



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Sustentabilidad del agua en la
Alcaldía de Iztapalapa**

TESINA

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Belmont Cureño Lucio Alberto

DIRECTOR DE TESINA

Ing. Francisco Alejandro Arroyo Carrasco



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

Agradecimientos

A la Universidad, por proveerme de aprendizaje.

A mis amigos por siempre impulsarme a ser mejor cada día, y por contar siempre con su apoyo.

Al ing. Federico Mosser (QEPD) por facilitar información para la elaboración de dicho trabajo.

Al SACMEX, por otorgar las facilidades para contar con información para el desarrollo de la presente tesina.

Al ing. Alfredo Victoria por confiar en mi potencial durante la carrera.

Al ing. Alejandro Arroyo por siempre brindarme su apoyo durante mi desarrollo profesional.

Al M.C. José Luis Lezama por confiar en mi trabajo.

A mi familia por apoyarme siempre y ser mi motor para salir adelante.

A ti, que compartiste este camino hasta el final conmigo.

Índice

Resumen	9
Abstract.....	10
Capítulo 1. Introducción	11
1.1. Antecedentes	11
1.2. Objetivos	14
1.3. Alcance	14
Capítulo 2. Contexto	15
2.1. Marco geográfico.....	15
2.2. Marco hidrológico	17
2.3. Marco geológico	20
2.4. Marco geofísico.....	27
2.4.1. Gravimetría del Valle de México 1951	27
2.4.2. Sísmica de reflexión 1988.....	34
2.4.3. Sondeo eléctrico vertical 1988.....	37
.....	47
2.5. Marco hidrogeológico.....	48
2.5.1. Tipo de acuífero.....	48
2.5.2. Censo de pozos.....	49
2.5.3. Profundidad al nivel estático.....	50
2.5.4. Elevación al nivel estático.....	52
2.5.5. Conductividad hidráulica y transmisividad	53
2.5.6. Disponibilidad.....	53
2.5.7. Sistema de distribución de agua potable y drenaje de la alcaldía	55
2.6. Marco hidrogeoquímico	56
2.7. Marco ambiental	58
2.7.1. Suelo	58
2.7.2. Uso de suelo	58
2.7.3. Áreas protegidas	58
2.7.4. Reserva territorial.....	59
2.7.5. Vulnerabilidad	59

2.7.6. Riesgo geológico.....	59
2.7.7. Hundimiento.....	60
2.7.8. Zonas de fracturamiento.....	61
2.7.9. Susceptibilidad de laderas.....	62
2.7.10. Remoción de masa.....	64
2.8. Marco Socioeconómico.....	67
2.8.1. Población.....	67
2.8.2. Pobreza.....	68
2.8.3. Educación.....	68
2.8.4. Economía.....	68
2.8.5. Industria.....	69
2.8.6. Servicios.....	69
2.8.7. Comercio.....	70
Capítulo 3. Problemática del agua.....	71
3.1. Normatividad.....	72
3.2. Identificación de necesidades.....	77
Capítulo 4. Estrategia para ordenar y desarrollar el conocimiento del agua subterránea.....	82
Capítulo 5. Conclusiones.....	92
Bibliografía y referencias.....	95
ANEXOS.....	101
ANEXO A. Generación del modelo geológico del subsuelo a partir de la gravimetría.....	101
ANEXO B. Principios físicos de cada método geofísico expuesto.....	111
B-1. Método gravimétrico.....	111
B-2. Método de reflexión sísmica.....	112
B-3. Método de sondeo eléctrico vertical (SEV).....	115
ANEXO C. Hidrogeología.....	119
C-1. Conceptos básicos.....	119
C-2 Tablas y graficas de pruebas de aforo en los pozos utilizados para el cálculo de la transmisividad y conductividad hidráulica.....	121

Indice de figuras

- Figura 1. Localización de la alcaldía de Iztapalapa (UTM WGS84 ZONA 14 N). Tomado de Google earth (2021), elaboración propia.16
- Figura 2. Vías de acceso a la alcaldía Iztapalapa. Tomada de Google Earth (2021) elaboración propia.....17
- Figura 3. Relieve de la Alcaldía de Iztapalapa. Elaboración propia.....22
- Figura 4. Estratigrafía general de la Cuenca de México (CM) propuesta por Federico Mooser, Tomada de IC Ingeniería Civil (2014).25
- Figura 5. Mapa geológico de la Ciudad de México. Modificado de Vázquez-Sánchez et. al., (1989). Se agregan las fallas Mixhuca identificada por Pérez-Cruz, (1998) y el graben de Santa Catarina propuesto por Arce et. al., 2013a.26
- Figura 6. Anomalía de Bouguer.....28
- Figura 7. Espectro de frecuencias y profundidad estimada de las anomalías generadas a partir de la gravimetría. Elaboración propia.29
- Figura 8. Anomalía Regional generada en Oasis montaj.....30
- Figura 9. Anomalía Residual generada en Oasis montaj.31
- Figura 10. Perfil Anomalía residual.....33
- Figura 11. Modelo geológico generado a partir de la gravimetría y corte litológico del pozo Mirador 2, proporcionada por el Ing. F. Mooser.33
- Figura 12. Esquema de las condiciones sísmicas descritas por Pérez Cruz (1988).....35
- Figura 13. Arreglo Shlumberger. Tomada de sergeolog.com (s/f).....37
- Figura 14. Mapa 1 de Isorresistividad aparente $AB/2=10$ m, en el Valle de México. Se señala el área de estudio. Tomada de Libro CFE (1988).....40
- Figura 15. Mapa 2 de Isorresistividad aparente con $AB/2= 20$ m, del Valle de México. Tomado de Libro CFE (1988).41
- Figura 16. Mapa 3 de Isorresistividad aparente con $AB/2= 70$ m, del Valle de México. Tomado de Libro CFE (1988).42
- Figura 17. Mapa 4 de Isorresistividad aparente con $AB/2= 210$ m, del Valle de México. Tomado de Libro CFE (1986).43
- Figura 18 Esquema de distribución de las unidades geoelectricas y su litología, y su ubicación.44
- Figura 19. Sección geoelectrica en la Alcaldía de Iztapalapa, correlacionada con la gravimetría de la Cuenca del Valle de México. Tomada de Informe CIGSA 2000.46

- Figura 20. Sección geológica generada a partir de la sección geoelectrica generada por CIGSA(2000). (Corte litológico del pozo Mirador 2, proporcionado por el Ing. F. Mooser (2019).....47
- Figura 21. Distribución de Pozos ubicados en la Alcaldía.....50
- Figura 22. Profundidad al nivel estático estimada en la Alcaldía. (2021) en Surfer.....51
- Figura 23. Elevación al nivel estático estimada en la Alcaldía. (2021) en Surfer.....52
- Figura 24. Ubicación de los pozos de la delegación Iztapalapa de los que se colectaron muestras de agua. Se observan las cargas hidráulicas (msnm) en la delegación Iztapalapa para el año 2011, de acuerdo a datos inéditos del SAMEX. Tomada de Domínguez Mariani et al., (2015).....57
- Figura 25. Mapa de Zonificación de fracturas en la Alcaldía de Iztapalapa. Tomado de Carreón, Freyre, et.al. (2011).62
- Figura 26. Mapa de Susceptibilidad por inestabilidad de laderas. Tomado de Protección Civil (2014).64
- Figura 27. Mapa de riesgo por remoción de masa. Tomado de Altas de riesgos Iztapalapa (2014).66
- Figura 28. Descripción gráfica de la norma NOM-011-CONAGUA-2000.73
- Figura 29. Descripción gráfica de la norma NOM-014-CONAGUA-2007.74
- Figura 30. Descripción gráfica de la norma NOM-015-CONAGUA-2007.75
- Figura 31. Elementos del entorno y su impacto.75
- Figura 32. Orientación de proyectos.78
- Figura 33. Elementos considerados y resultados esperados aplicando un conocimiento documentado.....79
- Figura 34. Estrategia para el manejo sustentable del agua (Exevhi).85
- Figura 35. Propuesta de líneas de sísmica de reflexión (Imagen tomada de Google Earth).86
- Figura 36. Propuesta de líneas de gravimetría (Imagen tomada de Google Earth).....87
- Figura 37. Distribución de estaciones sísmicas y líneas de interés.....89
- Figura 38. Algunos de los elementos que deben considerarse para el Sistema de Información Hidrogeológico.91

Anexos

- Figura A 1. Generaci3n de proyecto en Oasis Montaj.....101
- Figura A 2. Importar datos de gravimetría en Oasis Montaj.....101
- Figura A 3. Datos importados.....102
- Figura A 4. Selecci3n de datos para mapa topogr3fico.....102
- Figura A 5. Georreferenciación de los datos de topografía.....102
- Figura A 6. Selecci3n del método de interpolaci3n.....103
- Figura A 7. Mapa topogr3fico.....103
- Figura A 8. Selecci3n de datos para generar el mapa de la Anomalia de Bouguer.....103
- Figura A 9. Mapa de la Anomalia de Bouguer.....104
- Figura A 10. M3dulo MAGMAP para obtener la transformada de Fourier de los datos de la Anomalia de Bouguer.....104
- Figura A 11. Selecci3n de los datos para pre procesamiento.....105
- Figura A 12. Resultados del pre procesamiento.....105
- Figura A 13. Selecci3n del m3dulo para obtener la transformada r3pida de Fourier y selecci3n de los datos a los que se les aplicar3.105
- Figura A 14. Aplicaci3n de filtros para obtenci3n de espectro radial, c3lculo y espectro obtenido.....106
- Figura A 15. Espectro de potencias y profundidad estimada.....106
- Figura A 16. Aplicaci3n del filtro tipo butterworth para separaci3n regional-residual.....107
- Figura A 17. Anomalia regional.....107
- Figura A 18. Obtenci3n de la anomalia residual, realizando la resta entre la anomalia de bouguer y la anomalia regional.....108
- Figura A 19. Anomalia residual.....108
- Figura A 20. M3dulo GM-SYS para obtenci3n del modelo geol3gico a partir de la gravimetría.....109
- Figura A 21. Trazo del perfil gravimétrico utilizado para la generaci3n del modelo geol3gico.....109
- Figura A 22. Perfil Trazado.....109
- Figura A 23. Curvas de ajuste.....110
- Figura A 24. Modelo geol3gico generado.....110
- Figura B 1. Modelo de reflexi3n sísmica. Tomada de geostudyblog.blogspot.com.....112

- Figura B 2. Principio de Huygens en la propagación de ondas planas (izquierda) y en ondas esféricas (derecha). tomada de fisicalab.com.113
- Figura B 3. Ley de Snell. Tomada de <https://leerciencia.net>.114
- Figura B 4. Gráfico de resistividad de diferentes rocas, minerales y químicos. Tomada de estrucplan.com.115
- Figura B 5. Arreglo Wenner.. Modificado de Orellana (1982).....117
- Figura B 6. Arreglo Schlumberger. Modificado de Orellana (1982).117
- Figura B 7. Arreglo Dipolo-Dipolo. Modificado de Orellana (1982).....118
- Figura C 1. Modelo de un acuífero. Tomada de http://aquabook.agua.gob.ar/407_0120

Índice de tablas

- Tabla 1. Temperatura máxima, media y mínima anual, registrada de 1951 a 2010.18
- Tabla 2. Precipitación media anual registrada de 1951 a 2010.....19
- Tabla 3. Datos geográficos de Iztapalapa.....67
- Tabla 4. Datos demográficos de Iztapalapa.....67
- Tabla 5. Análisis, ideas y acciones a realizar identificadas del análisis de la información.77
- Tabla 6. Nuevo enfoque para la sustentabilidad del agua.....82
- Tabla 7. Ubicación líneas de sísmica de reflexión.86
- Tabla 8. Dirección y sentido de líneas propuestas de gravimetría.88
- Tabla 9. Estaciones y líneas propuestas de ruido sísmico.....89

Resumen

La alcaldía Iztapalapa es la más poblada de la Ciudad de México, por lo que demanda grandes cantidades de agua potable para satisfacer las necesidades de sus habitantes, en consecuencia, tiene graves problemas de abastecimiento y distribución.

Para tratar de dar una solución a esta problemática, se necesita conocer los principales agentes causales, para así, proponer soluciones que ayuden a mitigarla. En este trabajo, se hace mención de las posibles causas de las que deriva el desabasto de agua potable, se comparte un contexto geológico, geofísico e hidrogeológico, con ayuda de datos obtenidos en diferentes fuentes de información, sobre geofísica, hidrogeología recabados de diversos artículos, algunos pertenecientes a diversos investigadores del Instituto de Geología de la UNAM, así como datos presentados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), entre otros, con el fin de realizar una caracterización de las condiciones hidrogeológicas presentes. Para la conceptualización se realizó un análisis de la información, así como un reprocesamiento, haciendo la aclaración de que la mayoría se tuvo que digitalizar de documentos impresos.

Una vez entendido el contexto, se presentan una serie de recomendaciones o propuestas para mitigar el desabasto de agua y darle sostenibilidad, ya sea subterránea o superficial.

Algunas de las propuestas principales es la actualización y organización de la información, tanto geofísica, geológica e hidrogeológica, mediciones del nivel estático en los diferentes pozos ubicados dentro de los límites de la alcaldía, identificar posibles zonas de infiltración de aguas subterráneas, preservación de áreas naturales protegidas, identificación de riesgos geológicos, estudios para identificar posible infiltración de contaminantes, actualización de la disponibilidad del agua, entre otras más.

Abstract

The Iztapalapa mayor's office is the most populated in Mexico City, demands greater amounts of drinking water to meet the needs of the population and has serious supply and distribution problems.

To try to provide a solution to this problem, it is necessary to know the causal agents, in order to propose solutions that help to mitigate it. In this work, mention is made of the possible causes of the shortage of drinking water, a geological, geophysical and hydrogeological context is shared, with the help of data obtained in different sources of information, on geophysics, hydrogeology collected from various articles, some belonging to various researchers from the Institute of Geology of the UNAM, as well as data presented by the National Water Commission (CONAGUA), among others, in order to characterize the present hydrogeological conditions. For conceptualization, an analysis of the information was carried out, as well as a reprocessing, clarifying that most of the printed documents had to be digitized.

Once the context was visualized, a series of recommendations or proposals are presented to mitigate the shortage of water and give sustainability, whether underground or surface.

Some of the main proposals are the updating and organization of the information, both geophysical, geological and hydrogeological, measurements of the static level in the different wells located within the limits of the municipality, identifying possible zones of groundwater infiltration, preservation of areas natural protected areas, identification of geological risks, studies to identify possible infiltration of contaminants, updating of water availability, among others.

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

La falta de agua y su calidad, en la alcaldía Iztapalapa, es una problemática tanto para la población, como para las autoridades del Gobierno Federal y de la Ciudad de México. A la fecha se han realizado una infinidad de estudios los cuales están aislados y no existe una base de datos documental que los integre, por lo que no se pueden tomar decisiones oportunas y prontas para definir el potencial hídrico, reubicar nuevas fuentes de abastecimiento y prevenir riesgos geológicos e hidrogeológicos. Por tal motivo, surge la necesidad de integrar el conocimiento hidrogeológico y plantear alternativas para ampliarlo y documentarlo. Para su planteamiento, es necesario entender la problemática desde su raíz y tomar en consideración las restricciones asociadas a la falta de presupuesto, de visión, de espacios y de permisos para realizar mediciones indirectas y directas. Otros problemas que se presentaron durante la realización del trabajo fueron la seguridad y los efectos de la pandemia por COVID.

La propuesta se realiza en conceptualizar la situación hidrogeofísica presente, con base en información disponible, su análisis y reprocesamiento, para apoyar a una caracterización hidrogeológica, definir acciones para actualizar el conocimiento; así como, proponer actividades que conlleven a definir el potencial hidrogeológico y un manejo integral del recurso, que sirva de apoyo para una mejor toma de decisiones, tanto para el personal técnico, como para las autoridades y población.

La organización y desarrollo del conocimiento para las empresas o instituciones que tienen como función operar, mantener y administrar las fuentes de abastecimiento de agua subterránea y superficial, así como las redes de conducción y distribución y los sistemas de saneamiento, entre otros, requiere de una estrategia en donde se ordenen los elementos que lo crean, orientado a la generación de valor para dar sostenibilidad al recurso y estar en armonía con el medio ambiente.

Lo anterior conlleva a la necesidad de plantear una serie de procedimientos que permitan entender la ocurrencia, cantidad, calidad, manejo, distribución, problemáticas, reúso, aprovechamiento y protección del agua, como el elemento único en la generación de valor de un proyecto de inversión, orientados al manejo y a la administración del agua. Para ello, es necesario tener el conocimiento relacionado con el tema, o bien, generarlo para que permita lograr la sostenibilidad del medio ambiente y contar con los elementos de juicio suficientes en la toma oportuna de decisiones. Bajo este contexto, el conocimiento del agua y su manejo se ve afectado

por la falta de información organizada, actualizada, capacitación del personal, y sobre todo por la falta de comunicación y compartición del conocimiento que genera su capital intelectual, al no tenerse documentado, consolidado, dictaminado y resguardado.

Si bien se cuenta con un “amplio” conocimiento, la experiencia indica que está disperso, almacenado en estudios (escritos o en discos magnéticos) y su “*Know How*”, en la mente de los técnicos encargados de generarlo y aplicarlo. Esto implica la no existencia de una metodología sistemática que permita la adecuada documentación y dictaminación del diseño de los proyectos exploratorios y de inversión. Lo anterior no permite consolidar una estrategia robusta para afrontar los retos y responsabilidades con eficacia y eficiencia, ya que en ocasiones se tienen que repetir los trabajos, lo que se traduce en erogaciones económicas extraordinarias. El contar con el conocimiento organizado y ordenado permite, tener un mejor control de los proyectos, ser más eficientes, reducir los riesgos de incertidumbre y, sobre todo, optimizar el recurso económico y lograr cada vez mejores resultados.

La disponibilidad del agua, en cantidad y calidad, se ve afectada por el crecimiento desordenado de la población que demanda caudales adicionales e infraestructura para sustentar su desarrollo socioeconómico y por las condiciones hidrogeológicas; también, hay que considerar la falta de cultura en la población para aprovecharla racionalmente. Sobre este último punto hay que recalcar que si bien en algunas partes de la alcaldía el recurso no se distribuye de manera continua; a pesar de esta situación, la cultura del agua no ha permeado y se continúa con un gran despilfarro. El planteamiento de una administración del agua eficaz y eficiente, la educación es un pilar fundamental; situación que demanda una cultura de acceso a la información y comunicación permanente entre los diversos usuarios. En cuanto a la calidad del agua se ve muy deteriorada también, tanto por cuestiones naturales como antropogénicas.

Un aspecto que se debe tomar en cuenta es que tanto la alcaldía como la Cuenca de México (CM) se ubican en los límites del parteaguas continental, en una subcuenca cerrada donde se presenta material lacustre que reduce la capacidad de infiltración del agua al subsuelo.

El conocimiento hidrogeológico dentro de los límites de la alcaldía es reducido, se basa en estudios a nivel cuenca y de algunas perforaciones de pozos que se ubican en las estribaciones de las sierras o bien, son muy profundas, ubicadas hacia el poniente de la alcaldía. La información del organismo rector del agua no está actualizada y se cuenta con estudios a nivel científico realizados por institutos de investigación a nivel regional, profundo y superficial. Hay que tomar muy en cuenta que la administración del agua no es competencia de la alcaldía, sino

del Gobierno de la Ciudad de México a través de Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX); sin embargo, esto no limita que esta propongamos, con base en el conocimiento de su territorio, algunas acciones que de manera conjunta ayuden a solucionar la problemática del agua.

El contar con la información expedita sobre la situación actual sustentará un manejo y predicción del futuro del recurso, lo que permitirá a las autoridades de la administración del agua en la alcaldía y del SACMEX, identificar los proyectos prioritarios que estén orientados a solucionar la problemática del agua. La organización y desarrollo del conocimiento requiere de una serie de acciones concretas que permitan generarlo, entenderlo y administrarlo, por lo que es necesario contar con el apoyo de técnicos especialistas, de tecnología actualizada y de procesos. Todo lo anterior debe estar integrado en una plataforma informática que visualice la información y sea la herramienta donde se documenten las acciones para la toma de decisiones.

El entendimiento del ciclo del agua, si bien parece sencillo, es un proceso complejo que involucra una serie de elementos y factores que demandan un conocimiento general y particular en cada una de las partes que lo componen, donde el factor humano es un elemento que puede deteriorarlo o conservarlo. Hoy en día, el conocimiento de las áreas por donde transita el agua superficial y subterránea requiere de entenderse como una unidad de manejo “cuenca hidrográfica” que, aunque constituye un sistema complicado de organización, funcionamiento, temporalidad o dimensión espacial, ayuda a conocer los mecanismos del sistema, tarea muy difícil en donde entra la dimensión de la diversidad de los problemas, aquellos que no tienen solución con los medios y conocimiento actual. Sin embargo, es posible avanzar en su conocimiento al examinar subsistemas y obtener representaciones parciales, aunque no perfectas; este objetivo es importante porque el ser humano altera las condiciones del sistema al mismo tiempo que forma parte de él. Para avanzar en la sustentabilidad es necesario tomar buenas decisiones y tener buenos planes para usar los recursos disponibles en el sistema, basándose en una buena información.

