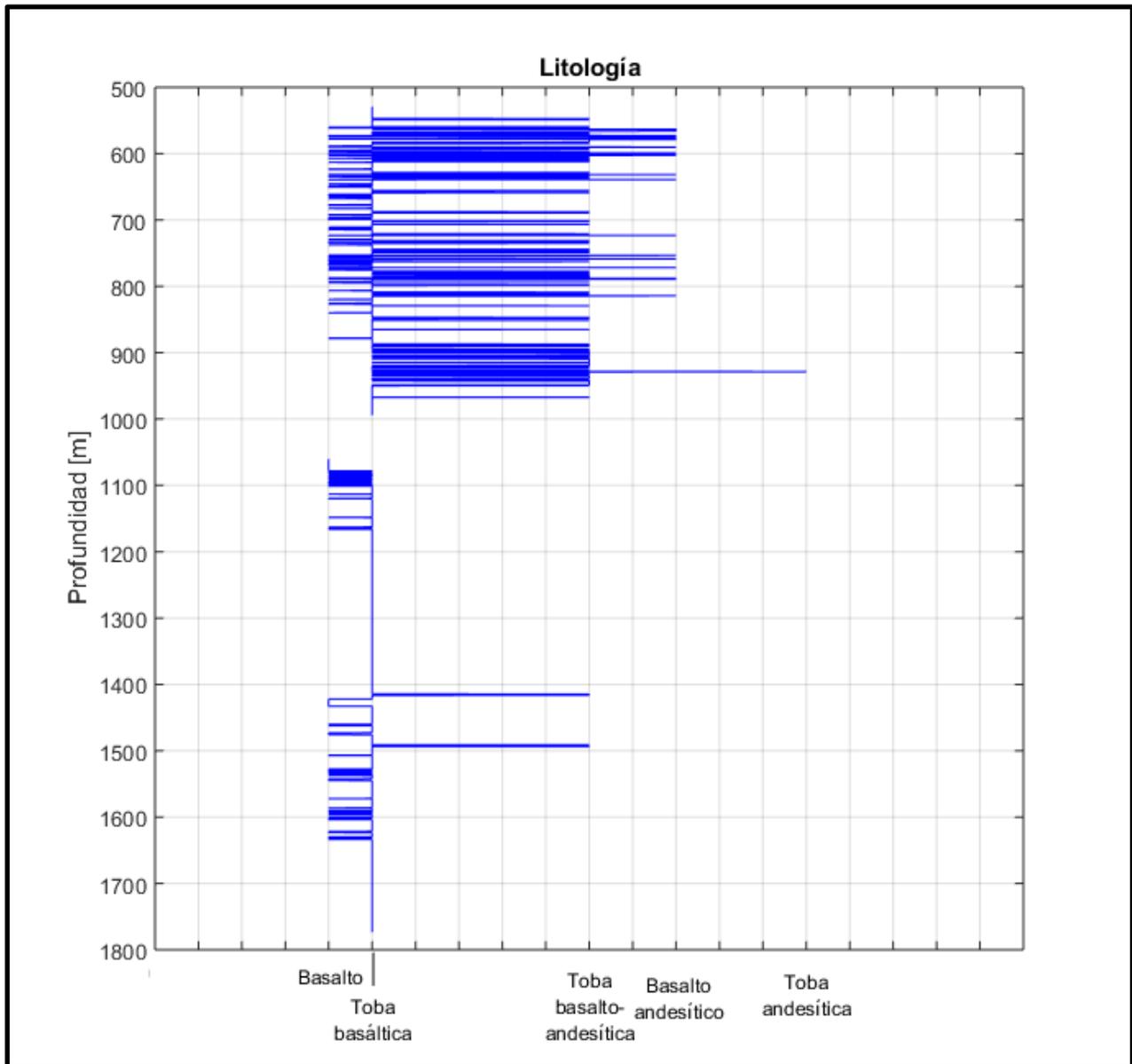


Figura 46. Registro de litología del pozo Santa Catarina 3-A (529 a 1773 metros), obtenido tras la aplicación del método de Arroyo y Mooser (Santiago, 2018).

Una vez obtenidos, se correlacionaron entre sí (Figura 47) con el objetivo de identificar unidades o litologías similares, de acuerdo a la clasificación de Zou. En este método de correlación, no se encontraron más semejanzas entre cada registro de litología. Cabe mencionar que nos fue proporcionada una columna litológica, de último momento, del pozo Mirador-2 (Anexo 1), en la cual se puede observar que se presenta caliza desde los 1935 hasta los 2235 m. Este tramo puede ser correlacionado al identificado en el pozo Mixhuca-1, donde también se presenta caliza (Figura 12) desde los 1573 a 1736 m.

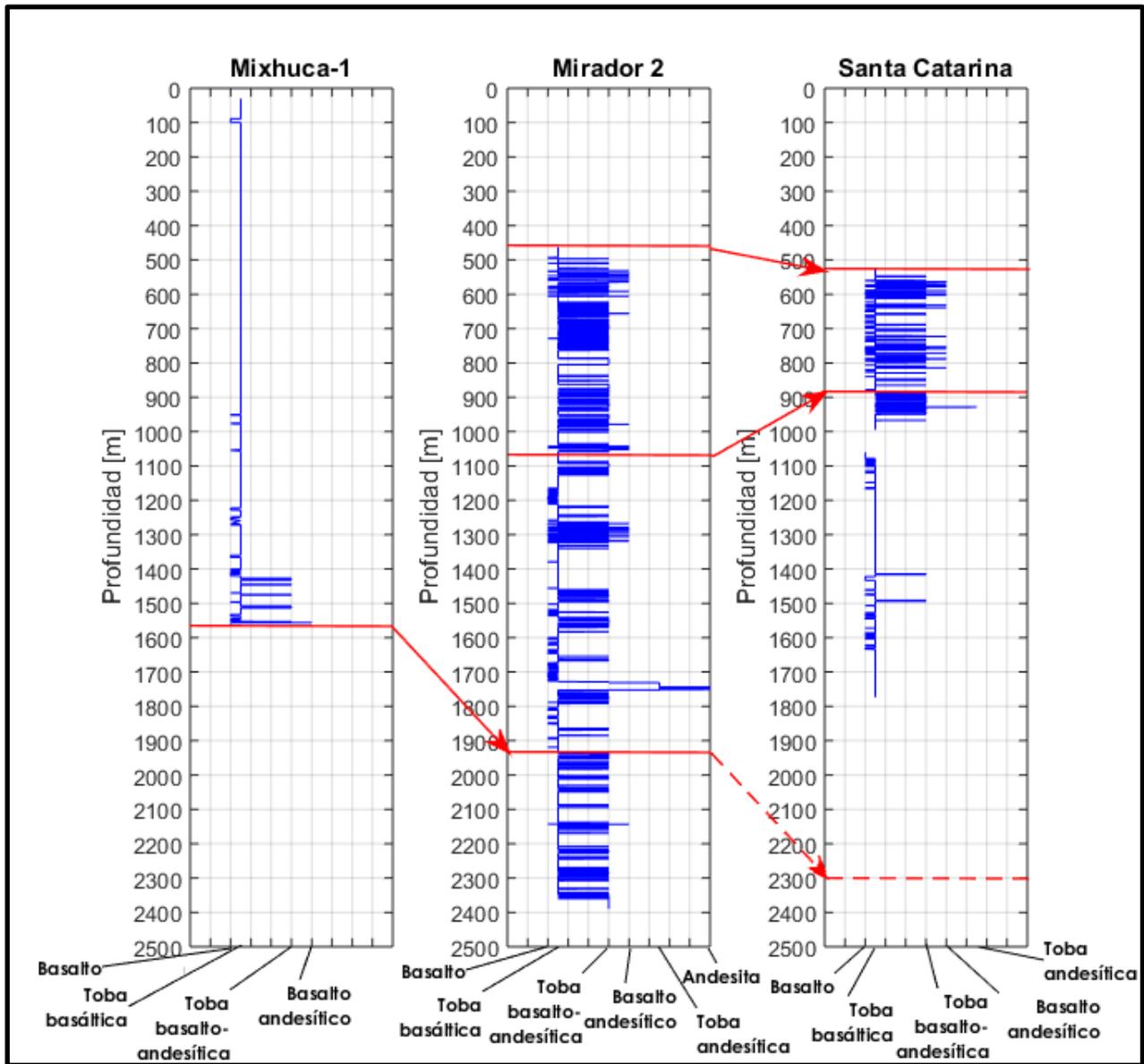


Figura 47. Correlación de los pozos de estudio mediante la litología obtenida de las gráficas cruzadas de cada pozo (basadas en Mooser, 2013).

Finalmente, se elaboraron tres columnas litológicas del Pozo Mirador 2 con el fin de visualizar los tres resultados y poder concluir una sola columna. La primera fue inferida tras la correlación cualitativa de los registros de los pozos de estudio y también con el resultado de las gráficas cruzadas de cada una de las zonas identificadas tras la correlación. Al analizar las gráficas cruzadas de la Figura 37, se puede decir que en las zonas A y B, la dispersión de los datos del pozo Mirador 2 es similar a la del pozo Santa Catarina, mientras que en la zona C es similar a la del pozo Mixhuca-1. Basándonos en esto, la columna del pozo sería la siguiente (Figura 48):