1.2. Objetivos

1. Evaluar, con base en la información disponible, las condiciones hidrogeológicas e hidrogeofísicas que se presentan en la alcaldía Iztapalapa.
2. Identificar las fortalezas y debilidades del conocimiento hidrogeológico e hidrogeofísico que se tiene.
3. Proponer acciones, que apoyen y propicien, la adquisición de nuevo conocimiento, en específico geofísico, que permita plantear estrategias para dar sostenibilidad al agua subterránea.

1.3. Alcance

Al contar con una caracterización hidrogeológica soportada se tendrán elementos técnicos para la toma de decisiones oportunas.

Capítulo 2. Contexto

En todo proyecto de inversión relacionado con el agua requiere de un conocimiento del entorno físico, geológico, ambiental social, político, financiero y económico, apoyado con políticas, normatividad y legislación del agua, administración del conocimiento y una plataforma informática estandarizada. Al contar con la información que proveen estos elementos, se pueden plantear y proponer soluciones acordes a la situación y condiciones que se presenten.

Cabe mencionar que cualquier proyecto de inversión relacionado con el agua lo que se busca es contar con la mayor información sobre la situación hidrogeológica del sitio, para reducir la incertidumbre e incrementar el éxito exploratorio y aclarar que la ocurrencia de agua en el subsuelo, no se garantiza, dependerá de la mejor conceptualización y caracterización. Al contar con una caracterización hidrogeológica soportada se tendrán elementos técnicos para la toma de decisiones oportunas.

2.1. Marco geográfico

Iztapalapa es una de las 16 alcaldías que conforman el territorio de la Ciudad de México, situada al oriente de esta. Según el mapa de riesgos de Iztapalapa (Secretaría de Protección Civil, 2014), ocupa el 7.5 % del territorio de la Ciudad de México; se ubica entre los paralelos 19° 24' N, 19° 17' N y los meridianos 99° 58' W, 99° 08' W, y su extensión territorial es de 116.67 km². Colinda al norte con la alcaldía Iztacalco, al sur con las alcaldías Tláhuac y Xochimilco, al poniente con la alcaldía Coyoacán y al oriente con el estado de México (ver Figura 1). Para mayor referencia la alcaldía se encuentra ubicada dentro de la carta topográfica del INEGI, escala 1:50,000 clave E14A39, Ciudad de México.

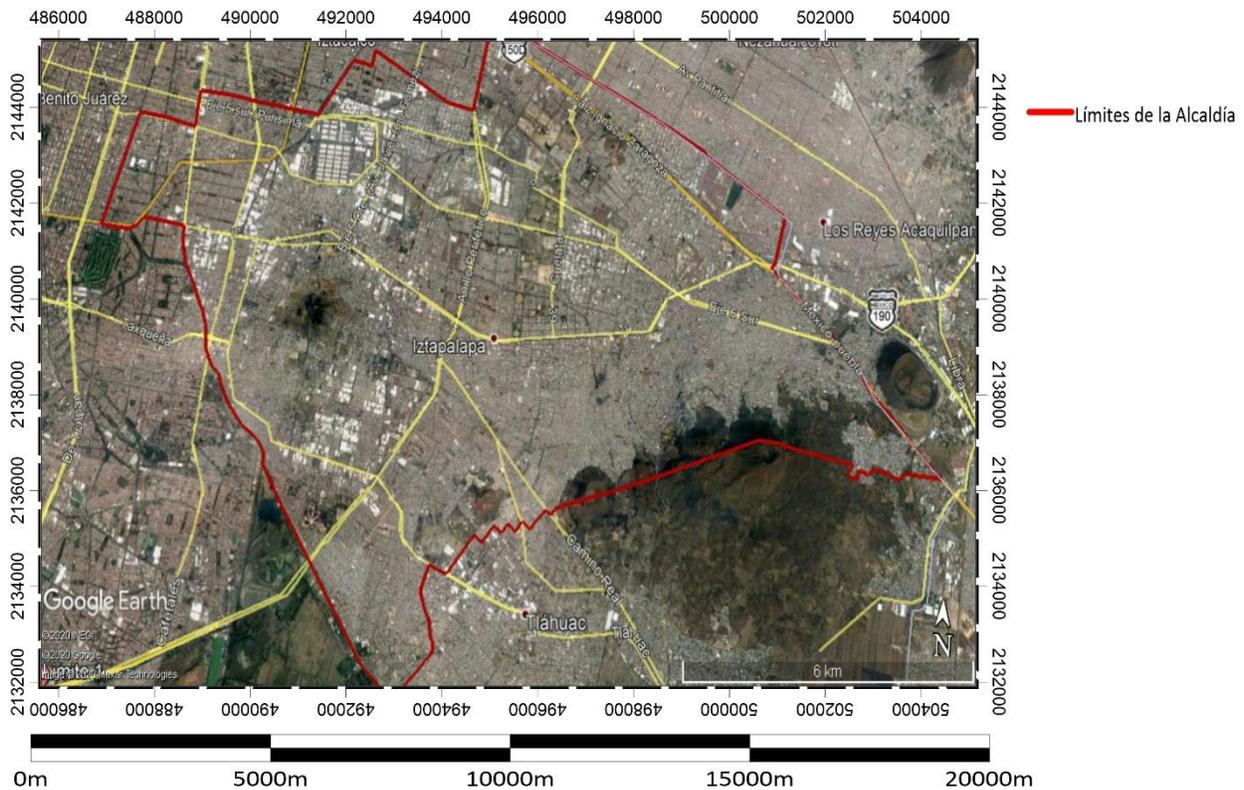


Figura 1. Localización de la alcaldía de Iztapalapa (UTM WGS84 ZONA 14 N). Tomado de Google earth (2021), elaboración propia.

Las principales vías de acceso son las avenidas Ignacio Zaragoza, que va en paralelo a los ejes viales 5 y 6 sur y conecta con la autopista México-Puebla. Eje 5 oriente (Av. Javier Rojo Gómez) conecta al poniente con la avenida Ermita-Iztapalapa, y los ejes 5 y 6 sur. Anillo Periférico Oriente, que atraviesa la alcaldía de norte a sur y tiene conexiones al norte con los ejes 5 y 6 sur, y la calzada Ignacio Zaragoza, y al sur con la calzada Ermita-Iztapalapa. La calzada Ermita-Iztapalapa atraviesa la alcaldía de oriente a poniente y tiene conexión al oriente con la calzada Ignacio Zaragoza. También, se puede ingresar desde la avenida Tlahuac, misma que conecta a la alcaldía de Tláhuac con la alcaldía de Iztapalapa, y a su vez conecta con la parte poniente de la calzada Ermita-Iztapalapa y cruza el Anillo Periférico Oriente en el sur de la alcaldía (ver Figura 2).

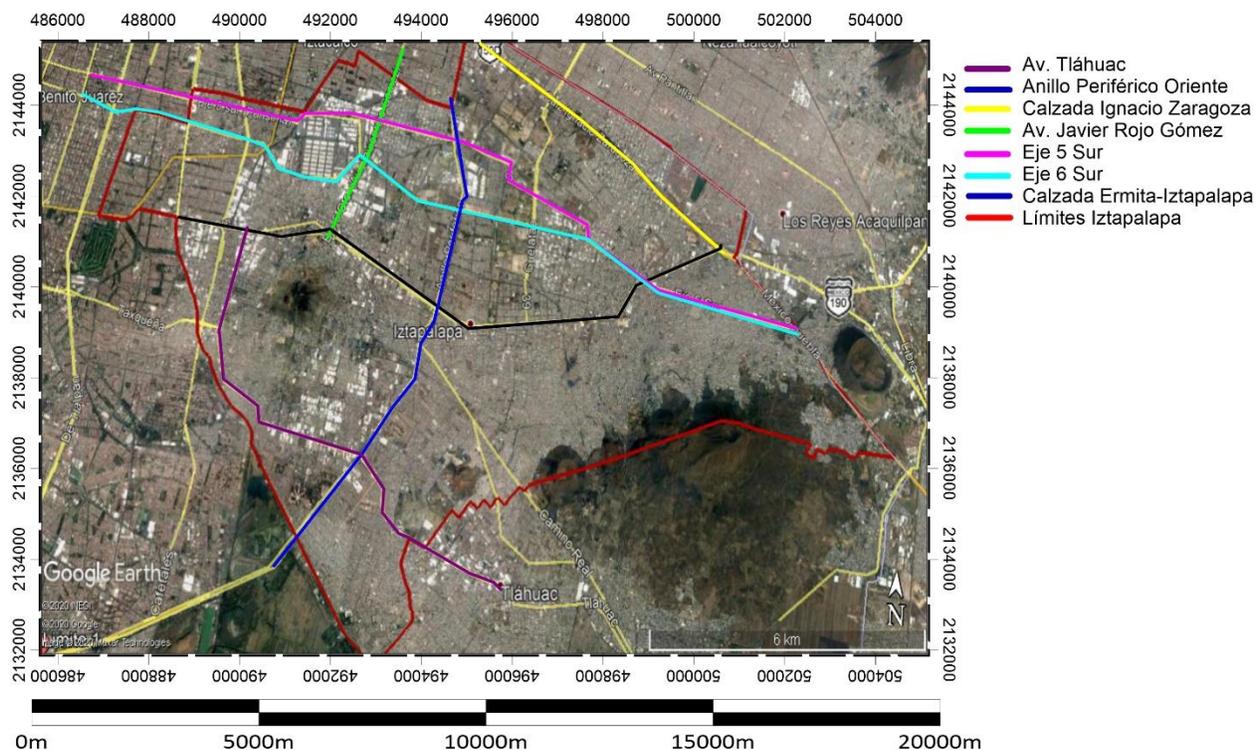


Figura 2. Vías de acceso a la alcaldía Iztapalapa. Tomada de Google Earth (2021) elaboración propia.

2.2. Marco hidrológico

Iztapalapa se ubica dentro la Cuenca del Valle de México (CM), que a su vez se encuentra en la Región Hidrológica No. 26 Pánuco. Administrativamente está dentro de la Región Hidrológico-Administrativa VII Aguas del Valle de México.

La CM es considerada una cuenca de tipo endorreica, ubicada en las coordenadas geográficas de los siguientes vértices: $19^{\circ}2'48.05''N$ $98^{\circ}38'17.34''O$, $19^{\circ}34'54.96''N$ $99^{\circ}30'44.70''O$, $20^{\circ}10'53.85''N$ $98^{\circ}43'41.99''O$ y $19^{\circ}40'19.90''N$ $98^{\circ}12'9.53''O$, abarcando una porción del Estado de México y Tlaxcala, así como la mayoría del territorio de la Ciudad de México.

Anteriormente, la región del Valle de México era conocido como región de lagos Anáhuac, los cuales, deben su formación al cierre de la cuenca debido a la formación de la Sierra del Ajusco.

La mayoría de los ríos y lagos existentes en la Ciudad de México están entubados y ubicados en la parte poniente de la Ciudad, por lo que en Iztapalapa existen nulas fuentes de agua superficial, y la mayor parte del agua que abastece a su población proviene de mantos acuíferos y de fuentes externas. Por mencionar algunas fuentes superficiales se encuentran el Canal de Chalco, río Churubusco y el Canal de Garay, cuya afluencia de agua es nula o contiene agua contaminada.

La alcaldía cuenta con escasos, o nulos, patrones de drenaje en sus elevaciones. Los más destacados son aquellos que se encuentran marcados en la Sierra de Santa Catarina, los cuales, presentan un comportamiento de drenaje de tipo radial. Estos fluyen en todas direcciones desde los conos de los volcanes presentes en la Sierra, hasta la parte baja de la misma. Las elevaciones dentro de Iztapalapa pueden formar una microcuenca, por ello son consideradas zonas de recarga en esta porción del Acuífero de la Cuenca de México (CM).

Una de las consideraciones a tomar para el presente trabajo es que, la superficie de la alcaldía es mayormente plana, no existen más cambios de elevación salvo las que se presentan en el relieve de esta. Agregado a ello, las corrientes superficiales con las que cuenta son escasas o nulas, por lo tanto, en condiciones naturales, la zona de estudio puede considerarse como una zona de alta evaporación y de nula infiltración. Si hubiera poca infiltración, esta no está llegando a recargar del acuífero, si no que se está yendo hacia el drenaje sanitario de la alcaldía.

En Iztapalapa, existe una variedad de microclimas distribuidos a lo largo de la misma. Los climas identificados son templado subhúmedo, seco templado y semifrío-semiseco, según los datos del INEGI. El clima que predomina en la demarcación es el templado subhúmedo.

La temperatura media anual oscila entre 16.5 y 18.05°C. Para el cálculo de la temperatura máxima, mínima y media anual promedio, se hizo uso de seis estaciones climatológicas dentro de la alcaldía y aledañas a ella, consultadas en la página de la Secretaría del Medio Ambiente. Dichas estaciones climatológicas, registran mediciones del año 1951 a 2010. La temperatura media promedio es del orden de los 17.2 °C.

En la tabla 1 se agrupan las seis estaciones consideradas con su promedio de temperatura anual correspondiente al periodo mencionado anteriormente.

Tabla 1. Temperatura máxima, media y mínima anual, registrada de 1951 a 2010.

ESTACIÓN	TEM MAX AN	TEM MED AN	TEM MIN AN
AGRICOLA ORIENTAL	25.1	17.35	9.6
IXTACALCO	25.3	16.3	7.3
LOS REYES	24.6	16.5	8.4
MORELOS 77	25.6	17.3	9
PLAYA CALETA 454 COLONIA MARTE	25.3	17.7	10.1
UNIDAD MODELO	27.3	18.05	8.8
PROMEDIO	25.53	17.2	8.9

En cuanto a la precipitación (ver tabla 2), con base en la información de las estaciones mencionadas, se obtuvo un valor promedio de 621.45 mm, registrando los mayores volúmenes de precipitación en el periodo que comprende los meses de junio a septiembre.

Tabla 2. Precipitación media anual registrada de 1951 a 2010.

ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (mm)
AGRICOLA ORIENTAL	549.6
IXTACALCO	604.9
LOS REYES	509.9
MORELOS 77	608.2
PLAYA CALETA 454 COLONIA MARTE	735.5
UNIDAD MODELO	720.6
PROMEDIO	621.45

Para fines del presente trabajo, se realizó el cálculo del volumen de precipitación anual tomando en cuenta la precipitación media anual y el área de estudio, obteniendo un resultado del orden de 72, 504,571.5 m³ anuales. Para el cálculo se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Vol. de Pre. Anual} = \text{área de la zona}(\text{m}^2) * \text{Precipitación media anual}(\text{m})$$

$$\text{Vol. de Pre. Anual} = 116670000 \text{ m}^2 * 0.62145 \text{ m} = 72,504,571.5 \text{ m}^3$$

Hay que considerar que la zona de la alcaldía se ubica, en su mayoría, en una pendiente nula, salvo en los terrenos de las elevaciones mencionadas anteriormente. Está asentada en una zona lacustre con mucha porosidad y con casi nula permeabilidad y, además, la mancha urbana ha reducido el área de posible infiltración, lo cual se cuenta con un volumen de agua superficial que puede ser aprovechable, ya sea para infiltración o bien, para captación. Esta situación favorece el encharcamiento y zonas de inundación.

Para tener una idea de la cantidad de agua proveniente de las precipitaciones, que se puedan infiltrar o evaporar hacia el subsuelo de Iztapalapa, es necesario recurrir al coeficiente de escurrimiento de la zona. Según datos de INEGI, el coeficiente de escurrimiento es del 10 al 20% en la zona urbana (planicie lacustre), y del 5 al 10% en la zona de lomas.

El volumen calculado de agua potencial que se puede infiltrar, aprovechar o evaporar en la alcaldía es de 65, 254,114.35 m³ en la zona urbana, y del 58, 003,657.2 m³ en las zonas del cerro de la Estrella y la sierra de Santa Catarina. El cálculo se realizó de la siguiente manera:

$$\text{Vol. infil. y evap.} = \text{Vol. de Pre. Anual} - (\text{Vol. de Pre. Anual} * \text{Coefdeesc.})$$

La suma total es del orden de los 3,900 lps, con los cuales se podría solucionar la falta de agua en la alcaldía.

La infraestructura con la que se cuenta para abastecer a la alcaldía consta de 80 pozos de extracción que aportan 1.3 m³/s, más tres tanques de almacenamiento y abastecimiento: Tanque la Caldera con un caudal que proviene del Sistema Cutzamala (0.7 m³/s), Tanque Xaltepec (0.6 m³/s) y Tanque Cerro de la Estrella (1.8 m³/s); además del acueducto Santa Catarina (0.7 m³/s), (Iztapalapa, 2007). Como medidas de auxilio se tiene el abastecimiento mediante pipas de agua potable (en promedio 0.039 m³/s), derivado de que el abasto se proporciona sólo algunas horas al día (“tandeo”) en 68 colonias, es decir, en el 21.3% del área de la alcaldía, (DI, 2007).

2.3. Marco geológico

Para la evaluación del presente trabajo, es de suma importancia conocer las condiciones geológicas, tanto regionales como locales, que caracterizan al suelo y subsuelo de la zona de estudio en cuestión.

La alcaldía Iztapalapa se ubica en la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) que Demant (1978), define como un conjunto de diferentes áreas volcánicas. Manuel Álvarez (1961), denomina a esta provincia como Zona de Fosas Tectónicas y Vulcanismo Reciente, la cual se caracteriza por predominar derrames basálticos, numerosos volcanes y lagos, cuya morfología, orientación y distribución, sugieren estar ubicados dentro de fosas tectónicas. Así como también, por la presencia de lagos, específicamente en la zona que se está evaluando. Lo que le da un rasgo hidrogeológico distintivo a la zona, que será tratado más adelante.

La zona de valles en la FVTM anteriormente eran cuencas lacustres profundas, que se han ido rellenando de material fluvial y lacustre, derivado de las montañas y también, de enormes masas de ceniza, provenientes de las erupciones de los volcanes (Álvarez, 1961).

La geología que describe Álvarez (1961), está constituida por riolitas, dacitas, andesitas y traquitas. Estas se encuentran recubiertas generalmente de basalto, que son los constituyentes de las masas montañosas de la faja. Localmente, el área de estudio comprende una planicie de tipo lacustre rodeada por un conjunto de elevaciones arriba del orden de 2,300 msnm, que corresponden a los Cerros de la Estrella, Peñón del Marqués y a la Sierra de Santa Catarina, cuya geología corresponden a rocas de tipo ígneo extrusivas.

La descripción de esta se hace tomando en cuenta diversos artículos y trabajos relacionados con la Cuenca de México (CM) y la alcaldía Iztapalapa.

La CM es una cuenca de tipo endorreica perteneciente a las planicies escalonadas (Lugo-Hubp, 1984) de la FVTM. Es una extensa altiplanicie lacustre con altitud promedio de 2,240 msnm Se encuentra rodeada por sierras, abanicos y llanuras aluviales. Cuenta con una superficie aproximada a los 9,540 km² alargada en dirección NNE-SSW, una longitud de 100 km y un ancho del orden de los 30 km (de Cserna et al., 1988). Al norte limita con la Sierra de Pachuca, al sur limitada por la Sierra Chichinautzin, al oriente limitado por la Sierra Nevada y al occidente cerrada por la Sierra de las Cruces.

La Sierra de las Cruces, en el límite occidental de la CM está conformada por ocho estratovolcanes con alturas superiores a los 3,000 msnm (García-Palomo, et al., 2008). Consta de una longitud de 110 km, un ancho de 47 km en la parte norte y 27 km en la parte sur.

La Sierra Chichinautzin es el límite sur de la CM es un área volcánica de 2,400 km², conformada por más de 200 aparatos volcánicos monogenéticos clasificados como conos de escoria, volcanes tipo escudo y domos de lava (Velasco-Tapia, et al., 2001), alineados en una dirección preferencial E-O (Humboldt, 1849).

La Sierra Nevada corresponde al límite oriental de la CM, cuenta con una extensión de 45 km con dirección preferencial N-S (Macías, J.L, et. al.,2012), con alturas superiores a los 4,000 msnm Alberga los volcanes el Popocatepetl (5,252 m) e Iztaccíhuatl (5,272 m) y varios respiraderos volcánicos como los volcanes Telapón (4,000 m) y Tlaloc (4,150 m) (Macías, J.L, et. al.,2012).

La parte norte de la CM se ubica la sierra de Pachuca, con base en el análisis de formas en mapa digital de *Google Earth*, las elevaciones no sobrepasan los 3,000 msnm, con una dirección preferencial NW-SE y una longitud aproximada a los 25 km. Se aprecian cuerpos suaves con pendientes no pronunciadas. Las formas de relieve se pueden catalogar como cerros y lomas.

La geomorfología se compone por topoformas de sierra, loma y llanura. La zona de sierra está conformada por la elevación de la Sierra de Santa Catarina, caracterizada como relieve endógeno de tipo volcánico acumulativo, formado por un conjunto de conos volcánicos catalogados como conos cineríticos, alineados en dirección E-NE (Lugo-Hubp, et al., 1994); con una altura máxima del orden de los 2,700 msnm y una extensión de 12 km, que cubre una superficie de 75 km². Tiene la característica de presentar una alta porosidad y desde el punto de vista hidrogeológico se le considera como zona de recarga; por otra parte, la alta concentración de población en esta zona favorece también la infiltración de sustancias nocivas para la salud humana al entrar en contacto con el agua del acuífero.

La zona de lomas está caracterizada por dos cuerpos importantes, el Cerro de la Estrella, cuya altura es del orden de los 2,400 msnm, ligeramente alargado hacia el norte; y el Cerro Peñón del Marqués, con una altura del orden de los 2,300 msnm. Estos edificios volcánicos son catalogados como volcanes monogenéticos, definidos como conos cineríticos terminales, nombrados como volcanes escudo (Vázquez S., et al. 1989) y se consideran como eventos aislados. También, por la condición hidrogeológica que presenta, es una zona de recarga y se favorece la infiltración de contaminantes.

La zona de llanura corresponde a la planicie lacustre del Valle de México y los depósitos aluviales, con elevación del orden de los 2,200 msnm representa la zona urbana de la alcaldía. Desde el punto de vista hidrogeológico y por su condición actual es una zona impermeable, tanto por la infraestructura urbana como por las condiciones geológicas, alto contenido de arcilla, lo que provoca que el agua subterránea esté confinada; sin embargo, los movimientos diferenciales del terreno ocasionan afectaciones a la infraestructura civil y también favorecen la contaminación en algunos horizontes de suelo.

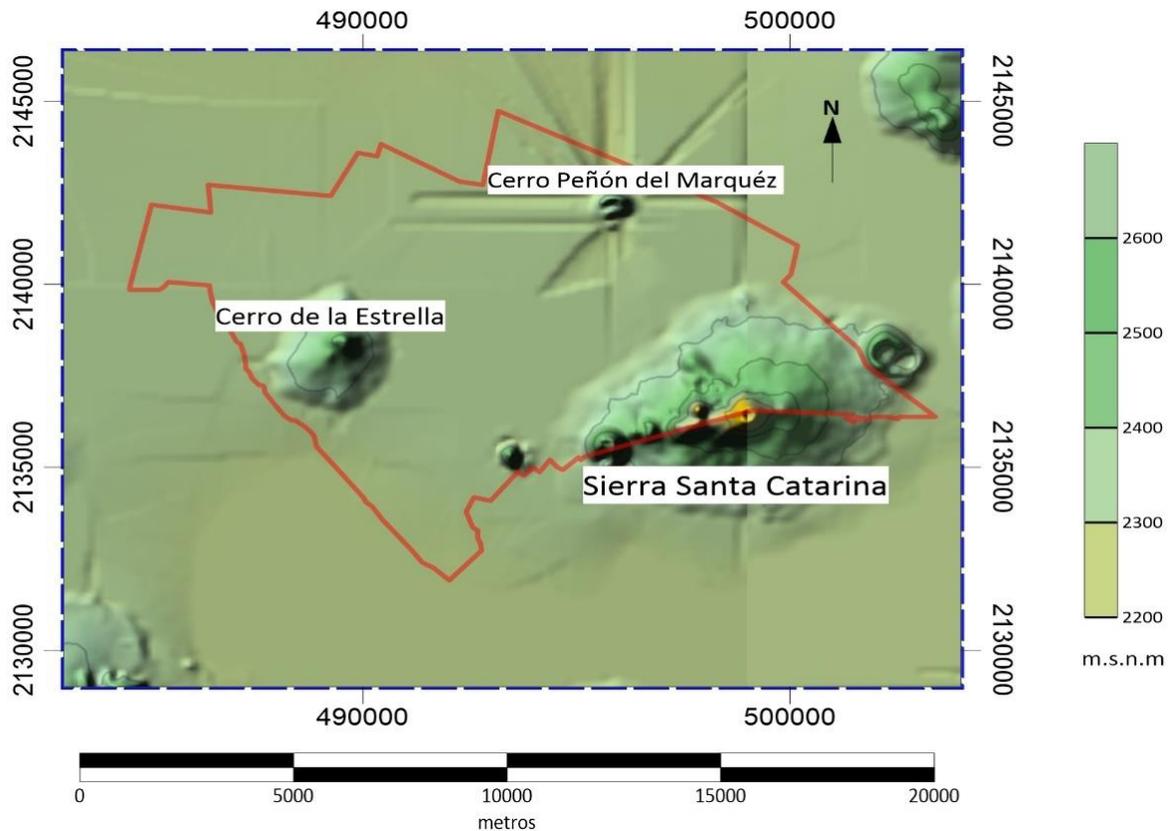


Figura 3. Relieve de la Alcaldía de Iztapalapa. Elaboración propia.

En lo relativo a las unidades litológicas que se presentan en la CM, Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989), realizan una descripción de la geología de la CM. Por su parte, Padilla y Sánchez (1989) considera que el basamento está conformado por rocas del Oligoceno hasta eventos recientes, pero, perforaciones de pozos profundos por parte de PEMEX en el año de 1986, demuestran que también se debe incluir en la columna estratigráfica rocas del Cretácico.

Cretácico

Las rocas del cretácico son las más antiguas en la CM, conformadas por secuencias de roca caliza, pertenecientes a las formaciones Xochicalco (Fries, 1960, citado por Vázquez S., et al. 1989) con espesor del orden de los 500 m, la formación Morelos con espesor de 900 m adelgazándose de oriente a poniente; la formación El Doctor, con espesor de 200 m; la Formación Cuautla con espesores variantes entre los 200 a los 750 m y una interestratificación rítmica de grauvacas, limolitas y lutitas, con espesores máximos de 1,500 m pertenecientes a la formación Mezcala. (Fries, (1960), citado por Vázquez S., et al. 1989). Evidencias de los pozos profundos Mixhuca-I y Tulyehualco-I, perforados por PEMEX, identifican estas unidades de caliza, por debajo de los 1,750 m de profundidad.

Paleógeno-Neógeno

Las primeras rocas identificadas en este periodo corresponden a depósitos continentales del Eoceno-Oligoceno (Fries, 1960, citado por Vázquez S., et al. 1989). Schlaepfer (1968) (citado por Vázquez S., et al. 1989), caracteriza esta formación como un conglomerado calizo cubierto de limolita calcárea, seguido de una serie de derrames basálticos con intercalaciones de tobas y aglomerados, correspondientes a la formación Balsas.

Las siguientes unidades agrupan rocas de tipo andesítico, derrames lávicos basálticos, tobas líticas y cristalinas, así como brechas tobáceas y aglomerados correspondientes al Oligoceno Tardío y Mioceno Temprano; tobas, brechas volcánicas y lavas de composición andesita-dacita correspondientes al Mioceno Medio-Tardío; depósitos volcánicos del Plioceno Temprano de composición andesítica-dacítica, tobas cristalinas, vítreas y pumíticas, cubiertas por derrames lávicos; flujos piroclásticos, secuencias de “surges”, intercalaciones de brechas volcánicas con coladas lávicas de composición andesítica-dacítica de la parte temprana Plioceno Tardío correspondientes a la formación Otomí (Vázquez-Sánchez et al., 1989); rocas máficas, del Plioceno Tardío constituidas por derrames lávicos interestratificados de composición basalto-andesítico (Geyne. al., 1963); depósitos piroclásticos de la Formación Las Cruces; Lavas de tipo

andesítico correspondientes a la Formación Zempoala (Vázquez-Sánchez et. al.,1989); secuencias riolíticas de derrames lávicos correspondientes a la “Riolita Navajas” (Geyne. al.,1963), y depósitos piroclásticos y clásticos aluviales no diferenciados del Plioceno.

Cuaternario

En este periodo se presentan secuencias eruptivas de composición andesítica-riodacítica del Pleistoceno Temprano correspondientes a la formación Llano Grande (Vázquez S., et al. 1989); derrames lávicos de composición andesítica-basáltica, con intercalaciones de tefra no consolidada de composición andesítica-basáltica (Vázquez S., et al. 1989) correspondientes a la formación El Pino, con un espesor máximo de 750 m; coladas lávicas (Schlaepfer,1968, citado por Vázquez S., et al. 1989) de composición latítica, dacítica y andesítica (Sheridan, 1979, citado por Vázquez S., et al. 1989) con espesores aflorantes de 1800 m correspondiente a la formación Tlaloc; derrames lávicos y extrusiones dómicas de composición andesítica, basáltica y dacítica pertenecientes a la formación Iztaccíhuatl (Schlaepfer, 1968, citado por Vázquez S., et al. 1989); un “blast” piroclástico con cristales de tamaño ceniza y lapilli (Shreidan, 1979), sucesiones piroclásticas de eventos plinianos formada por lapíllis de pómez y líticos accidentados, adensitas y dacitas, efusiones andesíticas y periodos efusivos de pómez y cenizas plinianas. Flujos no consolidados de ceniza y bloques pumíticos (Robin y Boudal, 1979, citado por Vázquez S., et al. 1989), que conforman las etapas eruptivas de la formación Popocatepetl (Carrasco, 1985, citado por Vázquez S., et al. 1989); Lavas vesiculares masivas de composición andesítico-Basáltica y andesitas (Vázquez S., et al. 1989) correspondientes a la formación Chichinautzin; Depósitos aluviales poco consolidados con tamaño de grava, arena, limos y arcillas, y depósitos lacustres. Mooser (2014a) describe una estratigrafía general para la CM (ver figura 4), aunque ya ha realizado trabajos previos en dicha zona. Con fines de los objetivos de este trabajo, se les asigna una permeabilidad, con base en su origen y forma de depósito La estratigrafía propuesta es la siguiente:

1. Depósitos lacustres superficiales, sobreyacen depósitos aluviales con lavas fenoclasticas del cuaternario. (semipermeable).
2. Vulcanitas cuaternarias, (permeable).
3. Arcillas lacustres Taxhimay, probablemente del Plioceno Inferior, (Impermeable).
4. Depósitos aluvio-fluviales que sobreyacen con lavas y tobas emitidas en el Mioceno. (semi permeable).
5. Vulcanitas del oligoceno. (permeable).

6. Depósitos aluviales, con algunas lavas y tobas de la Formación Balsas del Terciario Inferior. (semi impermeable).
7. Lutitas, areniscas y calizas, del Cretácico Superior e Inferior. (impermeable).

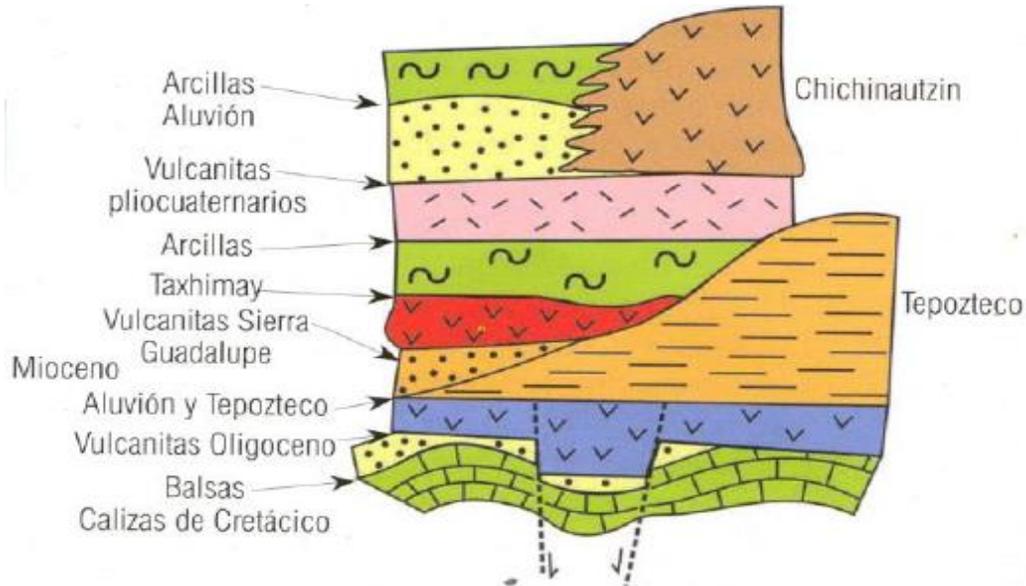


Figura 4. Estratigrafía general de la Cuenca de México (CM) propuesta por Federico Mooser, Tomada de IC Ingeniería Civil (2014).

Las características estratigráficas del subsuelo de la alcaldía Iztapalapa son similares a las del resto de Valle de México (Padilla y Sánchez, 1989). Se observa una extensa planicie formada por depósitos aluviales y depósitos lacustres del Valle de México. Los edificios volcánicos presentes son: el Cerro de la Estrella, catalogado como volcán escudo compuesto por lavas máficas de edad Plio-Cuaternario (Carreón, 2011 , Vázquez-S. et al. 1989) y basaltos cubiertos superficialmente por tobas, producto de lluvias de ceniza y pómez (Mooser, 2014b), ubicado dentro del grupo de rocas que conforman la formación El Pino (Vázquez-S. et al. 1989); El Cerro Peñón del Marqués, es un cono volcánico de escoria, rocas piroclásticas y lavas, con dimensiones similares a los conos volcánicos de la Sierra de Santa Catarina, de forma elíptica con orientación E-W (Carreón, op. cit.); y la Sierra de Santa Catarina, que está formada un conjunto de volcanes monogenéticos alineados en dirección ENE, está constituida por rocas volcánicas, que consisten en derrames de lava y tefra (Lugo-Hubp, et. al, 1994) y es catalogada como contemporánea de la sierra de Chichinautzin (Mooser, 1975).

El mapa geológico de la alcaldía Iztapalapa se observa en la Figura 5.

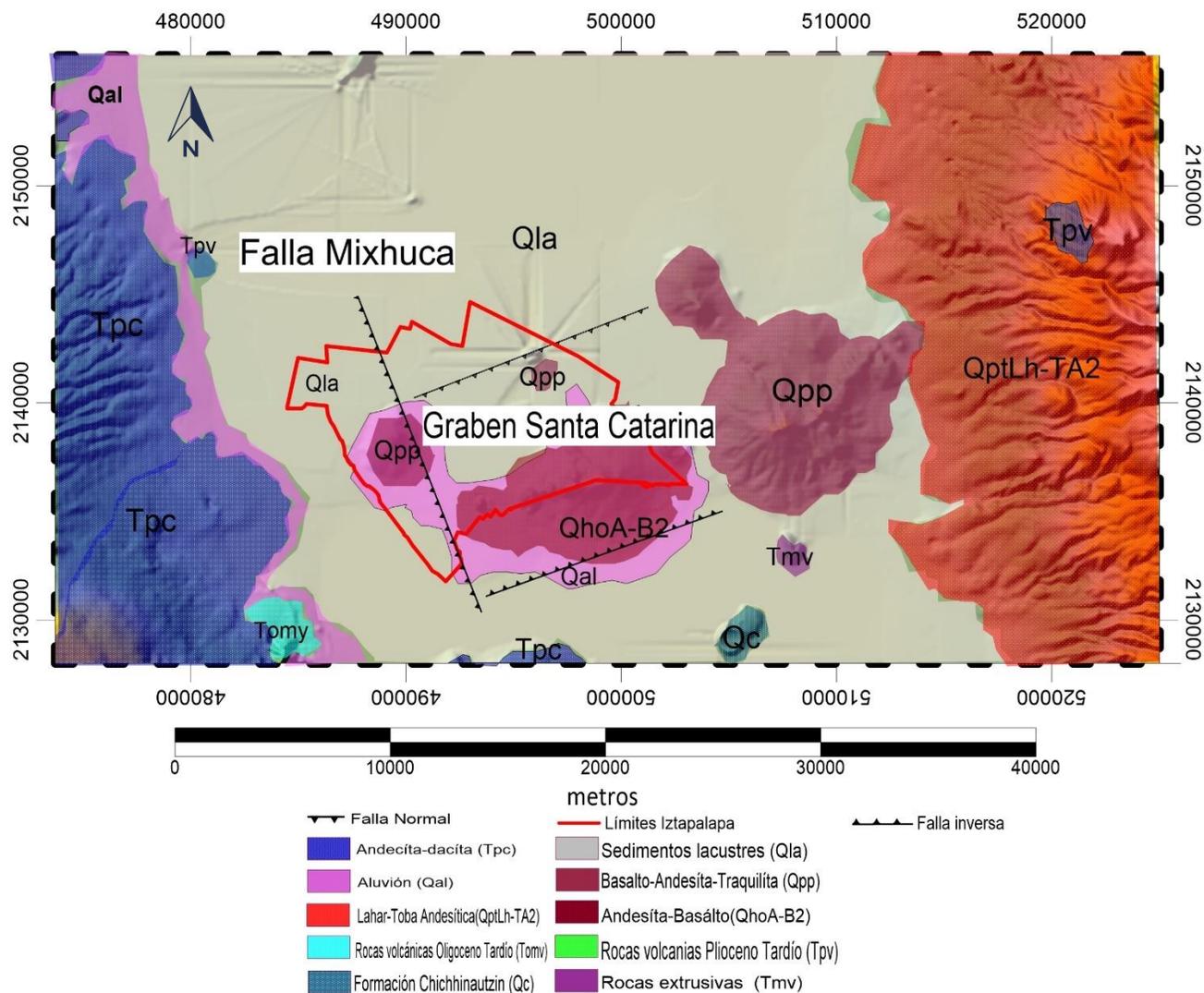


Figura 5. Mapa geológico de la Ciudad de México. Modificado de Vázquez-Sánchez et. al., (1989). Se agregan las fallas Mixhuca identificada por Pérez-Cruz, (1998) y el graben de Santa Catarina propuesto por Arce et. al., 2013a.

En lo relativo a la geología estructural, para obtener los datos estructurales se consultó a varios autores, entre ellos Vázquez S. (1989), Arce, et al. (2013a) y Pérez-Cruz (1988) y Carreón Freyre (2011). Los primeros autores generaron una propuesta de las fallas existentes en la zona, ubicándolas en la sierra de Santa Catarina (falla normal intuida) NE-SW, y otra en las cercanías del cerro de la Estrella, extendiéndola hasta el cerro del Peñón en la misma dirección que la falla de Santa Catarina.

Esto da pie a que Arce et. al., (2013a), propusiera el graben de Santa Catarina conforme al estudio realizado en el pozo profundo San Lorenzo Tezonco. Esta propuesta ayudaría a explicar por qué no se registró la unidad de calizas del Cretácico en el pozo San Lorenzo Tezonco que,

en los pozos profundos Mixhuca-I y Tulyehualco-I. Sí se tiene contemplada en el registro de pozo y a la interpretación de los datos gravimétricos.

La otra falla identificada en la zona es descrita por Pérez-Cruz (1998), con ayuda de sísmica de reflexión y registros geofísicos de pozos, es la falla Mixhuca. La falla tiene una dirección NW-SE, y pasa por la zona donde se ubica el cerro de la Estrella, es definida como una falla inversa sepultada, situada en las calizas del Cretácico.

2.4. Marco geofísico

La información sobre este tema es escasa, la existente se refiere a estudios a nivel cuenca y a estudios muy focalizados a escala somera para identificar condiciones de fracturamiento, hundimiento del terreno y fracturas superficiales que se han generado por la explotación intensiva del acuífero y compactación del suelo.

Para los fines de investigación profunda se hará el análisis y reinterpretación, en su caso, de información gravimétrica y sísmica de reflexión. A nivel superficial, información de estudios de información eléctrica.

Como ya se indicó, al no poder realizar exploraciones directas, en estos momentos, se hace un análisis de la información disponible con fines de evaluación la estructura del subsuelo. El análisis que se realiza se refiere a estudios realizados por el Instituto Nacional de Investigación Científica en 1950, Comisión Federal de Electricidad (1988), Petróleos Mexicanos (1988), y de estudios a nivel muy local con fines de ubicar o reubicar nuevas fuentes de abastecimiento de agua realizados principalmente por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX).

2.4.1. Gravimetría del Valle de México 1951

Para la parte de gravimetría, se realiza el reprocesamiento de los datos gravimétricos del levantamiento realizado en 1950-1951, encargado al ingeniero Guillermo Hernández Moedano, por parte del Instituto Nacional de Investigación Científica. Se contó sólo con el mapa de anomalía de Bouguer el cual se digitalizó para hacer una interpretación de las estructuras del subsuelo. Cabe mencionar que solo se realiza el análisis a la porción correspondiente a la zona de estudio.

Con ayuda del programa Oasis Montaj versión 7.0.1, se graficó el mapa de anomalía de Bouguer (figura 6) con una interpolación por el método de mínima curvatura. Posteriormente se realizó un pre procesado removiendo efectos con una superficie de primer orden. Después de ello, se aplica la transformada rápida de Fourier para obtener el espectro de potencias y la profundidad de las anomalías. La profundidad obtenida, según el espectro de frecuencias, para efectos regionales,

es de hasta 4 km de profundidad, y para efectos locales, es de hasta 1 km de profundidad (ver figura 7).