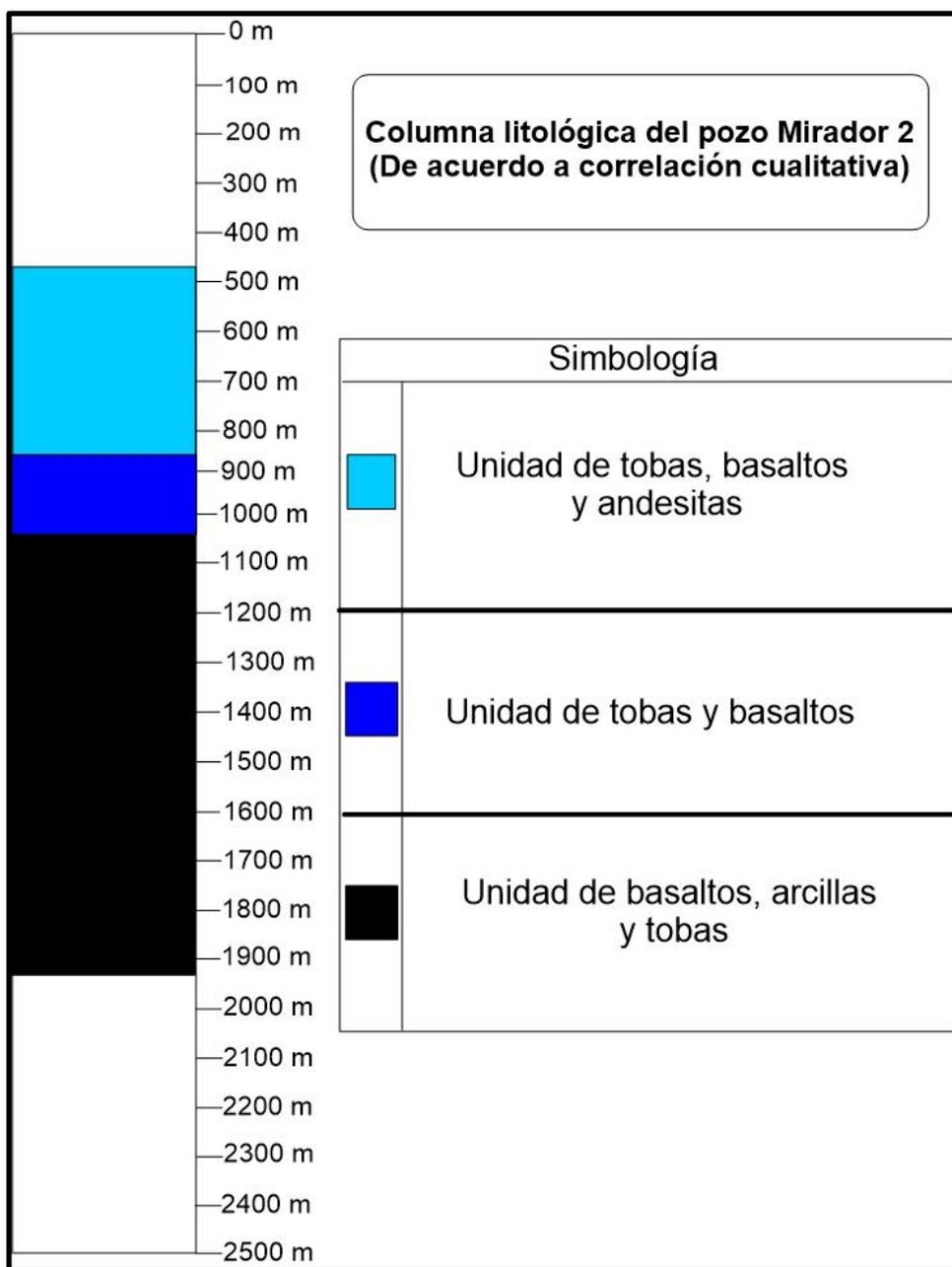


Figura 48. Columna litológica del pozo Mirador-2, basada en la correlación cualitativa. De color azul claro, la zona A; de azul oscuro, la zona B; de color negro, la zona C.

En la zona A (463 - 838 m) predominan las tobas, pero también se presentan basaltos y andesitas. Basándose en la columna litológica del pozo Santa Catarina (Figura 13), se podría denominar a esta zona como “Unidad de tobas, basaltos y andesitas”. En la zona B (838 - 1048 m) predominan, en un 90% aproximadamente, las tobas basálticas y basalto-andesíticas. Se presentan basaltos y basaltos andesíticos, en menor proporción. Con base en la columna litológica del pozo Santa Catarina (Figura 13), se podría nombrar a esta zona como

“Unidad de tobas y basaltos”. En la zona C (1048 - 1942 m) predominan las tobas basálticas y se presentan en menor proporción basaltos, tobas basalto-andesíticas, tobas andesíticas, basaltos andesíticos y andesitas. Basándonos en la columna litológica del pozo Mixhuca-1 (Figura 12), se podría nombrar a esta zona como “Unidad de basaltos, arcillas y tobas”.

La segunda columna (Figura 49) fue inferida tras la correlación litológica de los registros de los pozos de estudio (Figura 34) y al unificar la litología tanto del pozo Mixhuca-1 (Figura 12) como del Santa Catarina (Figura 13).