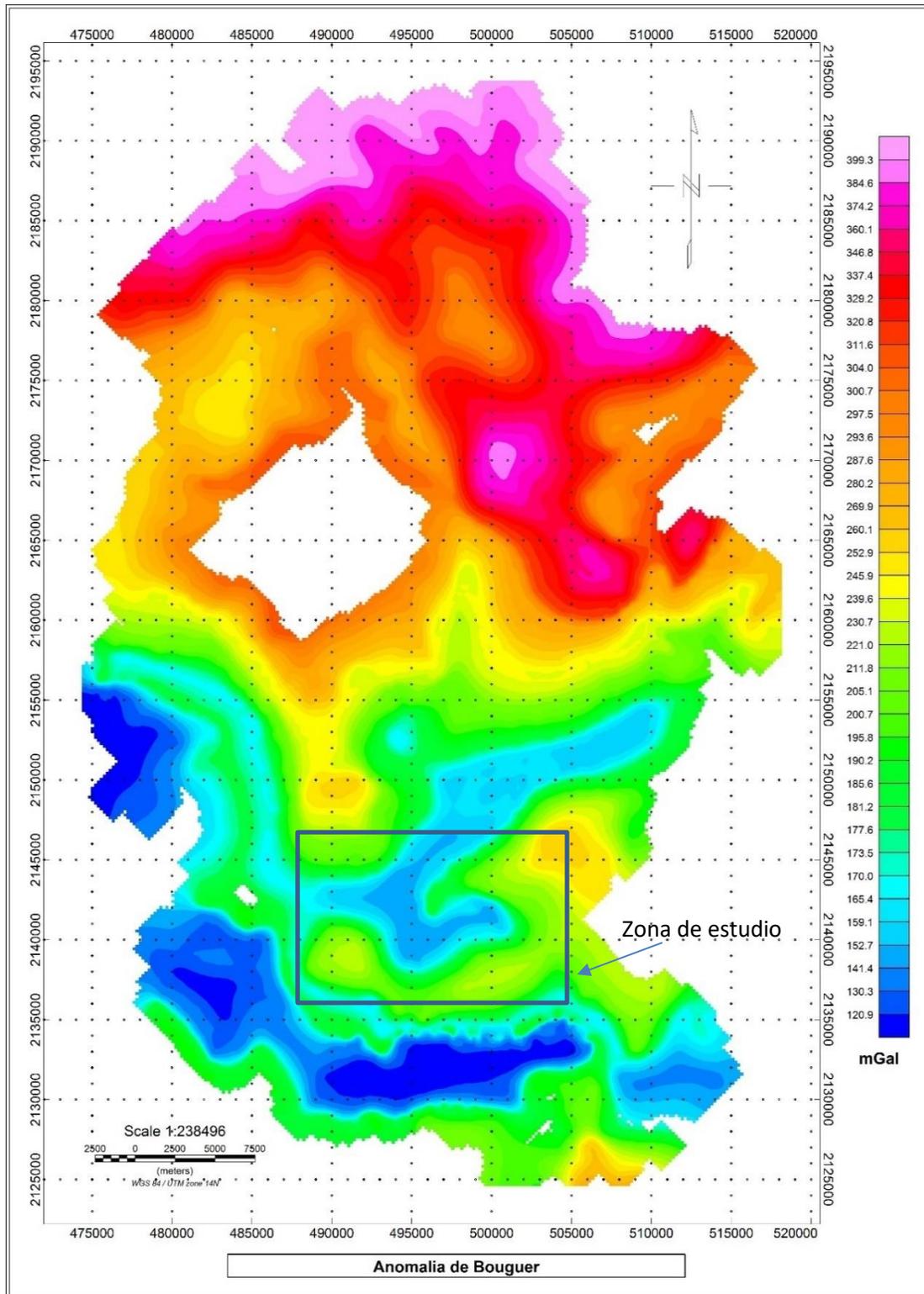


Figura 6. Anomalia de Bouguer.

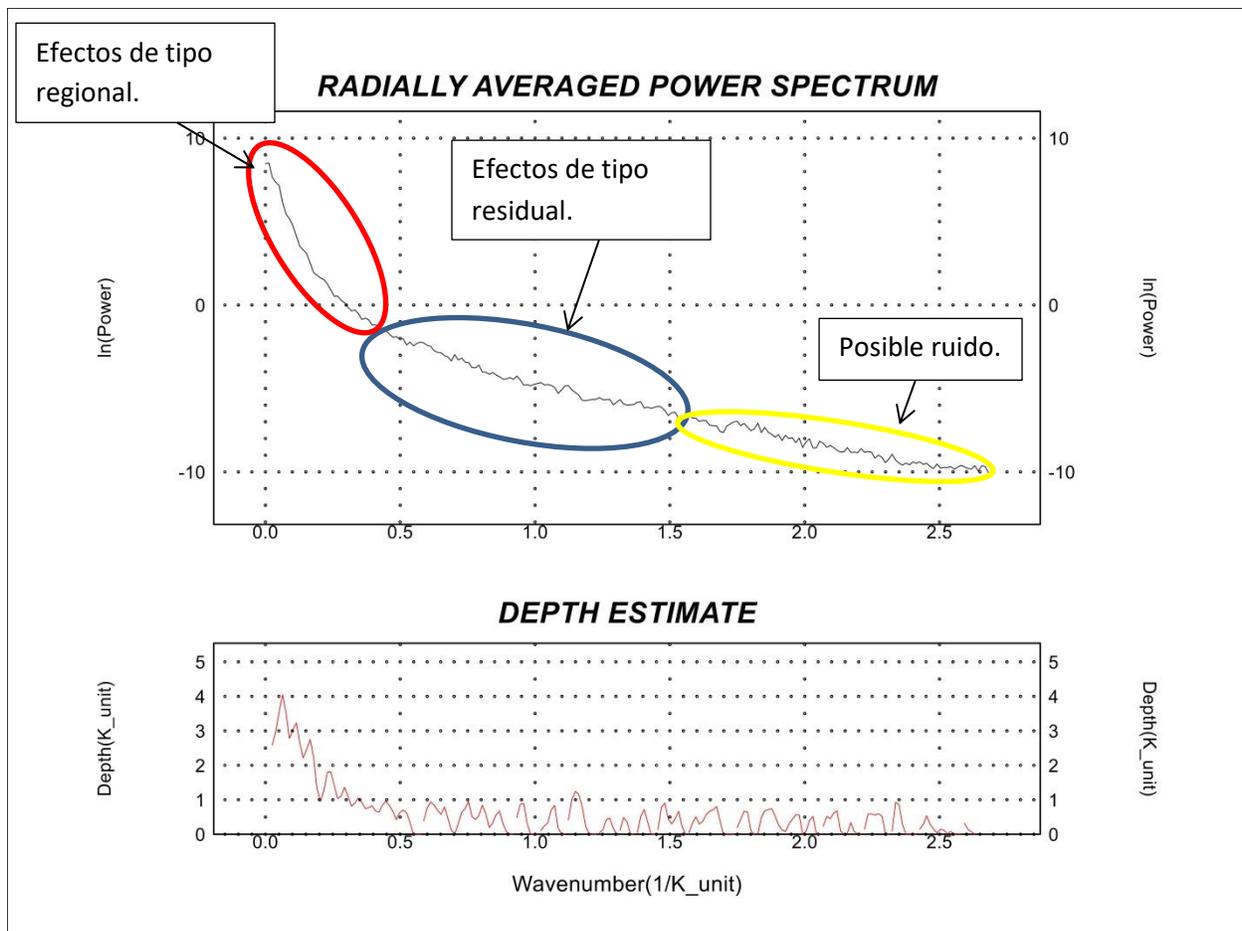


Figura 7. Espectro de frecuencias y profundidad estimada de las anomalías generadas a partir de la gravimetría. Elaboración propia.

Posteriormente se obtiene la separación Regional-Residual con ayuda de un filtro tipo *Butterworth* de orden 1, el cual funciona como un filtro pasa bajas, atenuando las altas frecuencias, se aplica el filtro y se genera la anomalía regional.

Se realizó una resta entre los mapas de anomalía de Bouguer y la anomalía regional (figura 8) obtenida tras el filtrado, para obtener la anomalía residual, con el cual se trazó un perfil en dirección SW-NE y se construyó una sección geológica. (Figura 9).

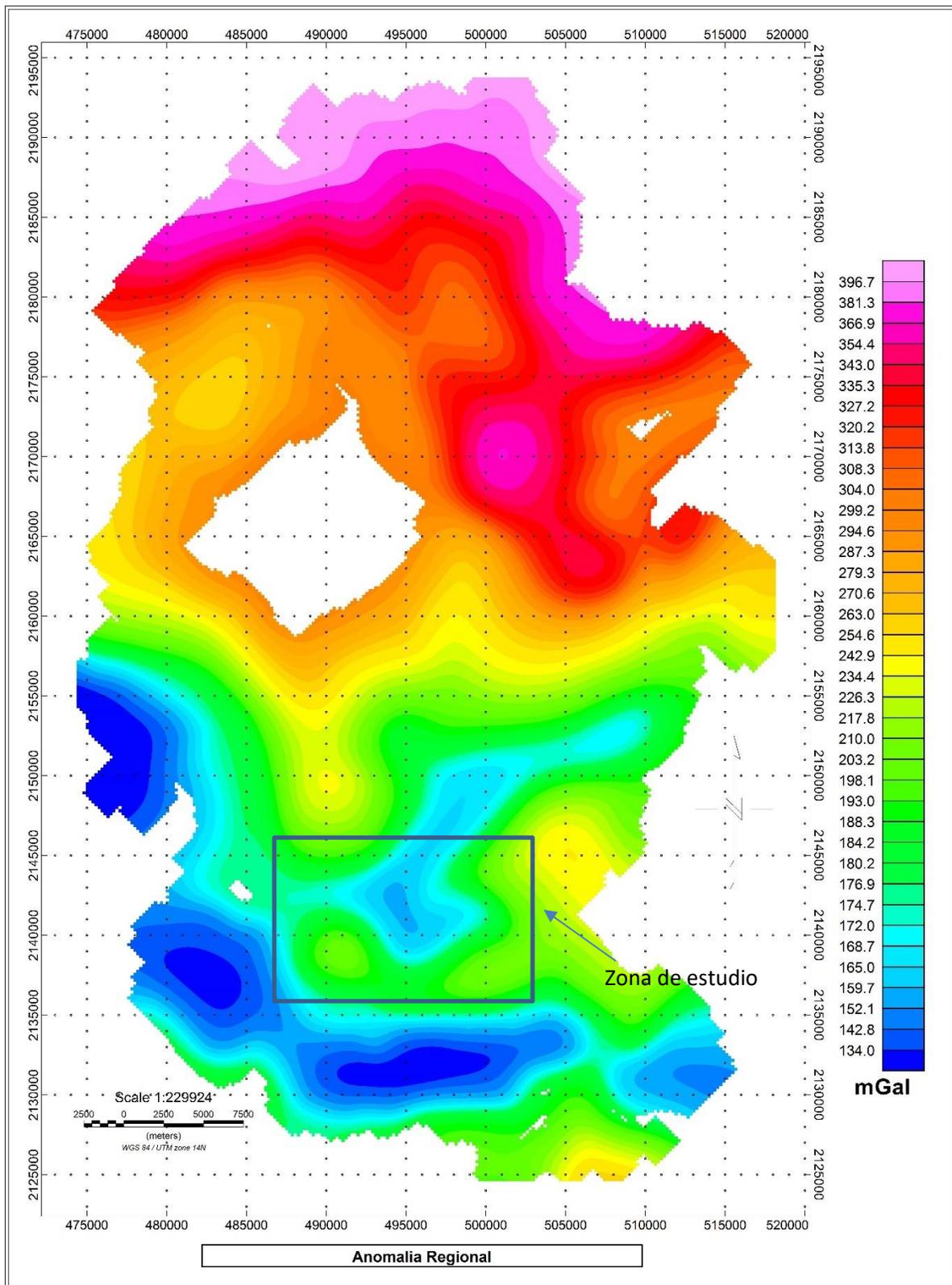


Figura 8. Anomalia Regional generada en Oasis montaj.

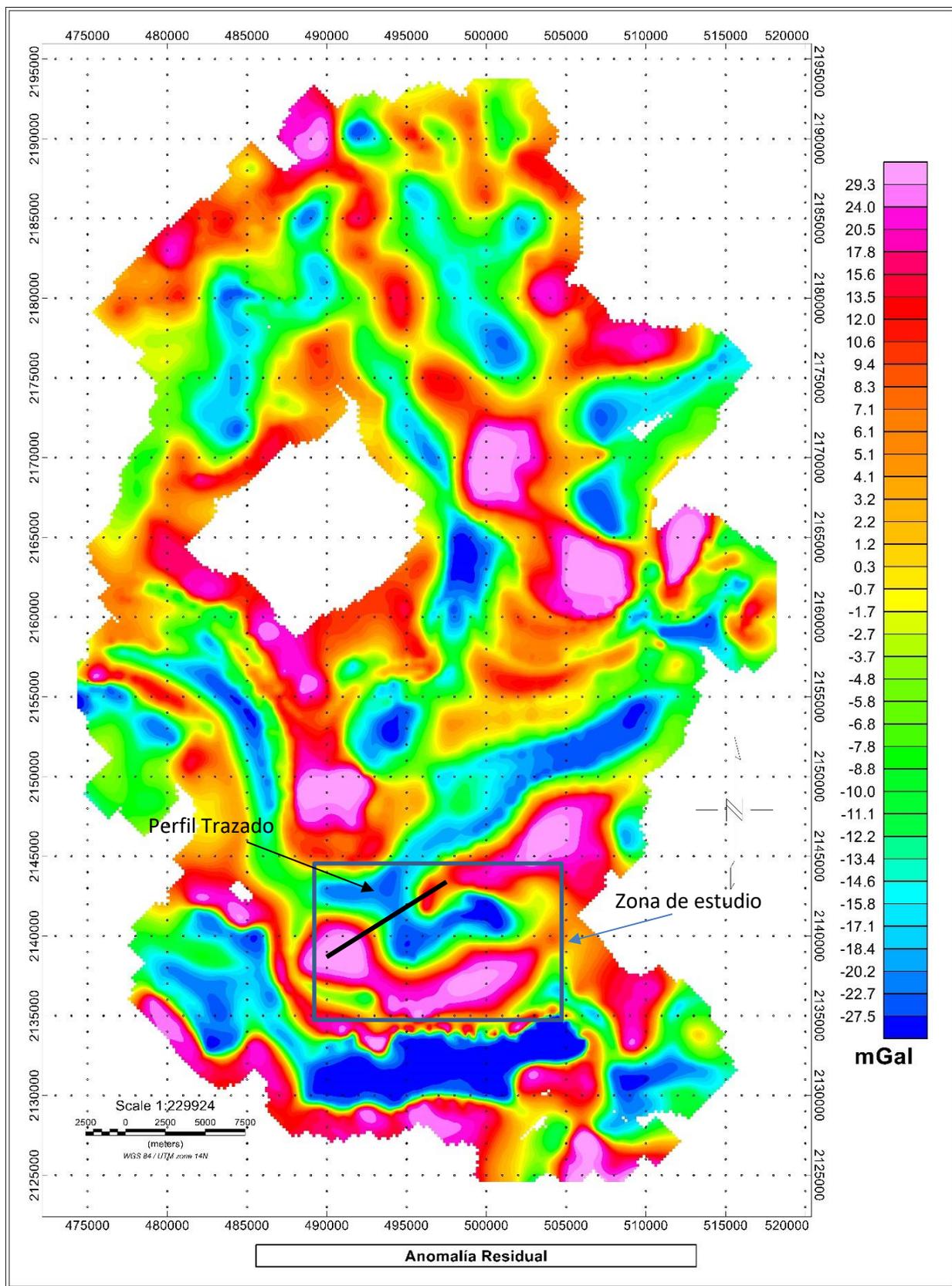


Figura 9. Anomalia Residual generada en Oasis montaj.

La interpretación se realizó solo para la zona de estudio, se asociaron algunos alineamientos de la anomalía de Bouguer con el relieve presente en la alcaldía, con valores del orden de 200 mGal; y en la zona de lago valores del orden de 140 mGal.

En la anomalía residual, se conservan las alineaciones correspondientes al relieve de la alcaldía, con valores positivos del orden de 30 mGal. Se observa una anomalía con valores negativos del orden de -25 mGal. Estos valores no se relacionan con el relieve de la alcaldía, en el presente trabajo se propone que son generados por la estructura propuesta por Arce et, al, (2013a), el graben de Santa Catarina, y por los estratos de sedimentos lacustres que se localizan en el subsuelo de la planicie de la alcaldía.

Para la realización del modelo geológico del perfil gravimétrico propuesto, se tomaron en cuenta las unidades litológicas del pozo profundo Mirador II y el registro eléctrico del pozo profundo San Lorenzo Tezonco ya que fueron de gran ayuda para guiar el trazo del modelo. El registro se tomó de los trabajos realizados por Morales-Casique et. al., (2015) y de Lezama-Campos, (2016), y el corte litológico proporcionado por el ingeniero Federico Mooser. Se agrupan los depósitos lacustres con densidad promedio de 1.5 gr/cm^3 , eventos volcánicos superiores con densidad promedio de 2.5 gr/cm^3 , eventos volcánicos inferiores con densidad promedio de 2.6 gr/cm^3 y la unidad del Cretácico, asignándole una densidad de 2.7 gr/cm^3 .

En la figura 10 se muestran tres curvas correspondientes al perfil generado con el paquete de cómputo de Oasis Montaj, trazado sobre la anomalía de Bouguer residual con una orientación SW-NE, con este, se genera un modelo geológico (ver figura 11). La curva punteada representa los datos de campo, la curva delgada de color negro es la curva de ajuste a los datos originales, con la cual, se ajustará la sección gravimétrica a los datos originales; y la curva roja representa el error entre los datos observados y los datos de ajuste. Cabe mencionar que el modelo se ajustó considerando un error de 1.968%.

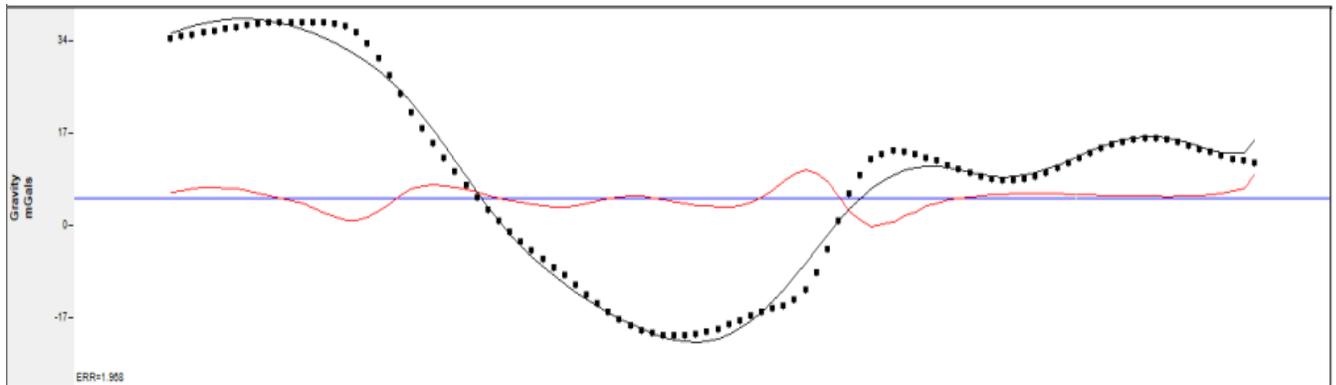


Figura 10. Perfil Anomalía residual.

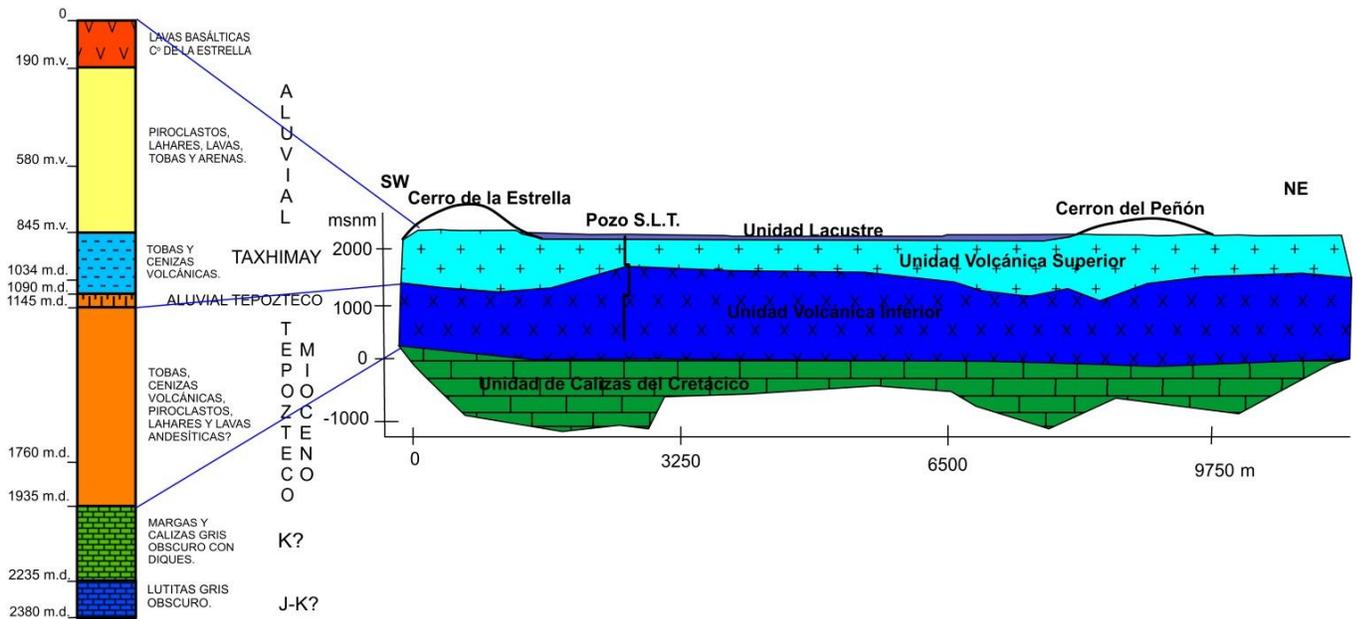


Figura 11. Modelo geológico generado a partir de la gravimetría y corte litológico del pozo Mirador 2, proporcionada por el Ing. F. Mooser.