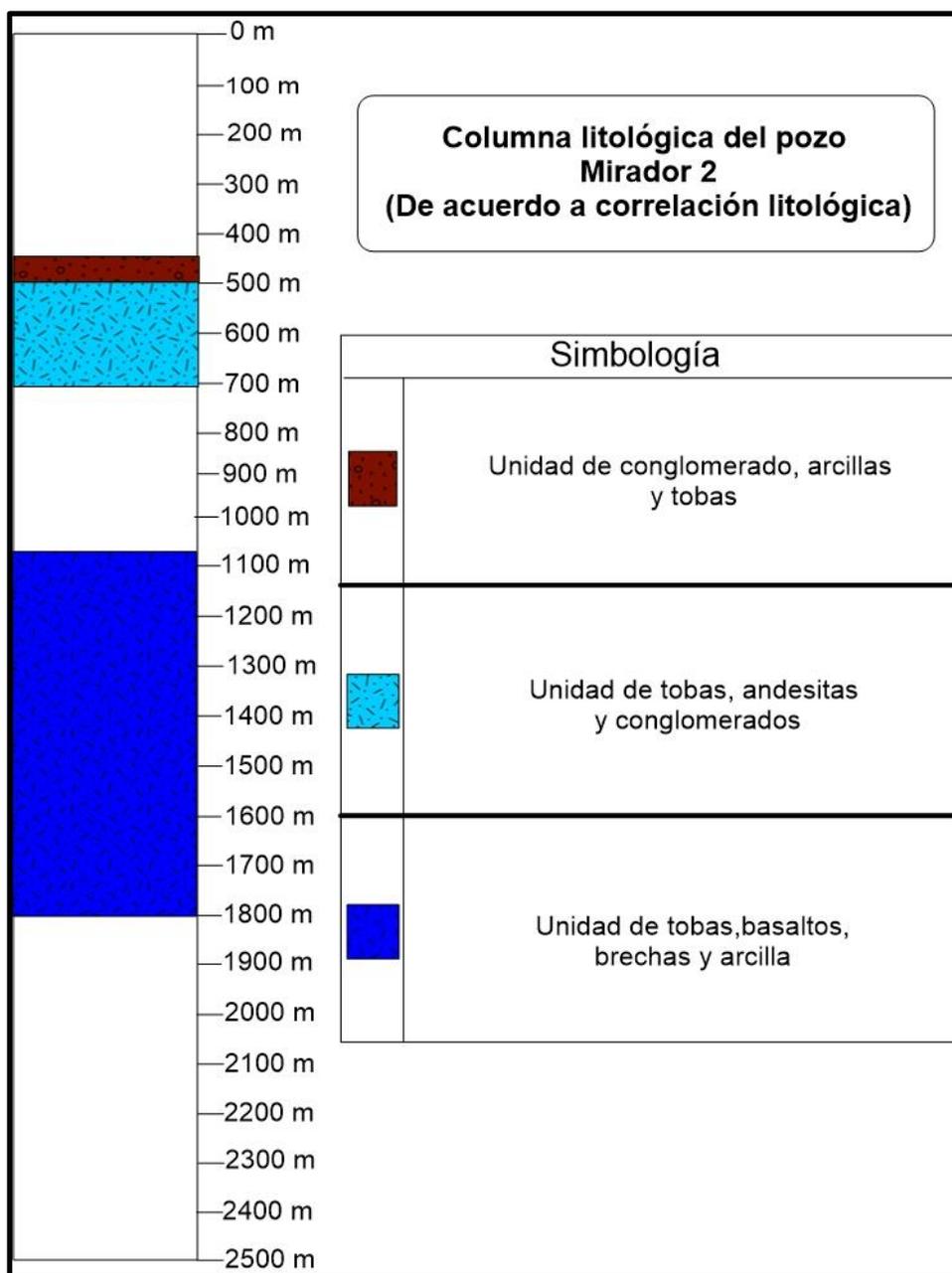


Figura 49. Columna litológica del pozo Mirador-2, basada en la correlación litológica.

La tercera columna (Figura 49) fue inferida tras la correlación de la litología obtenida de las gráficas cruzadas de cada pozo (Figura 47), donde se puede observar que sólo hay correlación entre el pozo Mirador-2 y Santa Catarina. El tramo del pozo Mirador-2 que va de 463 a 1070 m coincide entonces con el tramo del pozo Santa Catarina (Figura 13) que va de 529 a 890 m. La columna sería la siguiente:

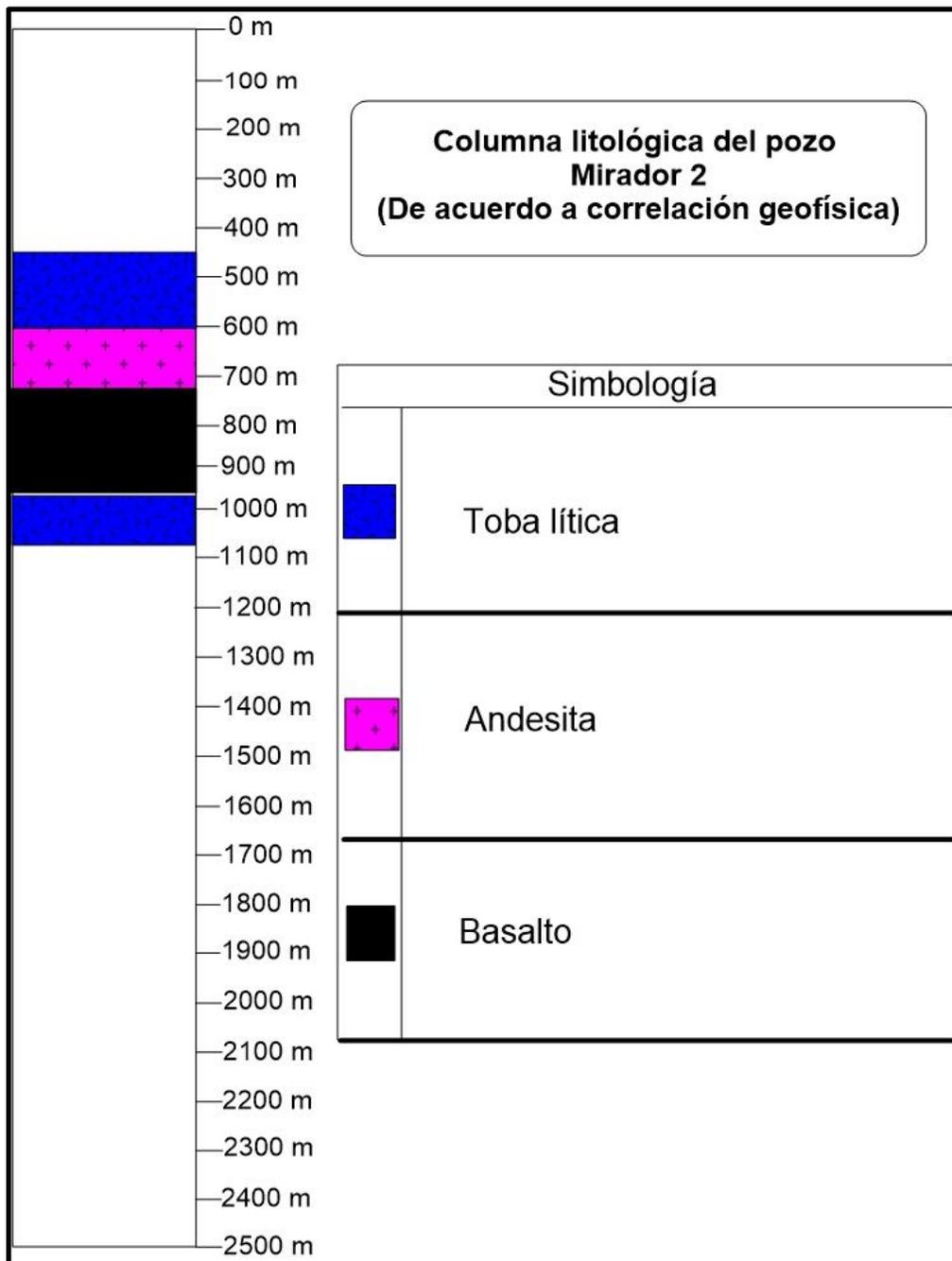


Figura 50. Columna litológica del pozo Mirador-2, basada en la correlación de gráficas cruzadas.

Para hacer una única columna del pozo Mirador-2, se tomó como base la obtenida de la correlación litológica (Figura 49), apoyándonos en la obtenida de la correlación de gráficas cruzadas (Figura 50) y complementando con la cualitativa (Figura 48). La columna definitiva del pozo Mirador-2 es la que se muestra a continuación (Figura 51):