2.4.2. Sísmica de reflexión 1988

Pérez Cruz (1988) con la información adquirida por PEMEX después del sismo de 1985 realizó el análisis de la información sísmica de reflexión. Cabe mencionar que ese estudio como otros más se desarrollaron con fines geotécnicos de evaluar las condiciones del subsuelo del valle de la Ciudad de México; sin embargo, por la profundidad que se interpretó de esta técnica geofísica dio pauta para conocer las condiciones del subsuelo a profundidades mayores de los 2,000 m.

El levantamiento sísmico se realizó a lo largo de las principales calles y avenidas de la Ciudad de México con una longitud de 243 km, realizando observaciones a través de 26 líneas con longitud variable de 2 a 28 km. Obtuvo una respuesta sísmica buena en las zonas que se ubican en la zona de topeforma de valle que corresponde a la planicie de la cuenca del valle de México, y mala en zonas transicionales y lomas,

Con base en los resultados obtenidos, agrupa las secuencias sísmicas obtenidas en ocho unidades. No se presenta la sección sísmica obtenida por Pérez Cruz, debido a que la información es de carácter confidencial y menciona que:

La secuencia VII estratigráficamente, está relacionada a las calizas del Cretácico con velocidades de 6,000 m/s y densidad de 2.7 gr/cm³, donde describe una falla normal con orientación NW-SE y a la cual nombra Falla Mixhuca. Esta unidad presenta eventos de reflexión caóticos y en ocasiones paralelos, de muy baja amplitud y discontinuos, y se tratan de explicar debido a la complejidad de las calizas del Cretácico y por la pérdida de energía sísmica en la columna volcánica.

La unidad VI corresponde a la unidad volcánica inferior. Describe una capa de basaltos y andesitas con edades del Mioceno-Oligoceno, intercalados con brechas volcánicas y tobas, y una capa de brecha calcárea. Registra espesores de hasta 190 m en la capa de basaltos y andesitas, con velocidades de 5,100 m/s y densidad variable de 2.6 y 2.7 gr/cm³; espesores de 1 a 165 m en la capa del material piroclástico con velocidades variables de 2,650 m/s y 4,690 m/s, y densidades de entre 2 a 2.65 gr/cm³; y por último un espesor de 65 m correspondiente a las brechas calcáreas, con velocidades variables de 3,050 a 3,390 m/s, con densidades entre 2.2 a 2.45 gr/cm³. En la figura 12 se hace a través de un esquema de las condiciones sísmicas

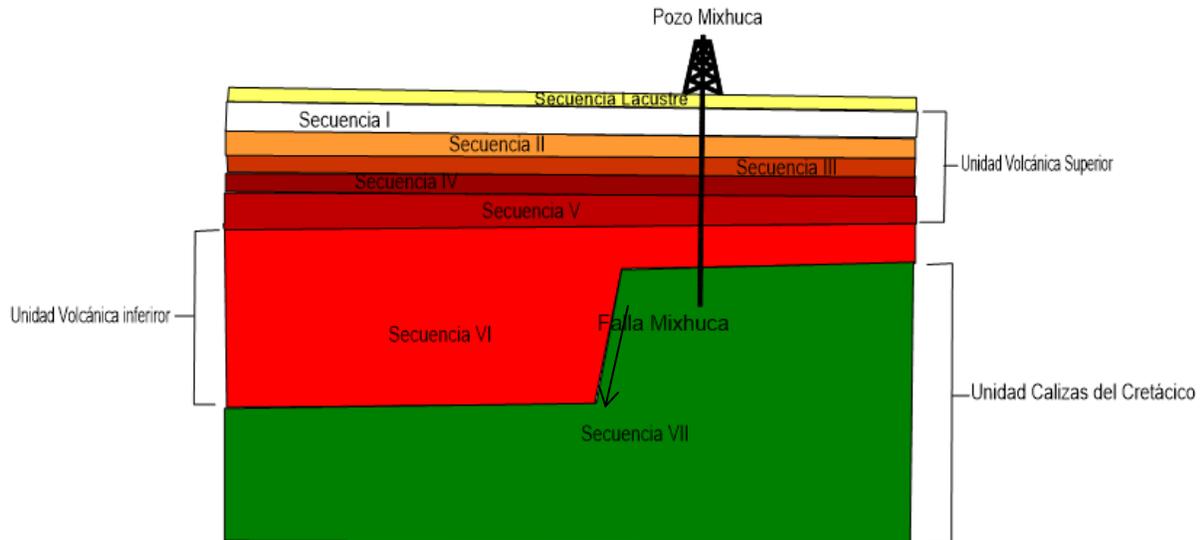


Figura 12. Esquema de las condiciones sísmicas descritas por Pérez Cruz (1988).

A su vez, Pérez Cruz identificó dos tipos de patrones de reflexión para esta unidad: eventos caóticos eventualmente subparalelos de baja amplitud (norte de la ciudad) y eventos paralelos discontinuos con cambios de amplitud (resto de la ciudad). Por lo tanto, se puede concluir que estos eventos están presentes en la alcaldía Iztapalapa, y son indicadores de una distribución lateral de los depósitos asociados (Pérez-Cruz, 1988).

Para la secuencia V, solo describe eventos de reflexión en la parte norte de la Ciudad de México, la cual se asocia a eventos volcánicos. Para fines del presente trabajo, no es representativa de las condiciones del suelo de la alcaldía, por lo tanto, no se realiza una descripción de ella.

En la secuencia IV no existen eventos de reflexión en la parte central de la sección sísmica, lo cual sugiere una disminución de variedad litológica en sentido vertical (Pérez Cruz, 1988). Se vuelven a identificar efectos de reflexión en la parte norte, pero no forman parte de la zona de estudio. La litología que Pérez Cruz asocia a esta unidad, son secuencias de arenas, brechas volcánicas, basaltos, arcillas arenosas y tobas, con ayuda de los registros geofísicos de pozos Sónico y Densidad del pozo Mixhuca-I. Esta sección se adelgaza hacia el centro de la ciudad y desaparece en la parte sur por medio de acuñamientos.

En la secuencia III, la litología identificada consta de tobas con velocidad de 2,000 a 2,250 m/s, y densidad de 1.95 a 2 gr/cm³; brechas con velocidades de 2,700 a 3,700 m/s, y densidades de 2 a 2.3 gr/cm³; basaltos con velocidad de 5,000 m/s y densidad de 2.55 gr/cm³; arcillas con velocidad de 2,350 m/s y densidad variable 2 a 2.1 gr/cm³; arcillas arenosas con velocidad de 2,770 m/s y densidad variable de 2.0 a 2.2 gr/cm³; conglomerados tobáceos con velocidades

variables entre 2,300 y 3,000 m/s con densidades entre 1.75 y 2.0 gr/cm³. Esta secuencia presenta eventos de reflexión, para la parte sur de la sección, subparalelos, discontinuos y de baja amplitud, en ocasiones no presentan reflexión alguna. Pérez Cruz asocia este comportamiento a una distribución irregular y menor variedad de las rocas que están provocando dichas reflexiones.

La secuencia II se caracteriza por tener reflexiones subparalelas discontinuas, con cambios laterales de amplitud, a veces no contiene reflexiones, esto se encuentra en toda la Ciudad de México. Las rocas reportadas por Pérez Cruz (1988) en esta unidad corresponden a conglomerados con velocidad de 2,120 m/s y densidades variables de 1.85 a 2.1 gr/cm³; arenas y arcillas no se tienen registros de sus velocidades ni densidades, intercaladas con tobos de velocidades variables de 2,180 a 2,450 m/s y densidad promedio de 2.0 gr/cm³; y basaltos con velocidad de 5,100 m/s y densidad de 2.55 gr/cm³.

La secuencia I está constituida por patrones de reflexión subparalelos discontinuos, con variaciones laterales de amplitud, que se relacionan con conglomerados volcánicos, arenas y arcillas, tobos con intercalaciones de basaltos y o andesitas en menor cantidad. Estos se encuentran distribuidos de manera irregular, razón por la cual Pérez Cruz (1988) justifica el tener esas variaciones de amplitud. Esta secuencia se encuentra en toda la Ciudad de México.

Para finalizar, la secuencia lacustre, la secuencia litológica más joven de la ciudad. Presenta patrones de reflexión subparalelos discontinuos y de amplitud media, asociados a arcillas lacustres, arcillas intercaladas con tobos y basaltos, identificados en los cortes litológicos de pozos perforados en la zona de estudio. Reporta un espesor total de toda la unidad, con base en la información de los pozos profundos Roma-I, Tulyehualco-I y Mixhuca-I, de 65, 200 y 490 m respectivamente. Reporta mayor engrosamiento de esta unidad en la parte oriente y sureste de la ciudad. El mayor espesor de esta capa se localizó en el centro de la ciudad, y menciona que está limitada al poniente y oriente por capas de menor espesor del mismo material, por lo que se puede concluir que, en Iztapalapa, esta capa se presenta en menor espesor.

En cuanto al análisis de la información anterior, se hace la aclaración, que el levantamiento geofísico realizado en 1986 se utilizaron arreglos de adquisición similares a la exploración petrolera. Se consideró que el medio era estratificado y sedimentario, lo cual complica un tanto la interpretación de las unidades por la forma en que se depositaron los diferentes eventos volcánicos que se presentaron después del Cretácico.

Cabe mencionar que la interpretación de las líneas sísmicas en ambientes volcánicos es muy compleja, ya que, los cambios de litología no son tan notorios como en el caso de las rocas sedimentarias, por lo tanto, las reflexiones tienden a ser caóticas.

2.4.3. Sondeo eléctrico vertical 1988

La Comisión Federal de Electricidad, y su departamento de geofísica, realizaron estudios geoelectricos por medio de la técnica denominada Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), en la Ciudad de México, a raíz del sismo de 1985. Esta técnica consiste en determinar la distribución vertical de resistividades del terreno que se investiga. Para este método se hacen mediciones en corriente continua, y los resultados son comparados con las resistividades comunes de los diferentes materiales. El objetivo de este estudio fue caracterizar las estructuras del subsuelo existentes, a una profundidad de 500 m, para delimitar zonas estructurares que presentaran mayor debilidad a la deformación. El área cubierta fue de 900 km², distribuyendo 26 líneas exploratorias en dicha área, generando así 365 sondeos con arreglos tipo Schlumberger (figura 13), que consiste en colocar cuatro electrodos alineados y a una distancia, de tal manera que, los electrodos de potencial (M y N) queden internos en el arreglo y los dos de corriente (A y B) externos.

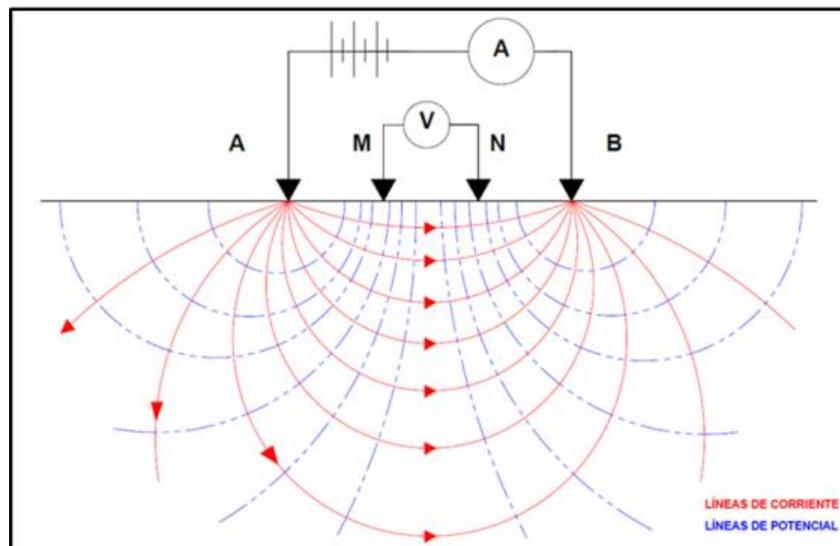


Figura 13. Arreglo Schlumberger. Tomada de sergeolog.com (s/f).

Los electrodos M y N tienen como función medir la tensión y los electrodos A y B los que se utilizan para introducir la corriente, la distancia a es la separación interelectrónica. De acuerdo con la teoría electromagnética, a medida que la distancia (a) aumenta, la cantidad de terreno involucrado es mayor y por tanto la profundidad de investigación que se logra también lo es.

La abertura máxima AB/2 que se realizaron fue de 1,000 m, dando como resultado 26 perfiles en la Ciudad. Cabe destacar que solo el 85% de las líneas alcanzaron la profundidad deseada de 500 m.

La exploración constó de tres fases, las cuales fueron:

Distribución de 21 Líneas regionales, casi ortogonales, en dirección N-S, E-W, con separaciones de 4 km y puntos de medición cada 1 km. Con el fin de delimitar las zonas que se debían detallar (zonas estructurales que presentan mayor debilidad a la deformación).

La segunda fase consistió en delinear áreas detectadas con condiciones geológico- geotécnicas bien definidas, agregando cinco líneas con orientación E-W, ubicadas en la zona urbana de la ciudad.

La tercera fase consistió en detallar zonas con condiciones particulares o de interés, realizando 25 SEV al noreste de la Ciudad, con un total de 32 km cubiertos, prolongando así, algunas de las líneas de las fases 1 y 2.

Se caracterizaron tres zonas principales, zona de lago, zona de transición y zona de lomas, donde se clasificaron por el valor de resistividades obtenidas. Para la zona de lago, se determinaron valores de 0.2 a 15 ohm-m. Los valores mínimos anteriormente mencionados, correspondieron a materiales lacustres depositados recientemente, los valores altos corresponden a depósitos lacustres antiguos y depósitos aluviales; La zona de transición, que se caracterizó por contener resistividades de 12 a 40 ohm-m correspondientes a tobas y arenas; y zona de lomas, reportando resistividades de 30 a 3,000 ohm-m, correspondientes a brechas basáltica, materiales piroclásticos, basaltos fracturados.

En la parte sur de los mapas presentados de isorresistividad aparente por CFE, específicamente el mapa de abertura AB/2 de 70 m, se distinguen alineamientos en la parte de la conexión de los lagos de Xochimilco y Chalco, lo que mencionan es una posible estructura de tipo graben. Cabe destacar que estos lineamientos corresponden con el actual sistema de fallas de Xochimilco (García-Palomo *et al.*, 2008). La descripción anterior tiene como propósito identificar zonas de debilidad en el suelo de la Ciudad de México, tras el sismo de 1985. Para fines del presente trabajo, lo anteriormente descrito, ayudará a reconocer la geología que conforma a la porción ubicada en Iztapalapa, del acuífero superior del Valle de México.

Se diferencian tres zonas importantes, similares a las del resto del Valle de México, con diferentes características tanto geológicas como eléctricas entre sí.

De acuerdo a la configuración de isorresistividad aparente obtenida por CFE (1986) con aberturas AB/2 de 10 m (Figura 14. Mapa 1), 20 m (Figura 15 mapa 2), 70 m (Figura 16 mapa 3) y 210 m (Figura 17 mapa 4), la zona de lago, en la alcaldía, está presente predominantemente al norte, y parte del centro de la alcaldía, con isorresistividades aparentes registradas entre 0.1 a 10 ohm-m (curvas color negro y azul). Esta configuración permanece constante en los cuatro mapas del nivel de isorresistividad aparente.

En la zona de transición Identificada en la parte poniente de la alcaldía, y en zonas bajas de los Cerros Estrella y Peñón del Marqués, y en las faldas de la Sierra de Santa Catarina. Los valores de isorresistividad aparente que comprenden esta zona van en un rango de 10 a 30 ohm-m (curvas color verde).

En los mapas 1, 2 y 3 esta presenta un adelgazamiento en la parte norte de la sierra de Santa Catarina, mientras que en el mapa 4 tiene a engrosar aproximadamente hasta 1 km.

Se hace notar una estructura con aparente orientación NE-SW, entre el cerro de la Estrella y la Sierra de Santa Catarina. Se sugiere es una estructura que delimita una conexión entre los lagos de Texcoco y Xochimilco (CFE, 1986). Esta estructura está presente en los mapas 1 y 4, desaparece por completo en el mapa dos, y en el mapa 3 aparece combinada con valores de isorresistividad aparente correspondientes a la zona de lago.

La zona de lomas, quien alberga las mayores altitudes dentro de la demarcación, corresponde a los cerros del Peñón del Marqués y Estrella, así como la sierra de Santa Catarina, registrando isorresistividades superiores a los 30 Ohm-m. (curvas color rojo)

Esta configuración es la más constante dentro de los cuatro mapas, no se notan cambios abruptos en la misma.

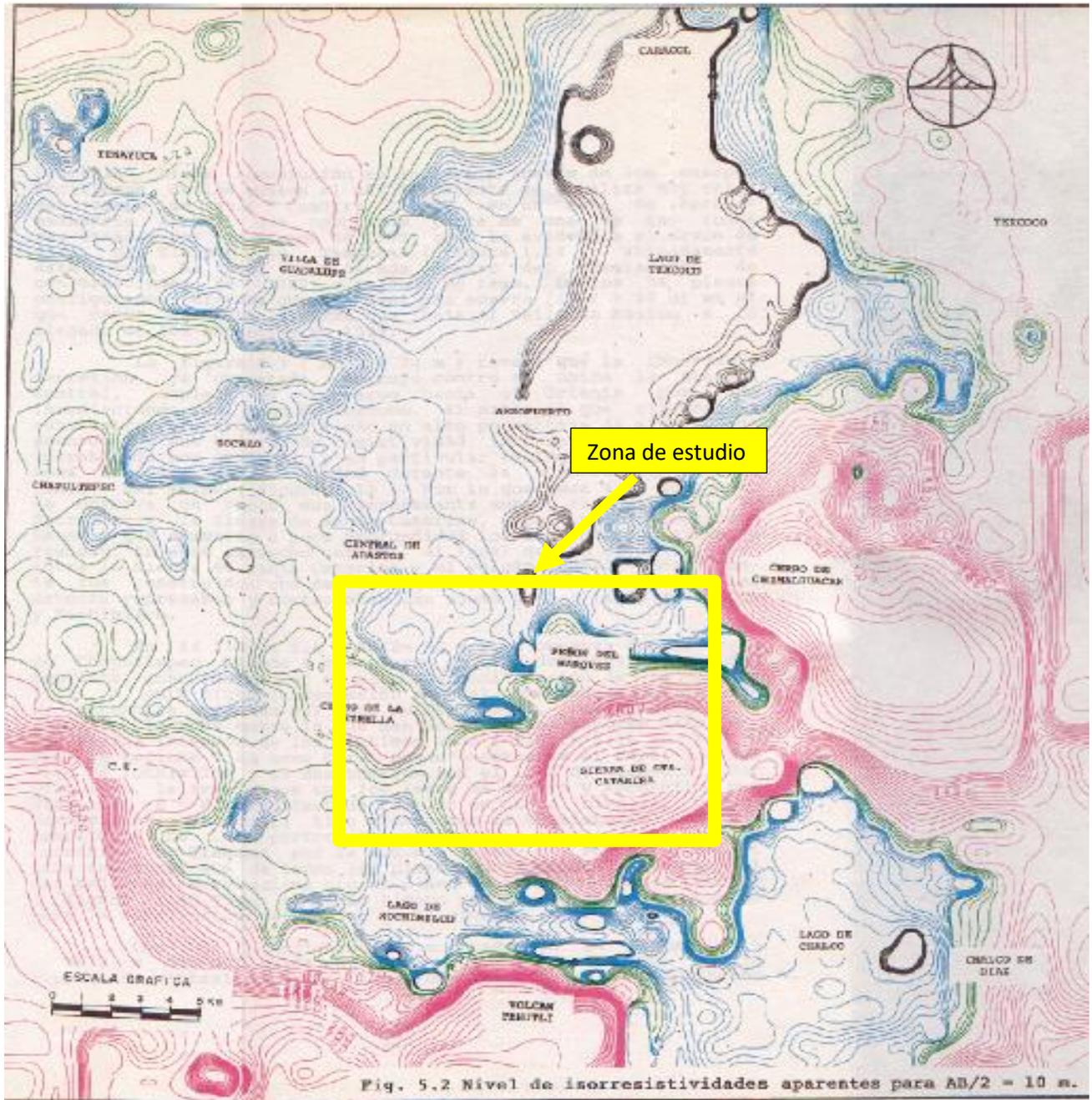


Figura 14. Mapa 1 de Isorresistividad aparente $AB/2=10$ m, en el Valle de México. Se señala el área de estudio. Tomada de Libro CFE (1988).

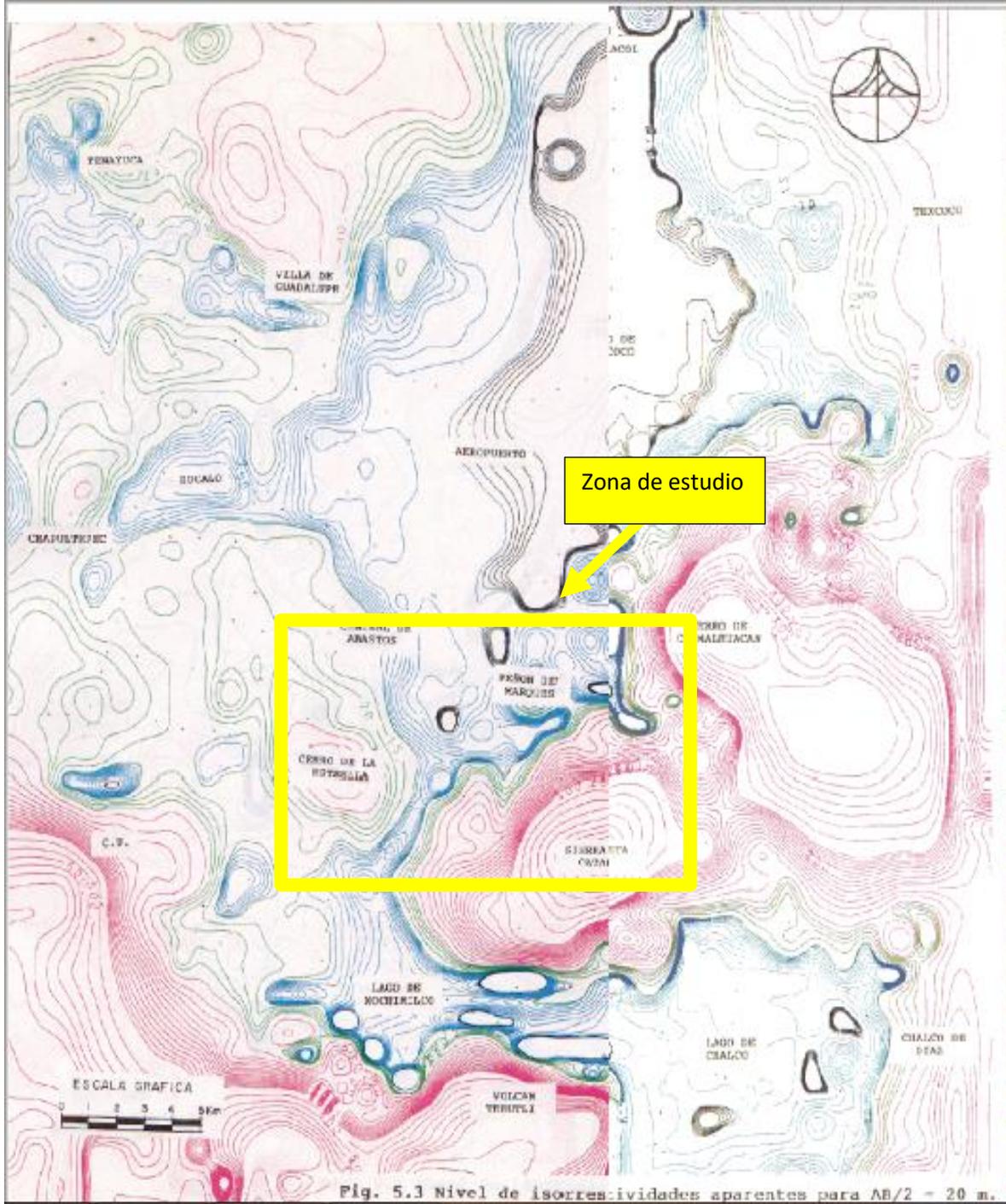


Figura 15. Mapa 2 de Isorresistividad aparente con $AB/2 = 20$ m, del Valle de México. Tomado de Libro CFE (1988).

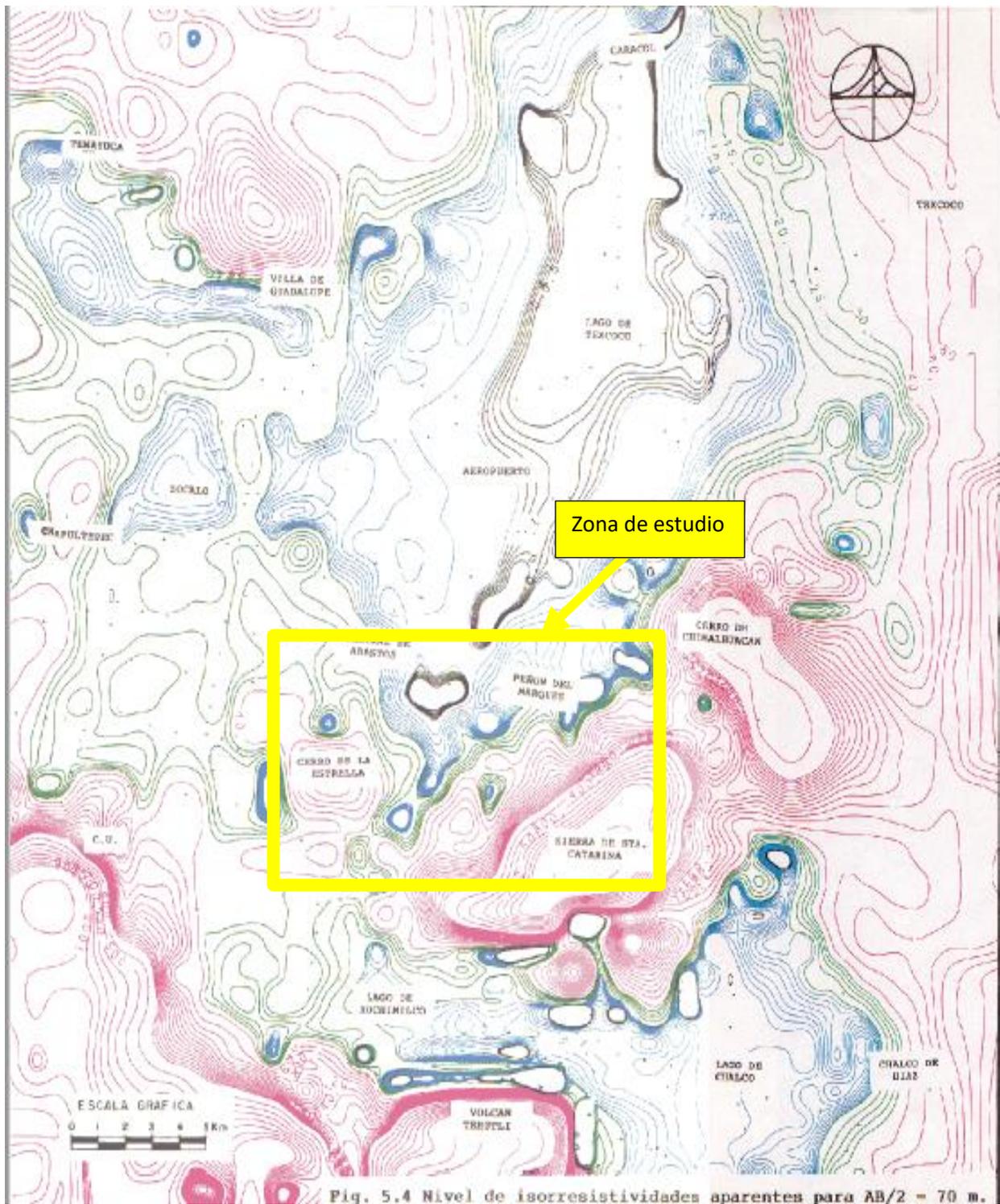


Figura 16. Mapa 3 de Isorresistividad aparente con $AB/2 = 70$ m, del Valle de México. Tomado de Libro CFE (1988).

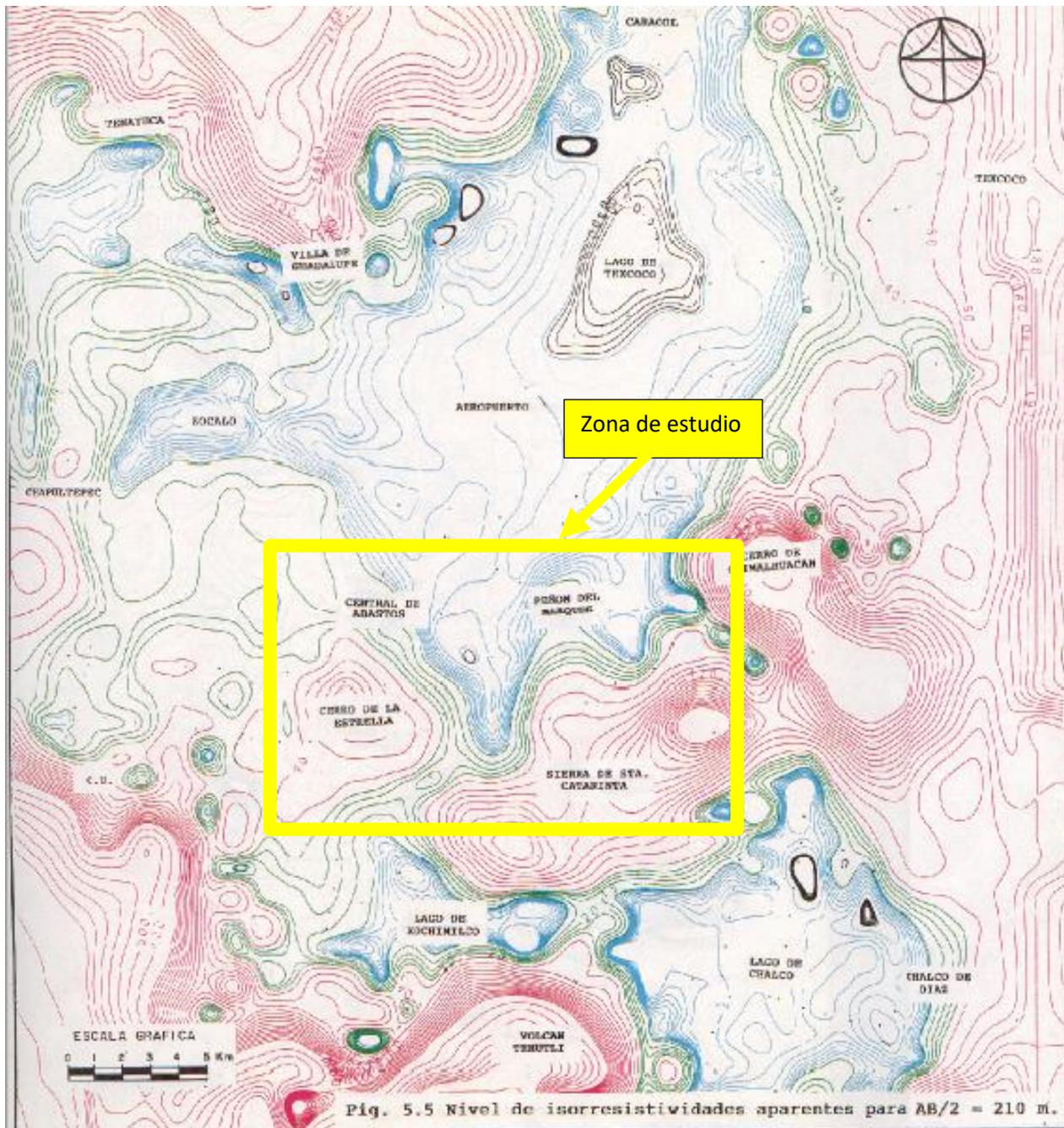


Figura 17. Mapa 4 de Isorresistividad aparente con $AB/2 = 210$ m, del Valle de México. Tomado de Libro CFE (1986).

Para tratar de comprender las estructuras encontradas en el subsuelo en la zona de estudio, por dicho método de prospección geofísica, se realiza un esquema de la distribución de las unidades geoelectricas y las zonas identificadas (Figura 18), de acuerdo a la litología propuesta por CFE (1988) y a la interpretación que se le da en el presente trabajo.

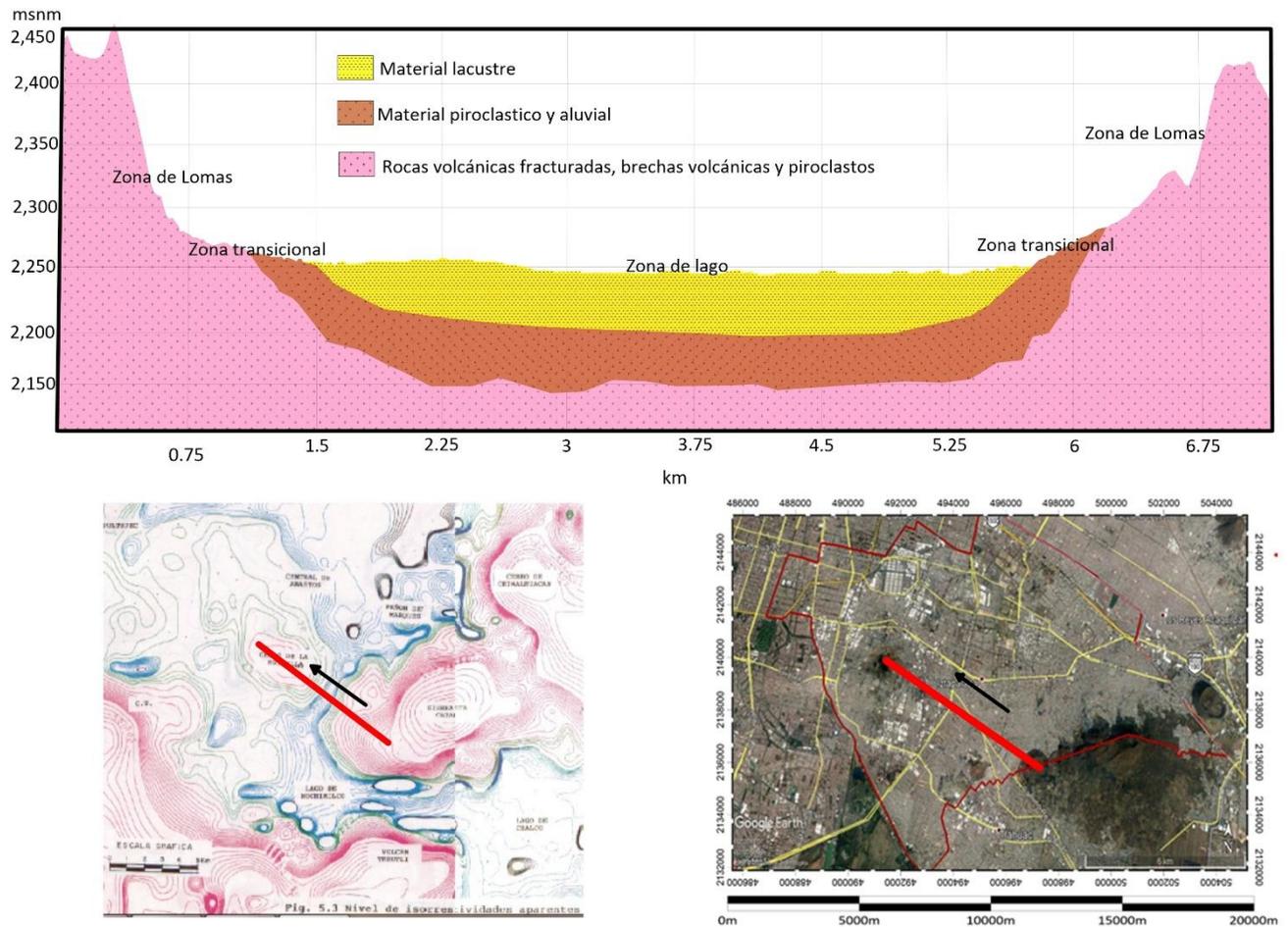


Figura 18 Esquema de distribución de las unidades geoelectricas y su litología, y su ubicación.

La información anterior fue reprocesada en el año 2000 por la empresa CIGSA, y presentan una serie de secciones geoelectricas correlacionadas con la gravimetría del Valle de México de 1950 (ver figura 19) y en este caso, toma como referencia la anomalía residual. Para la alcaldía Iztapalapa existen dos secciones geoelectricas con una profundidad aproximada de 550 m, que pueden ayudar a visualizar mejor la distribución de las capas del subsuelo, en este caso para fines hidrogeológicos. Solo se presenta una de las secciones que, para este trabajo, se considera representativa de la zona de estudio, ya que, la sección se genera a lo largo de la avenida Ermita

Iztapalapa, que atraviesa de este a oeste el territorio de la alcaldía. Se observa que domina el rango de resistividades desde los 30 hasta los 75 ohm-m, aproximadamente. Como anteriormente se mencionó, se relaciona a material aluvial, piroclástico y rocas volcánicas poco fracturadas. Se hace notar una delgada capa con resistividades con valores del orden de 9 ohm-m, asociándolas con la capa de arcillas presente en la planicie de la alcaldía, debiendo este valor de resistividad a la presencia de agua en dicha capa.

Las resistividades mayores, del orden de 75 ohm-m, se relacionan a las elevaciones de la alcaldía, en este caso las presentes en la sección son los cerros de la Estrella y Santa Catarina, conformadas por roca volcánica sólida.

En la figura 20 se presenta una sección geológica, basada en el corte geoelectrico, de acuerdo a la descripción antes expuesta.

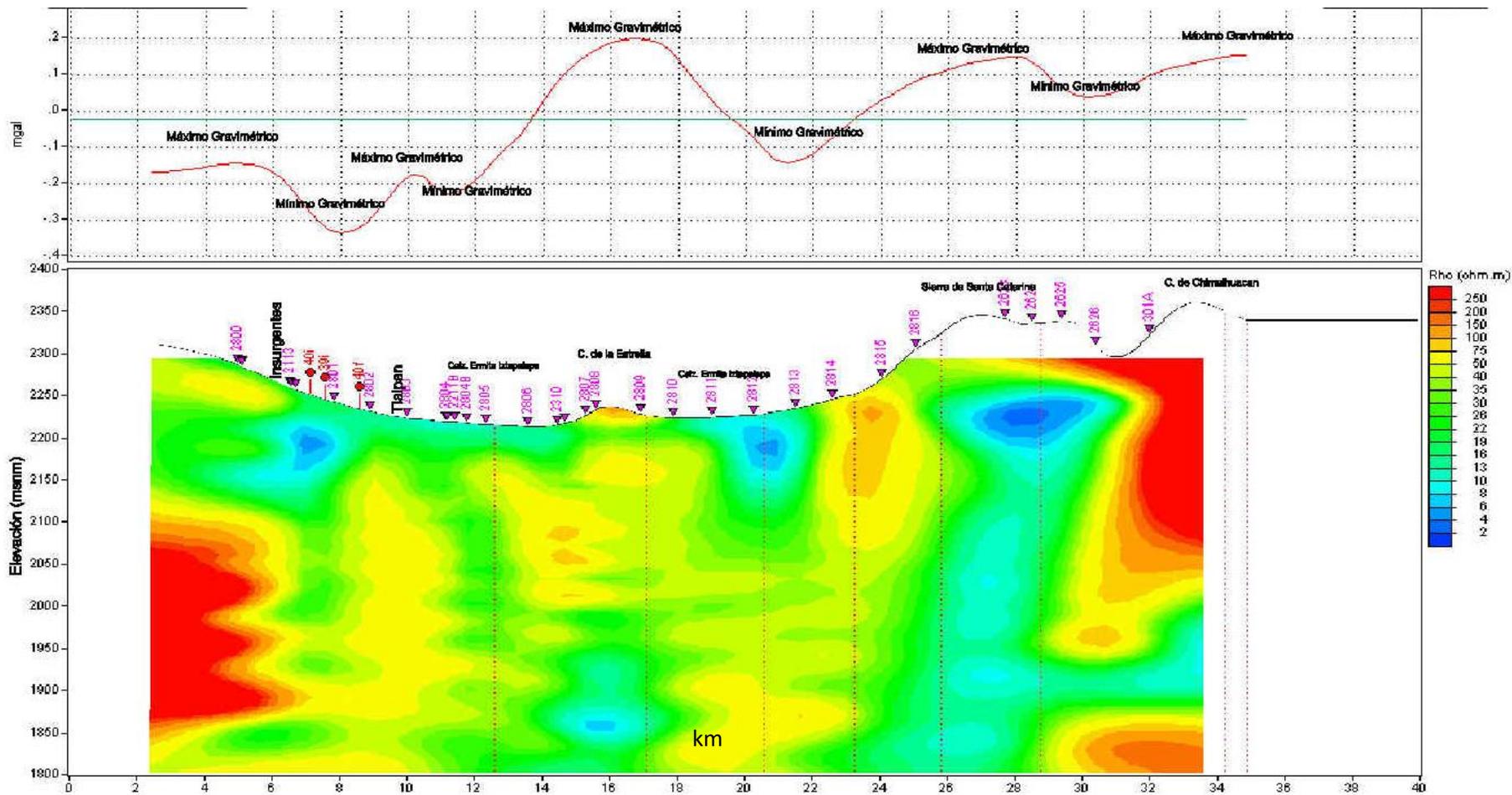


Figura 19. Sección geoelectrica en la Alcaldía de Iztapalapa, correlacionada con la gravimetría de la Cuenca del Valle de México. Tomada de Informe CIGSA 2000.