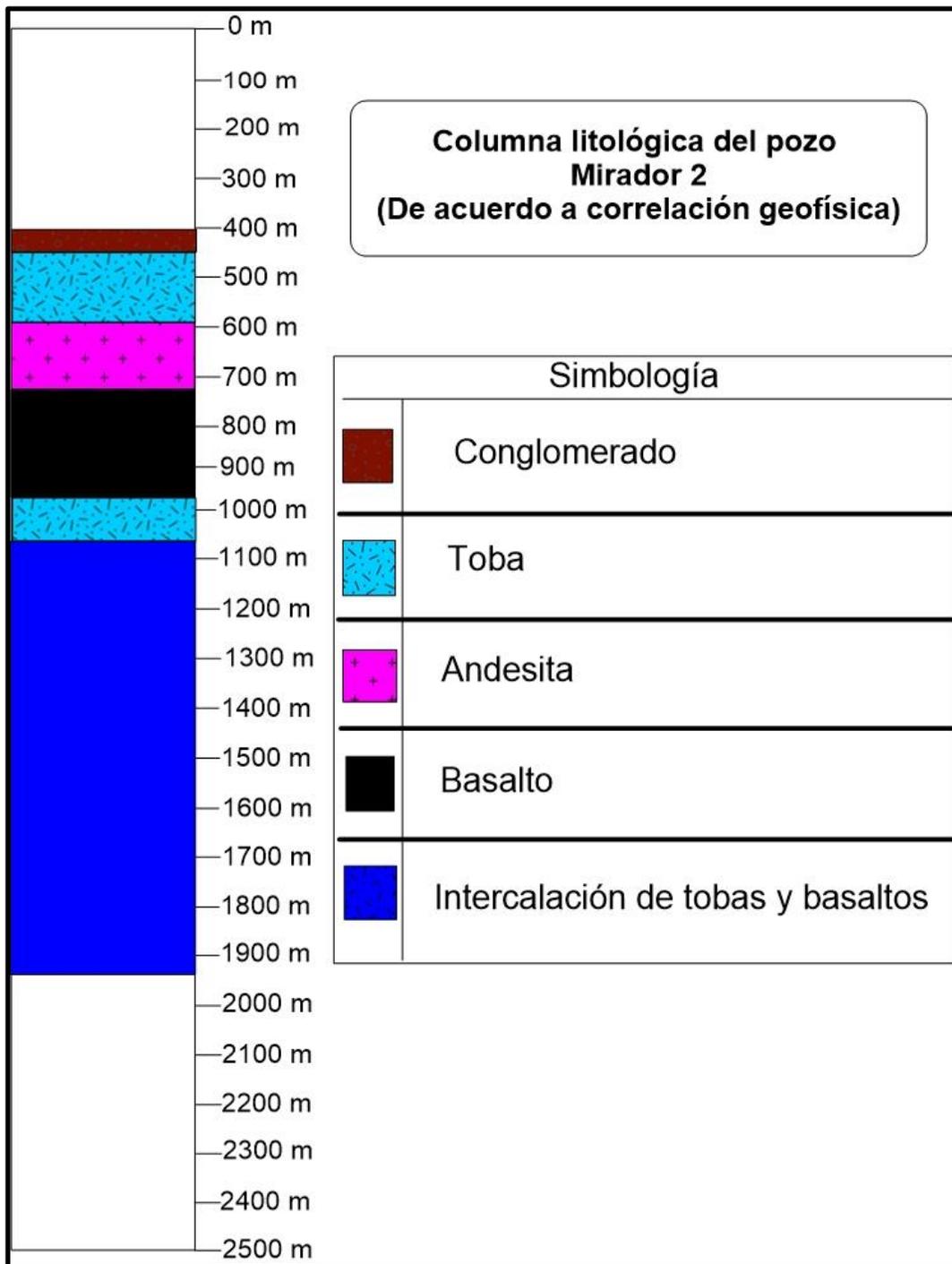


Figura 51. Columna litológica definitiva del pozo Mirador-2.

Conclusiones y recomendaciones

Para este estudio, el principal resultado esperado es la obtención de una columna litológica de un pozo intermedio que no tiene suficientes estudios geológicos, sustentado en registros geofísicos de pozos, con el fin de que dicha columna sea de apoyo para caracterizar otros pozos, dentro de la Cuenca de México, donde se pueda encontrar agua que pueda abastecer a las determinadas poblaciones cercanas a éstos. Además, se esperaba aplicar el método de Zou (2013), ya que los registros tanto de resistividad como de rayos gamma tienen un muy buen desempeño en rocas sedimentarias pero, al tratarse de rocas volcánicas, el análisis de los registros podría ser distinto y obtenerse así un resultado diferente que puede ligarse a la geología de la zona de estudio.

La nueva metodología (Zou, 2013) es comúnmente aplicada para analizar registros en rocas de tipo volcánico pero con fines petroleros, pero en México no se han llevado a cabo análisis de este tipo, sino que se han realizado en rocas sedimentarias. Por lo tanto, los resultados obtenidos en el pozo Mirador 2 tienen que estar fundamentados en la información obtenida de la misma metodología aplicada a los otros pozos de estudio, con el uso de gráficas cruzadas (GR - R), observando el comportamiento en cada uno de los registros de los pozos después del filtrado, comparando entre los mismos, además de poder corroborar la respuesta con la de los pozos que ya tienen una geología definida. Siendo el uso de estas gráficas las que darían una correlación cualitativa, debido a que, si se traslapan las respuestas en una misma gráfica, se puede observar la similitud de respuestas en los registros de los tres pozos y, con una litología definida por zonas dentro de la gráfica, se pueden correlacionar los registros de los pozos.

La falta de una denominación de litología en común para los pozos de estudio es un problema, ya que los estudios realizados en los diferentes pozos denominan con diferentes nombres a la litología de cada uno de los mismos, por lo que la solución fue crear nuevos nombres para cada tipo de roca presente en el pozo Mirador 2, partiendo de la similitud de comportamiento en los registros, los nombres y composición geológica en los dos pozos cercanos.

Debido a la poca fiabilidad de los datos en el pozo Santa Catarina a partir de 1970 m, se decidió sólo correlacionar hasta esa profundidad y no se pudo obtener una correlación más profunda. Lo que se recomienda es volver a sondear la zona, además de la obtención de núcleos para corroborar y concretar la geología del pozo. Incluso hacer nuevas mediciones de registros a mayor profundidad que permitan tener datos con mejor calidad y mayor fiabilidad, esto con el fin de poder tener una mayor profundidad para llevar a cabo una nueva correlación.

En el caso de los tres pozos, se tienen distintos tipos de registros que no coinciden entre ellos mismos, con excepción de los registros usados en este estudio. Por lo tanto, se recomienda usar registros que puedan ayudar a corroborar la información contenida en este trabajo, como lo son los registros de neutrón y el de densidad. Además, se debe de considerar que las herramientas usadas en los registros geofísicos están comúnmente calibradas para rocas sedimentarias, por lo tanto, la respuesta podría no ser correcta; debido a esto, las herramientas deberían tener una calibración específica ligada a rocas volcánicas cuyo origen está sumamente relacionado a la respuesta física.

Se debe de considerar notablemente el involucrar en esta clase de estudios otro tipo de ciencias además de la geología, como lo son la hidrogeología, la química e hidrología, debido a que por parte de la geofísica la conclusión esperada es una anomalía, haciendo esto un aporte notable al marco teórico del estudio, pero dicho aporte podría propiciar una resolución al problema general, que se define en la búsqueda, zonificación y caracterización de zonas subterráneas con alto potencial en agua. Esto requiere de distintos tipos de estudios de diferentes ramas de la ciencia.