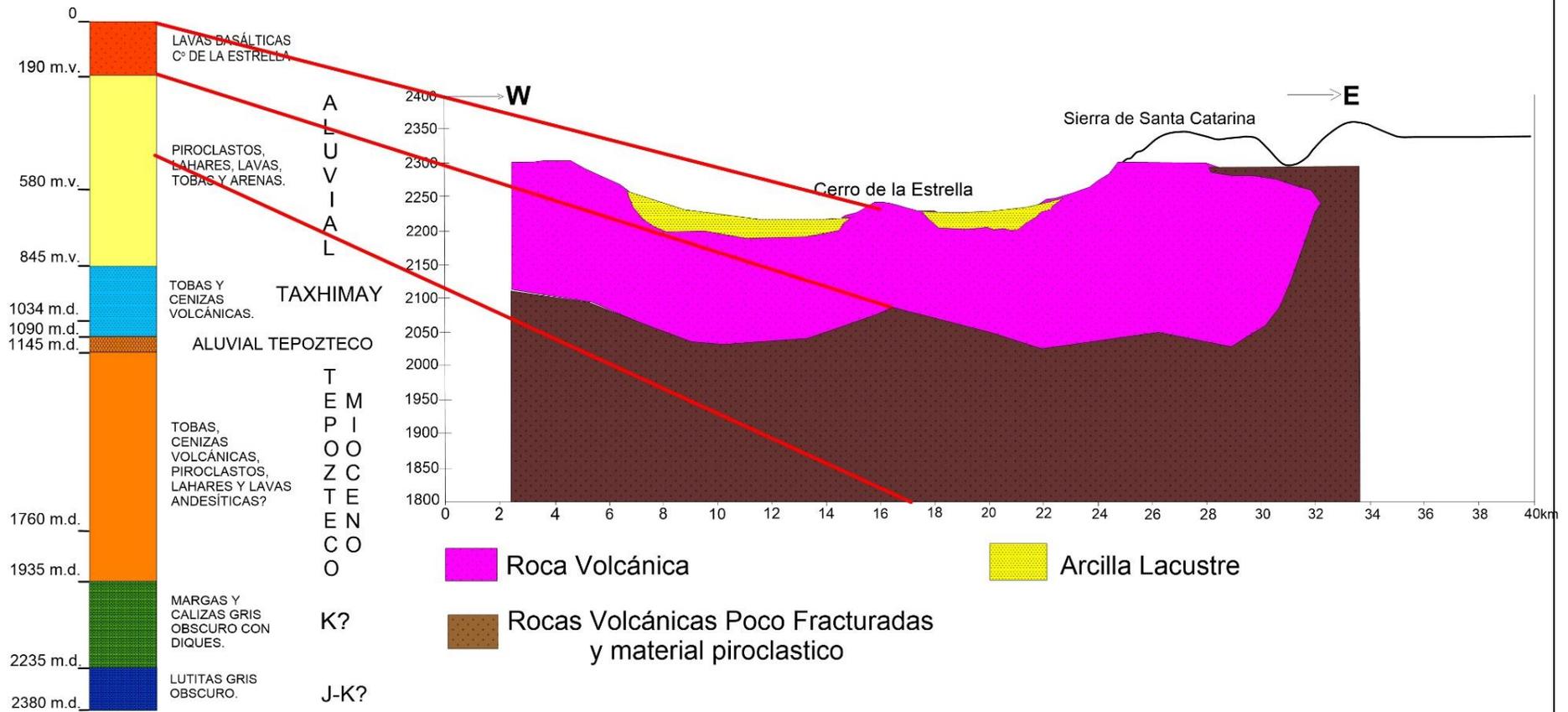


Figura 20. Sección geológica generada a partir de la sección geoelectrica generada por CIGSA (2000). (Corte litológico del pozo Mirador 2, proporcionado por el Ing. F. Mooser (2019).

2.5. Marco hidrogeológico

2.5.1. Tipo de acuífero

Con base en las características geológicas presentes, se define al acuífero de la alcaldía de Iztapalapa de tipo semiconfinado. Se tiene un contenedor de tipo arcilloso de espesor variable, seguido por materiales piroclásticos y aluviales que conforman la parte superior del acuífero y hasta donde al momento se tiene más conocimiento.

Actualmente, las extracciones de agua potable se realizan a profundidades someras de 100 a 500 m, en 80 pozos en el territorio de la alcaldía, sin incluir los pozos profundos. Para conocer las condiciones hidrogeológicas profundas del Acuífero del Valle de México, SACMEX y CONAGUA, en colaboración con el Instituto de Geología de la UNAM y PEMEX, han realizado la perforación de pozos con profundidades mayores de 1,500 m. Algunos de los pozos profundos son: San Lorenzo Tezonco, Agrícola oriental 2-B y 2-C, Santa Catarina 3A y Mirador II.

Para fines del presente trabajo se cuenta con información proporcionada por SACMEX del pozo San Lorenzo, la descripción de los trabajos realizados por Federico Mooser, y de los realizados por investigadores del Instituto de Geología a nivel cuenca. Dichos trabajos ayudan a visualizar las características del subsuelo en la alcaldía y entender cómo está constituido el acuífero. Se compone por una capa de arcillas con alternancias de arena y una serie de eventos volcánicos sucedidos en el periodo Paleógeno-Neógeno y Cuaternario, y como basamento, se cuenta con calizas del Cretácico. Cabe mencionar que el Pozo San Lorenzo Tezonco no atravesó el horizonte de calizas. Por su parte, en los estudios realizados por Arce, et al., (2015), Morales Casique et al., (2015) y Lezama-Campos, et. al., (2016), sobre el mismo pozo, se identifican las unidades hidrogeológicas que constituyen a la porción del acuífero de la CM, en la zona de Iztapalapa. Morales Casique et al., (2015) identifican cinco unidades hidrogeológicas, pero, para fines descriptivos del presente trabajo, se agrupan en tres.

La primera unidad está en el rango de 0 a 500 m. Consta de una capa de arcillas de espesor variable, no mayor a los 70 m, funcionando como capa confinante del acuífero superior, seguido una secuencia de depósitos piroclásticos y aluviales; además, de rocas ígneas de composición andesítica basáltica, dacítica asociada a la formación de la sierra de Santa Catarina, con una profundidad no mayor a los 500 m que conforman el acuífero superior.

Cabe destacar que en el pozo San Lorenzo no se recuperaron muestras del material que constituye este acuífero entre los 70 a 80 m y 120 a 510 m según Arce, et al., (2015), pero se infiere, en este trabajo, que este material puede estar constituido por material piroclástico y

arenas medias y gruesas, todo esto con base en los cortes litológicos obtenidos de pozos cercanos al San Lorenzo Tezonco.

La unidad dos contempla un acuífero medio, cuya profundidad va de los 510 hasta los 700 m, está conformado por una secuencia andesítica basáltica, dacítica, asociadas a la formación del Cerro de la Estrella y lavas y depósitos piroclásticos, relacionados a eventos eruptivos de la Sierra de las Cruces.

La unidad tres, está constituida por un acuitardo formado por ignimbritas, depósitos de flujo de bloques de ceniza relacionados a la formación de la sierra de las Cruces, y por secuencias de lava afanítica y depósitos piroclásticos de composición andesítica con una profundidad de 700 a 1,090 m. El acuífero inferior está constituido por secuencias de lavas de composición andesítica porfídica, andesítica-basáltica. El límite de la profundidad del acuífero inferior no se tiene registrado, debido a que el pozo San Lorenzo Tezonco únicamente alcanzó una profundidad de 2,008 m.

La porción del acuífero de la CM ubicada en la Alcaldía tiene dos fuentes importantes de aporte, la primera es regional proveniente de las zonas de recarga del acuífero de la CM, y la segunda es local proveniente de las elevaciones de la alcaldía, que son la parte norte de la sierra de Santa Catarina, el Cerro de la Estrella y el Cerro del Peñón del Marqués.

2.5.2. Censo de pozos

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), para la zona de estudio en cuestión, cuenta con alrededor de 80 pozos de extracción de agua subterránea, la mayor parte de ellos, distribuidos en la parte poniente de la alcaldía, con profundidades no mayores a los 500 metros, con caudales de extracción de entre 10 a 100 litros por segundo (lps), según aforos proporcionados por la misma dependencia. Además, existen cinco pozos profundos destinados a la extracción de agua potable en toda la ciudad, y de estos, sólo hay dos ubicados dentro de la alcaldía. Cabe mencionar que estos pozos aún se encuentran en fase exploratoria, y los únicos que están en funcionamiento son el pozo San Lorenzo Tezonco y el Santa Catarina 3-A. La diferencia entre estos pozos, además de la profundidad de extracción de agua, es que esta proviene de un acuífero diferente del que se realizan extracciones actualmente, por lo tanto, cuenta con diferentes parámetros hidrogeológicos. Dichos parámetros son de interés tanto académico como gubernamental.

Actualmente se extraen alrededor de 50 m³/s del acuífero de la Ciudad de México (CONAGUA, 2020), siendo así que las extracciones que se realizan de agua subterránea representan el 70%

del abastecimiento de agua potable. Únicamente se cuenta con un registro de 52 pozos, el cual fue proporcionado por dicha dependencia. En la figura 21 se muestra la distribución de los pozos proporcionados, sin incluir la ubicación de los pozos profundos.

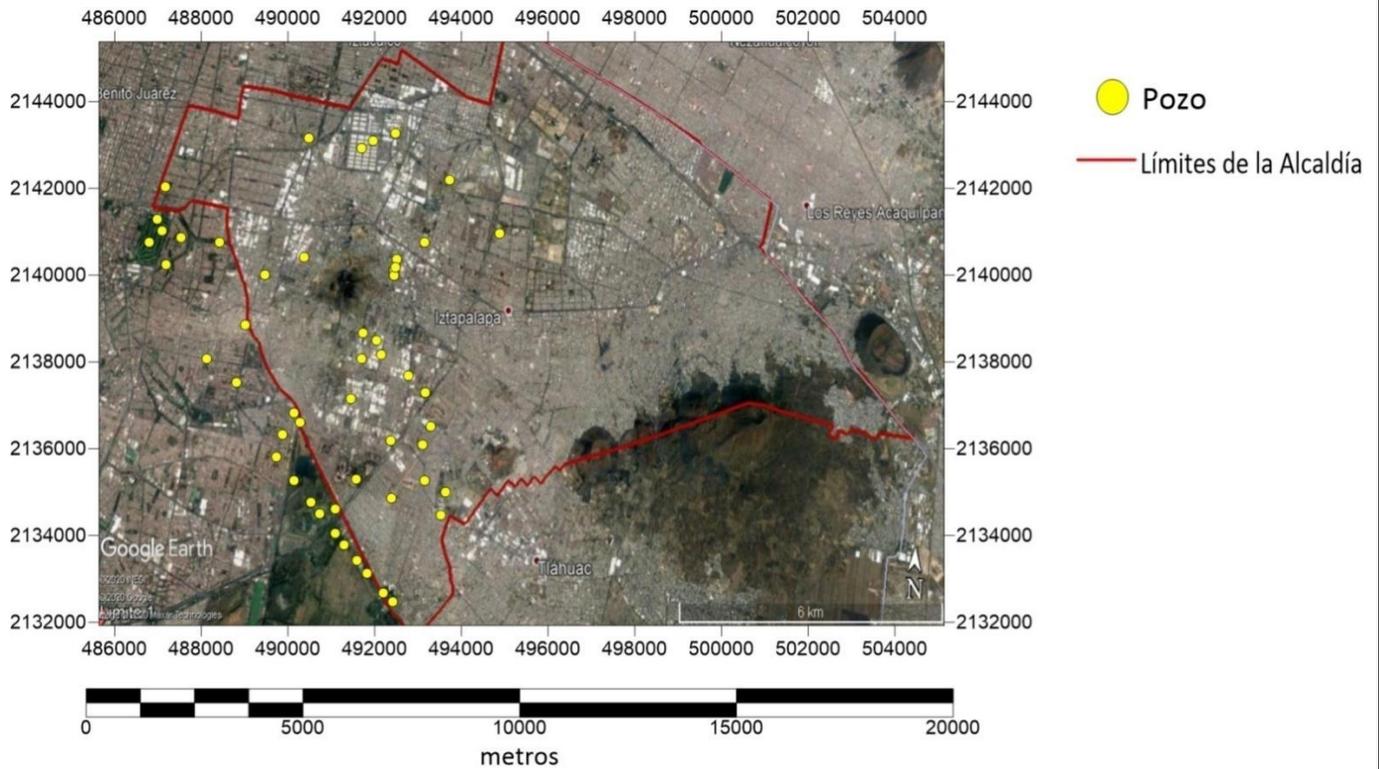


Figura 21. Distribución de Pozos ubicados en la Alcaldía.

2.5.3. Profundidad al nivel estático

La información que se presenta no está actualizada y corresponde a la profundidad al nivel estático de 52 pozos al año 2011.

Para realizar la estimación, se cuenta con un dato importante, según el mismo organismo regulador, el nivel del agua subterránea se abate en promedio 1 m al año. Una vez obtenida la estimación de los datos, se realizó una configuración de la profundidad al nivel estático con el paquete *Surfer* para ver la distribución de los valores. (Figura 22). Se observan profundidades al nivel estático casi uniformes en esta sección, en un rango de 72 hasta los 90 m al norponiente y centro de la alcaldía y la zona sur con niveles del orden de 80 m hasta los 110 m, siendo estos últimos los valores más altos registrados.

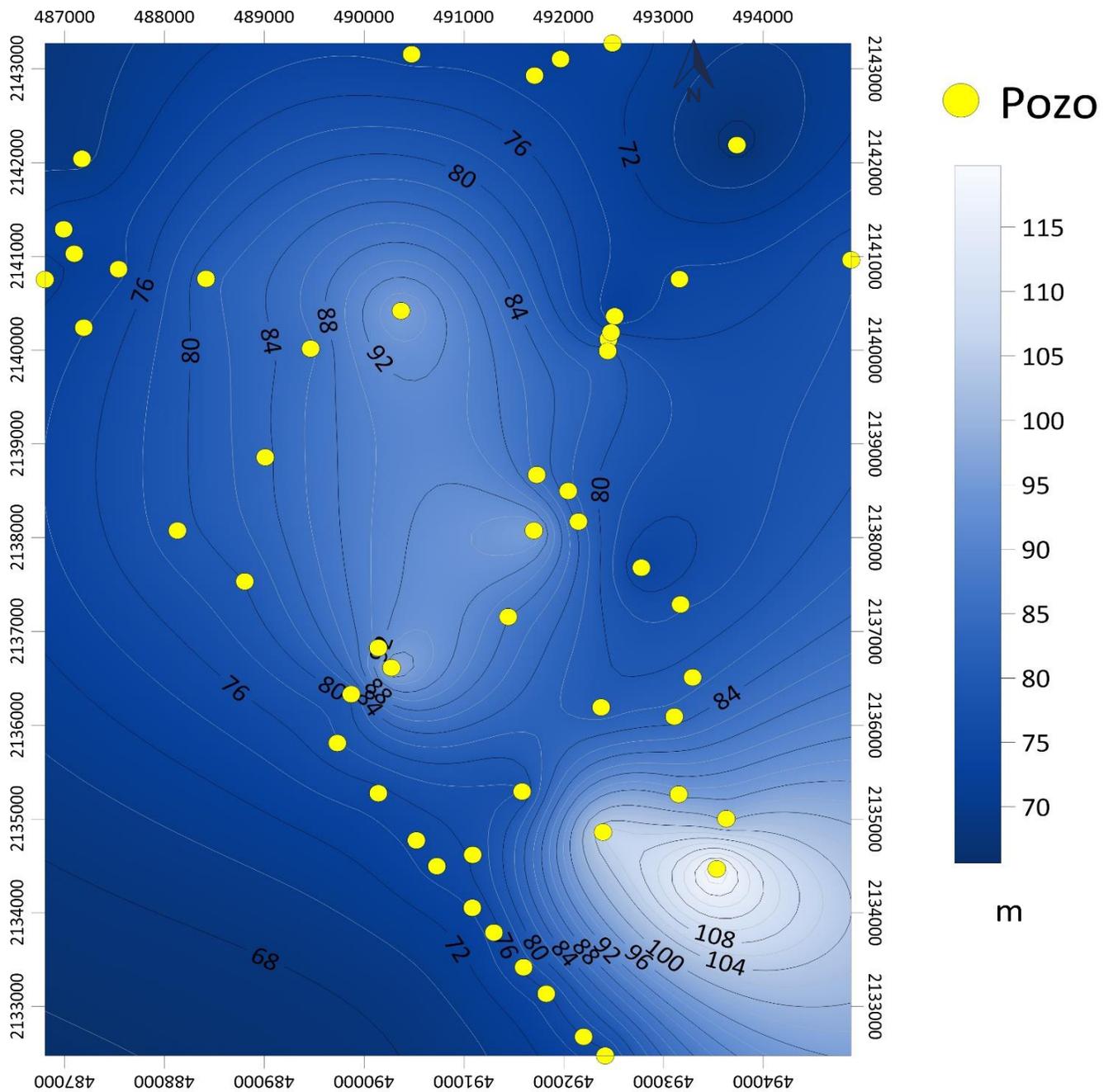


Figura 22. Profundidad al nivel estático estimada en la Alcaldía. (2021) en Surfer.

2.5.4. Elevación al nivel estático

La elevación al nivel estático (ver figura 23) registra valores de 2,160 msnm en la zona del Cerro de la Estrella y parte de la planicie central de la alcaldía, y menores en la parte sur de la planicie, del orden de 2,150 msnm. Se observan flujos de agua subterránea (flechas negras) provenientes del norte y sur, interceptándose en tres zonas (círculos rojos), formando lo que parece ser conos de abatimiento, con valores del orden de 2,145 msnm. Estas tres zonas de intersección de flujo se encuentran entre los límites de Tláhuac es Iztapalapa y cerca de la zona del Cerro de la Estrella.

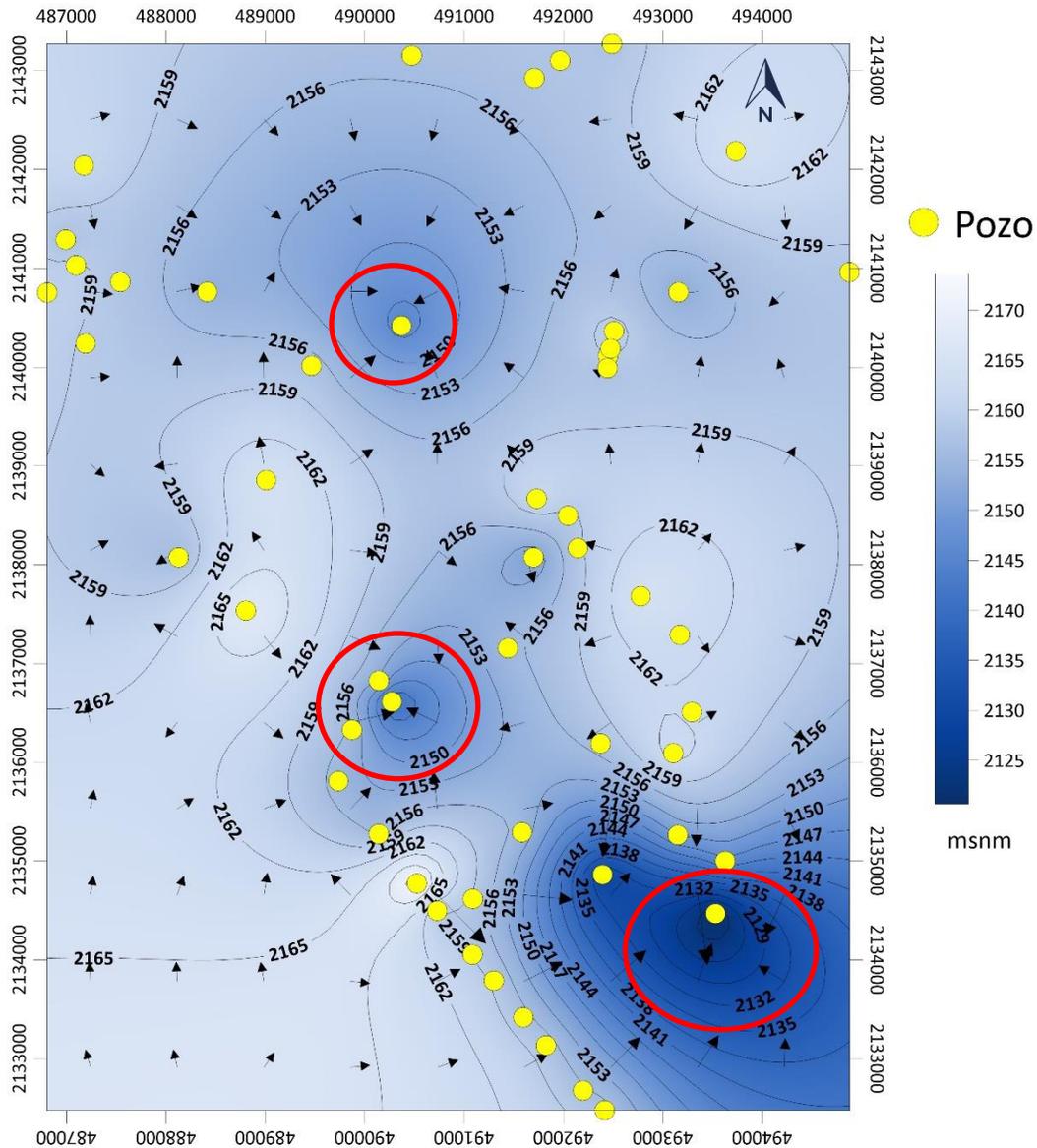


Figura 23. Elevación al nivel estático estimada en la Alcaldía. (2021) en Surfer.