Comparando con la interpretación de la imagen de la columna litológica de Mooser (2021), que fue creada por medio de un análisis geológico, un punto importante a considerar es la exclusión del análisis a partir de los 1935 metros de profundidad en el pozo Mirador-2, ya que Mooser lo define como Caliza principalmente, por lo que aplicando el método de Zou daría una interpretación errónea relacionada a rocas de tipo volcánico, por lo tanto, aplicando conjuntamente la geofísica y un criterio geológico es que se decidió limitar el análisis hasta esa profundidad.

Referencias

- Anónimo (2014). *REVISIÓN Y EVALUACIÓN EN GEOTECNIA Y ESTRUCTURAS PARA RESOLVER LA PROBLEMÁTICA DEL TRANSPORTE AÉREO EN EL CENTRO DEL PAÍS*: Instituto de Ingeniería, 5. Avance de los Estudios Específicos, p. 46.
- Arce, J.L., Layer, P. W., Morales-Casique, E., Benowitz, J.A., Rangel, E., Escolero, O. (2013). *New constraints on the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and whole-rock chemistry*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 266, p. 34-49.
- Arce, J.L., Layer, P. W., Macías, J. L., Morales-Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, F. J., Benowitz, Vásquez-Serrano, A. (2019). *Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt*. Journal of Maps.
- Arroyo, F.A. y Roig, F. J. (s.a.). *Apuntes de Introducción a los Registros Geofísicos de Pozos*. Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- Bassiouni, Z., 1994. *Theory, Measurement, and Interpretation of Well Logs*. SPE Textbook Series, 4, 372 p.
- Cárdenas, R. (1987). *Informe geológico final del pozo: Mixhuca – 1*. Departamento de geología de subsuelo, Petróleos Mexicanos, 13 – 16.
- CONAGUA (2010). *Compendio del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII. Lo que se debe saber del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México*. Edición 2010. Recuperado el 24 de marzo de 2021, de http://centro.paot.org.mx/documentos/conagua/compendio_del_agua_.pdf
- CONAGUA (2020). *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Cd. De México (0901), Ciudad de México*. Recuperado el 04 de febrero de 2021, de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/cmdx/DR_0901.pdf
- CONAGUA (2020). *Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea, Ciudad de México*. Recuperado el 04 de febrero de 2021, de <https://sigagis.conagua.gob.mx/dam20/>
- Damas, D. (2011). *Adquisición, procesado e interpretación de datos espectrométricos (torio, potasio y uranio) en la región de Tecuaniapan, Cholula-Puebla*. Tesis de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional.
- Garduza, V. M. (2019). *Manual de Registros Geofísicos de Pozo y algunas Aplicaciones*. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, A. C., 61 (2).

- González-Torres, E.A., Morán-Zenteno, D.J., Mori, L., Martiny, B.M. (2015). *Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67 (2), p. 285-297.
- Guzmán, E. (2012). *Análisis Fractal de los Registros de Rayos Gamma de la Formación Chicontepec*. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional.
- INEGI (2020). *México en cifras*. Recuperado el 04 de febrero de 2020, de <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=09>
- Jones, M. (2005). *Google Earth Pro* (Versión 7.3). [Aplicación móvil]. Google. <https://www.google.com/intl/es/earth/download/gep/agree.html>
- Martinez, H. (1997). *Manual de Capacitación, Interpretación y Evaluación de Registros Geofísicos en la Exploración Petrolera*. Recuperado el 25 de abril de 2021, de <https://de.slideshare.net/ricardoromero3192/37659621-manualinterpregistros>
- Mnoney S. (2009). *An Introduction to Digital Signal Processing: A Focus on Implementation* (pp. 2-3). Denmark. River Publishers Series in Signal, Image & Speech Processing.
- Mooser, F. (2018). *Geología del Valle de México y Otras Regiones del País*. Colegio de Ingenieros Civiles de México, México.
- Protección Civil CDMX (2017). *Mapa Geológico*. Recuperado el 02 de diciembre de 2020, de http://data.proteccioncivil.cdmx.gob.mx/mapas_atlas/09000_Mapa_Geologico.pdf
- Ramos, H. Zinat, D. Ramírez T. (2008). Registros Geofísicos en México. Recuperado el 16 de octubre de 2021, de https://issuu.com/mariyinitfr/docs/reg_20geof_20en_20mexico_20
- Rebollo, R. (s.a.). *Análisis de Señales Geofísicas*. Universidad Nacional de La Plata, Argentina. 22 - 27
- Santiago, D. (2018). *Análisis de la información geológica, geofísica e hidrogeológica en la evaluación de un acuífero profundo (Caso Santa Catarina 3A)*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Santos, O. (2015). Estudio de los problemas operacionales durante la perforación de los pozos direccionales en la plataforma drago norte 2. Tesis de licenciatura. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
- Servicio Geológico Mexicano (2002). *Ciudad de México E14-2. Carta Geológico-Minera*. Recuperado el 02 de diciembre de 2020, de http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/89_E14-2_GM.pdf

Schlumberger (AÑO). Petrophysics (Versión #) [Aplicación móvil]. Schlumberger.
<https://www.software.slb.com/products/disciplines/petrophysics>

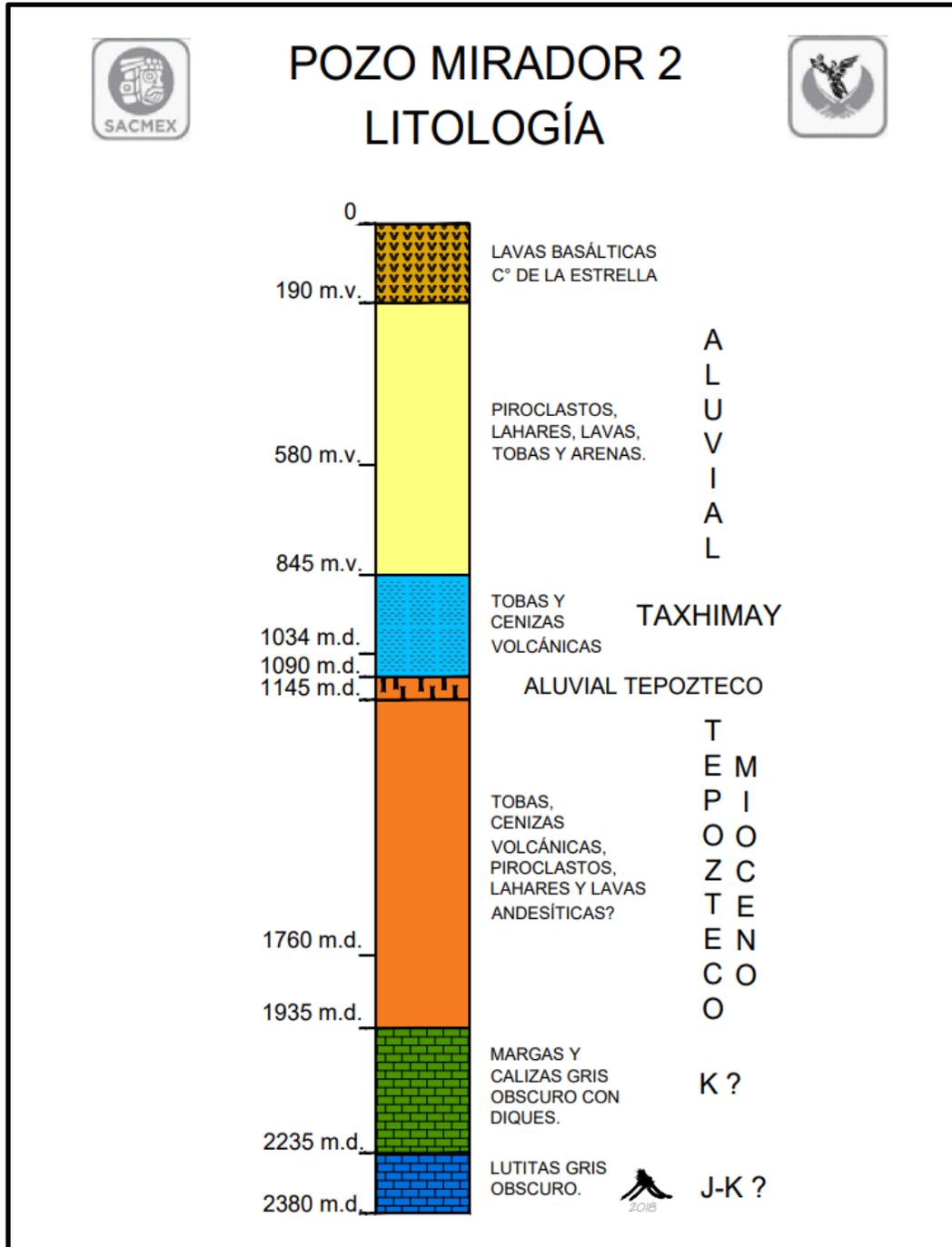
Tapia-Varela, G. y López-Blanco, J. (2002). *Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogenéticas a escala 1:100,000* [versión electrónica]. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Vol. 19(1), 50-65.

Vásquez Serrano, A., et. al. (2019). *Análisis de fracturas geológicas en el pozo Agrícola Oriental 2C, Ciudad de México y su relación con fallas mayores*: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v.36, núm. 1, p. 38-53.

Vázquez, E., Jaimes, R. (1989). *Geología de la Cuenca de México* [versión electrónica]. Geofísica Internacional. Vol. 28 (2), 136 - 166.

Zou, C. (2013). *Volcanic Reservoirs in Petroleum Exploration*. Recuperado el 31 de julio de 2020, de https://books.google.com.mx/books?id=UOnTiGvYOeEC&pg=PA164&lpg=PA164&dq=Zou,+Cainen+g+lld-gr+crossplot&source=bl&ots=6qHfd3ztoc&sig=ACfU3U1wsaZGskIIHVndsIEP-Zh22_yTCQ&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwie_9HGiTqAhUEWqwkHaFiCqsQ6AEwAHoECAoQAQ#v=onepage&q=Zou%2C%20Caineng%20lld-gr%20crossplot&f=false

Anexos



Anexo 1. Columna litológica del pozo Mirador-2 descrita basada en los registros anteriores de dicho pozo (Tomada de Mooser, 2021).