2.5.5. Conductividad hidráulica y transmisividad

La conductividad hidráulica es una propiedad del agua que ayuda a describir el movimiento del agua subterránea. Esta, depende de otras propiedades de un medio poroso, como son la permeabilidad intrínseca, la porosidad del medio y el nivel de saturación de fluido que se encuentre en el medio. Para realizar el cálculo de la conductividad hidráulica, se tomaron pruebas de bombeo proporcionadas por SACMEX de algunos pozos ubicados dentro de la alcaldía, así como los valores calculados en el trabajo de Morales Casique et al., (2015), mediante aforos obtenidos en el pozo profundo San Lorenzo Tezonco. Los valores de conductividad calculados para el acuífero superior van de orden de los 4.95×10^{-5} m/s, para el pozo Agrícola Oriental No. 5, y hasta los 5.46×10^{-7} m/s, para el pozo Iztapalapa No.6. Dichos valores se ajustan a los contemplados para medios fracturados.

Para el acuífero explotado en el pozo profundo San Lorenzo Tezonco, a una profundidad de entre 1,172 y 2,008 m. El valor de la conductividad hidráulica horizontal calculado tras la inversión de datos de aforo, obtenida por Morales Casique et al., (2015), es de 0.245 m/d o 2.83×10^{-6} m/s. Los rangos de Conductividad Hidráulica que tiene en consideración CONAGUA van de 10^{-1} a 10^{-9} m/s.

La transmisividad es otro parámetro que se tiene que tomar en cuenta en un acuífero, esta es la facilidad con la que se moverá el agua en total del espesor saturado. Para este caso, solo se cuentan con los valores calculados gracias a los aforos que se tienen de pozos de agua localizados en el acuífero superior proporcionados por SACMEX. Los valores obtenidos van desde los 15 m²/día, calculados para el pozo Iztapalapa No. 6, y hasta los 1,200 m²/día, calculados para el pozo Tláhuac-Neza No.24, esto valores son correspondientes a la parte poniente de la alcaldía,

Los datos de los aforos de los pozos, y niveles estáticos para cálculo de profundidad y elevación de este, se encuentran en el apartado C de los anexos.

2.5.6. Disponibilidad

La disponibilidad de agua constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, del cual podrán explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas (CONAGUA, 2020). Para identificar la disponibilidad de agua, se debe de tomar en cuenta la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-011-CONAGUA-2011, que determina los procedimientos a

considerar para el cálculo de la disponibilidad media anual del agua subterránea (CONAGUA, 2020). La fórmula para determinar la disponibilidad media anual es la siguiente:

$$DMA = RTM - DNC - EAS$$

Dónde:

- **DMA** = Disponibilidad media anual de agua en el acuífero.
- **RTM** = Recarga total media anual.
- **DNC** = Descarga natural comprometida.
- **EAS** = Extracción de agua subterránea.

Los valores reportados son para toda la Ciudad de México, ya que esto afecta directamente a Iztapalapa. De acuerdo con el reporte de emitido en el 2020 “*Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Ciudad de México*” por CONAGUA, se muestran valores de recarga media anual de 512,800,000 m³/año. Para obtener este volumen, se toma en cuenta la recarga natural del acuífero y la recarga inducida al mismo.

Para la descarga comprometida se toman en cuenta volúmenes de aguas superficiales, ya sea de manantiales o ríos, que son concesionados, así como las salidas de agua subterránea. Para la CDMX no se reporta ningún valor de descarga comprometida.

Para determinar la extracción de agua subterránea se toman en cuenta los volúmenes concesionados inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), volúmenes de agua en registro y titulación, y si existen, volúmenes de agua de reservas, reglamentos y programación hídrica (CONAGUA, 2020). Para la CDMX, el volumen de extracción de agua subterránea reportado es de 1,020,030,340 m³ anuales, a una fecha de corte de 20 de febrero de 2020 según datos del REPGA (CONAGUA, 2020).

El valor reportado por CONAGUA (2020), al realizar el cálculo para determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea, es de -507,230,340 m³ anuales

$$DMA = RTM - DNC - EAS$$

$$DMA = 512,800,000 - 0 - 1,020,030,340$$

$$DMA = -507,230,340 \text{ m}^3 \text{ anuales}$$

El número obtenido es negativo, y es un resultado esperado ya que, la recarga anual del acuífero es menor a las extracciones que se hacen en el mismo, por lo tanto, no existe un volumen

disponible para otorgar nuevas concesiones. El que existan más extracciones que recargas es un problema muy grave que, el organismo regulador del agua en la ciudad, tiene que pensar cómo mitigar.

2.5.7. Sistema de distribución de agua potable y drenaje de la alcaldía

La información que existe acerca del sistema de distribución de agua potable dentro de la alcaldía es muy escasa, no es del dominio público y no está actualizada. Por ello, en el presente trabajo se toma lo descrito en el Atlas de Riesgos de Iztapalapa del año 2014. Los sistemas de distribución de agua potable en la ciudad están conformados por el sistema Lerma-Cutzamala, fuentes subterráneas y propias, que proporcionan un suministro de agua, para el año 2008, de 35.17 m³/s. De dicha cantidad, a la alcaldía se le distribuyen un total de 4.63 m³/s, destinando 1.03 m³/s para las actividades de la industria y 3.60 m³/s para uso doméstico (PDDU, 2008), (Atlas de riesgos Iztapalapa, 2014).

La red hidráulica de Iztapalapa cuenta con una cobertura del 97%, pero solo atiende al 75% de la población. El suministro de agua potable destinado para uso doméstico es distribuido por 12 subsistemas, integrados por tanques de regulación y tanques rompedores de presión.

El agua de fuentes externas se conduce por medio del acueducto Chalco-Xochimilco-Xotepingo, y posteriormente se abastecen cuatro tanques de regulación ubicados en la zona del cerro de la Estrella, tres de ellos con capacidad de almacenamiento de 50,000 m³ y uno con capacidad de 10,000 m³ (Xaltepec). Al sureste de la alcaldía se cuenta con un tanque más de regulación (La Caldera), el cual es abastecido por el acueducto Nezahualcóyotl, dicho tanque cuenta con una capacidad de almacenamiento de 50,000 m³

De fuentes internas, como anteriormente se menciona en el apartado de hidrogeología, se cuenta con una red de 80 pozos que suministran agua potable, con una capacidad total de bombeo de 7,076 m³, para abastecer 23 tanques de regulación con una capacidad de almacenamiento de 12,800 m³. También cuenta con 30 tanques cárcamo de rebombeo que también son utilizados para regulación, con una capacidad de 6,936 m³.

Para el tratamiento de aguas residuales, se cuenta con 23 plantas de tratamiento, destinada a la industria, servicios y al comercio (RPTAR, 2013).

El sistema de drenaje tiene una cobertura del 91% en su territorio, distribuido a lo largo de 1,799.30 km de tubería. La infraestructura consta de 76 colectores, 13 plantas de bombeo, 5 lagunas de regulación y 12 lumbreras de drenaje profundo. Por mencionar un dato curioso, el sistema de drenaje es el más complejo en toda la CDMX.

2.6. Marco hidrogeoquímico

Reconocer la calidad de agua que se suministra a la población, en este caso a Iztapalapa, es de vital importancia. Esto es debido a que, el consumir agua de mala calidad puede acarrear serios problemas de salud y sería una problemática más con las que se tendría que lidiar dentro de la demarcación.

Trabajos previos sobre la calidad del agua en Iztapalapa encargados por SACMEX a la empresa Lesser y Asociados, S.A. de C.V en 2009, dicho trabajo es citado en el artículo de Domínguez Mariani et al. (2015), del cual mencionan como resultados obtenidos, en cuanto a contenido de iones de Cl y Na en agua extraída en pozos de la demarcación, arrojaron valores altos en las zonas ubicadas en el cerro de La Estrella y la sierra de Santa Catarina el ion Cl⁻ en el agua subterránea estaba en el rango de 34.1 a 394.6 mg/L y el ion Na⁺ entre 54 a 1008 mg/L, según datos del SACMEX (2009), superando los valores permisibles de estos iones en agua destinada al uso y consumo humano.

Concentraciones de Fe que se obtuvieron, van de un rango de 0.05 – 3.57mg/L, 7 de 18 pozos muestreados por SACMEX, rebasaban el límite permisible. Las concentraciones de Mn se reportaron en un rango de 0.019 – 3.32 mg/L, 8 de 18 pozos muestreados, rebasaban el límite permisible para agua destinada al uso y consumo humano.

Trabajos realizados por Domínguez Mariani et al., (2015) tras la toma de muestras en 17 pozos (Figura dentro de la alcaldía, muestran que las mayores concentraciones de Cl en el agua subterránea provienen de las facturas generadas alrededor de la Sierra de Santa Catarina por medio de infiltración de agua residual. Menciona también que el agua subterránea tiene un sabor salado, el cual infieren que es debido a la presencia de iones de Na y Cl, los cuales rebasan los límites permisibles de calidad de agua por la NOM-127-SSA1-2017 (200 mg/L para Na⁺ y 250 mg/L para Cl⁻). 10 de 17 pozos muestreados en el trabajo antes citado, muestran altos contenidos de Na, rebasando lo permisible y 7 de 17 rebasan el límite de Cl.

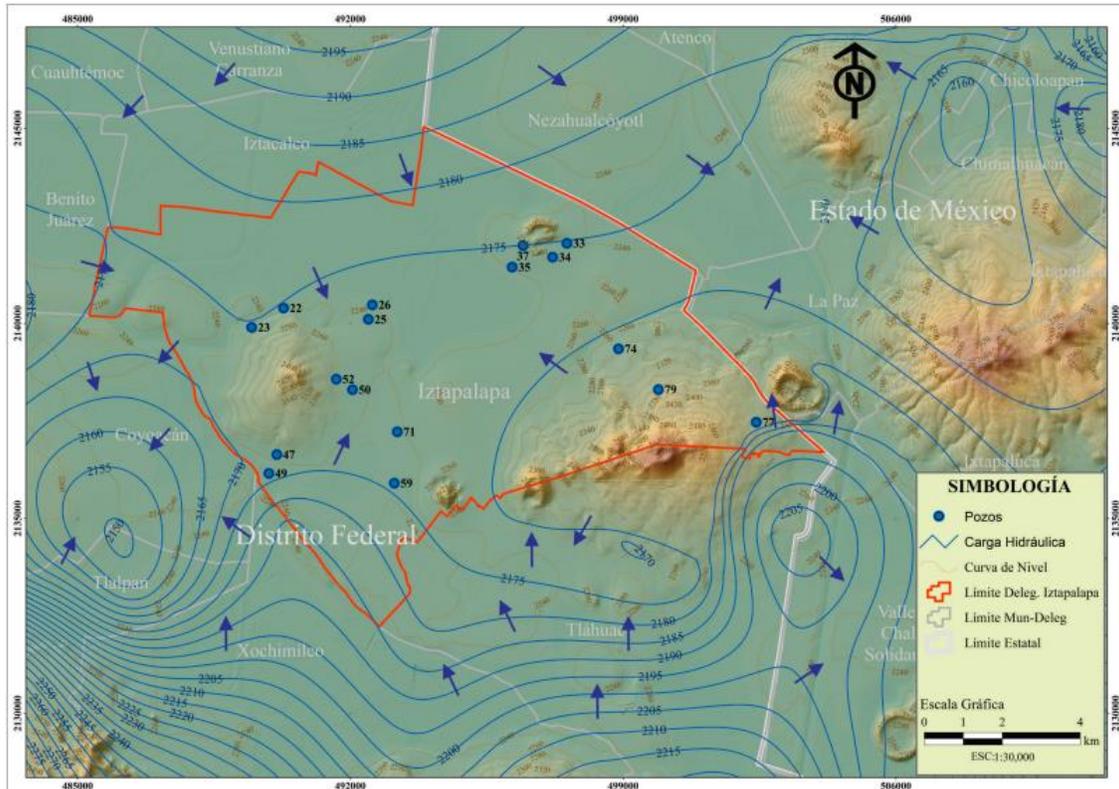


Figura 24. Ubicación de los pozos de la delegación Iztapalapa de los que se colectaron muestras de agua. Se observan las cargas hidráulicas (msnm) en la alcaldía Iztapalapa para el año 2011, de acuerdo a datos inéditos del SAMEX. Tomada de Domínguez Mariani et al., (2015).

En cuanto al contenido de Fe y Mn, obtienen valores para estos iones, en tres pozos rebasan el límite de 0.3 mg/L, mientras que el ion Mn está presente en ocho pozos rebasando el límite de (0.15 mg/L). Los aportes de estos iones están asociados al agua de poro contenida en el acuitardo, principalmente al contenido de minerales que existen en él, y esto se sustenta debido a que encontraron mayores concentraciones de estos iones en los pozos que se encuentran en la planicie de la alcaldía.

Otra de las características que contiene el agua de la alcaldía es que presenta turbidez, derivada de la precipitación de óxidos ferromagnesianos, carbonato, fosfatos y silicatos, provenientes del acuitardo.

2.7. Marco ambiental

2.7.1. Suelo

Existen dos tipos de suelos predominantes, de acuerdo con la clasificación de suelos de FAO-UNESCO, son de tipo *feozem*, que se caracterizan por contener una capa oscura, suave y rica en nutrientes y materia orgánica. Normalmente se utilizan para cultivo de hortalizas, legumbres y granos cuando son profundos; y suelos de tipo *solonchack* que se caracterizan por ser suelos salinos y están distribuidos en la parte central de la alcaldía. La vegetación que existe en estos suelos suele ser muy resistente a las condiciones de salinidad de este, por ejemplo, los pastizales.

2.7.2. Uso de suelo

El uso de suelo está clasificado, según datos del Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED), en 5 rubros:

- Habitacional: representa el 46% del territorio de la alcaldía.
- Uso mixto: está integrado por usos de suelo industrial, de almacenamiento, talleres, deshuesaderos, grandes comercios y, de forma dispersa, las grandes vialidades de la Alcaldía. El porcentaje que representa este uso de suelo es del 13%.
- Industrial: conformado por industria, ya sea mediana o pesada, representa el 3% del suelo.
- Equipamiento urbano: Este rubro está conformado por hospitales, escuelas, panteones, mercados y la central de abasto; representa el 19% del área urbana de la misma.
- Áreas verdes y espacios abiertos: Son considerados parques y deportivos, explanadas, zonas de jardines y los camellones, ocupando el 14% de la superficie urbana.

2.7.3. Áreas protegidas

En gran parte de la Alcaldía de Iztapalapa es casi inexistente la presencia de áreas verdes y protegidas, esto debido a que la mayoría del territorio forma parte de la zona urbana, reduciendo el porcentaje de áreas verdes en la misma. Algunas áreas protegidas que se encuentran dentro del territorio son el área del Parque Nacional del cerro de la Estrella, el Parque Ecológico Cuitláhuac y el área de la Sierra de Santa Catarina, principalmente las áreas naturales protegidas llamadas "Yecahuizotl" y "El Zapote". En la mayoría de estas áreas, se están llevando a cabo trabajos de rehabilitación por parte de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México para disfrute de la población.

Cabe mencionar que para el área del Cerro de la Estrella se tiene contemplada la adecuación de infraestructura hídrica que permita la captación de aguas de lluvia, con las cuales, se pretende recargar los mantos acuíferos y evitar inundaciones en la calzada Ermita-Iztapalapa.

2.7.4. Reserva territorial

La reserva territorial se encuentra prácticamente agotada, todo esto debido a la sobrepoblación desmedida que la alcaldía ha experimentado hasta la fecha, incluyendo zonas de alto riesgo geológico. Por tal motivo, este tipo de suelos no son factibles para realizar asentamientos urbanos.

El agotamiento de la reserva territorial se da, principalmente, por la donación de terrenos para la industria, equipamientos, servicios, así como edificación de unidades habitacionales (PDDU, 2008). En el año de 1997, Iztapalapa contaba con una reserva territorial de 239 hectáreas en 371 predios, principalmente ubicados en la zona denominada Cabeza de Juárez y el Salado (PDDU, 1997). Esto es un claro ejemplo de que la alcaldía no ha tenido una buena planeación urbana.

2.7.5. Vulnerabilidad

En lo relativo a vulnerabilidad, la zona se ve afectada por una alta densidad de población, la cual demanda grandes volúmenes de agua para satisfacer sus necesidades y generan grandes volúmenes de agua residual la cual lleva altos contenidos de coliformes, sólidos disueltos, hidrocarburos y altas concentraciones de elementos derivados de las actividades antropogénicas. Esta situación pone en riesgo el entorno ecológico

Otro aspecto por hacer notar es la presencia de hundimientos del terreno y socavación, esta situación se genera por el lavado del suelo ante la presencia de volúmenes de agua que se infiltran a través, principalmente, de la rotura de las tuberías de agua potable y drenaje. Sobre este punto se erogaron grandes montos económicos en la reparación de los daños y, sobre todo, en el pago de las afectaciones que se ocasionan. Esta situación se presenta por el tipo de suelo, principalmente de origen arenoso que presenta licuefacción ante la presencia de un flujo de agua.

2.7.6. Riesgo geológico

La alcaldía de Iztapalapa, debido a la dinámica de sus constituyentes geológicos, se encuentra en continuo riesgo. Los principales riesgos geológicos que presenta Iztapalapa son problemas por subsidencia y hundimientos, lo cuales, a su vez, producen zonas de fracturamiento en el suelo. Por mencionar algunos otros, se debe de tomar en cuenta la parte de susceptibilidad de laderas y remoción de masa. Cabe resaltar que, al surgir alguno de ellos, se debe monitorear para amortiguar o aminorar los daños que puedan causar.

La atención se centra hacia este tipo de riesgos ya que, al estar la alcaldía casi en su totalidad habitada, este tipo de eventos puede causar desgracias, tales como pérdidas económicas y en el peor de los escenarios pérdidas humanas. Es por ello que este tipo de problemáticas se tiene que contemplar.

2.7.7. Hundimiento

Tanto la Ciudad de México, como la misma alcaldía, sufren de esta problemática. Los hundimientos pueden provocar y/o agravar problemas de inundaciones, y daños a la infraestructura que se tiene para la distribución de agua potable. Se han asociado durante décadas a la disminución de los niveles de agua en el acuífero, tanto en la Ciudad de México, como en Iztapalapa, la problemática está asociada al mismo fenómeno. La explicación que se da es que, al reducirse los niveles de agua en el acuífero, provocan una reducción de la presión intersticial del agua en el acuitardo, lo que da como acto seguido una compactación de este, recordando que la mayoría del territorio de la alcaldía está construida sobre el acuitardo, y agregado a ello, se sabe que el espesor de las arcillas es variable, por lo tanto, los hundimientos en la misma serán diferenciales. Históricamente, Iztapalapa presenta un hundimiento de entre 0 a 12 m/año, en un periodo de 1862 hasta el año 2005, según datos presentados por el Laboratorio de Geoinformática, en el año 2008. Los resultados son debidos a que la capa de arcillas no es uniforme, y, por lo tanto, la tasa de hundimiento cambia. Se presentan hundimientos casi nulos alrededor de las elevaciones topográficas, y los mayores valores se presentan justo en la planicie. Alrededor de 23 colonias han sido afectadas por dicho fenómeno (Protección civil, 2014).

Existe una técnica que ha sido utilizada por distintos profesionales de las ciencias de la tierra, para determinar la tasa de hundimiento, ya sea a nivel regional o local. Dicha técnica lleva por nombre interferometría de radar (inSAR), que consiste en analizar los patrones de interferencia de fase de las ondas de imágenes generadas por radares de apertura sintética, y con ello obtener mapas de desplazamientos de la superficie del terreno, o medir la elevación de este. La técnica anteriormente mencionada fue aplicada por Gutiérrez Calderón R. et al. (2012) en Iztapalapa, con el fin de realizar una zonificación geotécnica de la Alcaldía. Los resultados del estudio arrojaron una tasa de hundimiento para Iztapalapa mayor a los 0.2 m/año, reportándose los valores anteriores al norte. Si se compara dicho valor, con los reportados en la literatura para la Ciudad de México, se encuentra dentro del rango (del orden de 0.3 m/año), aunque, estudios recientes realizados por Chaussard et al. (2021) revelan una tasa de hundimiento de 0.5 m/año, realizado a partir de un registro de nivelaciones de 115 años, 24 años de datos inSAR, y 14 años

de datos GPS. Se determina que los hundimientos en la ciudad son irreversibles y, para que el acuitado de la ciudad se compacte por completo, tardará un aproximado de 150 años.

2.7.8. Zonas de fracturamiento

Carreón Freyre (2011) realizó un trabajo de zonificación geotécnica para localizar zonas con fracturamiento dentro de la Alcaldía de Iztapalapa, se llevó a cabo en tres colonias de la demarcación. Se identifican tres sistemas principales de fracturamiento, en las faldas de la sierra de Santa Catarina con orientación NE-SW, un sistema de fracturas tensionales alrededor del cerro del Peñón del Marqués y un sistema de fracturas con orientación WNW-ESE correspondiente a los límites del lago de Texcoco en el siglo XIX (Carreón, Freyre, 2011). Este fracturamiento es derivado de la composición mineralógica del suelo, el cual es altamente comprensible y presenta muy baja capacidad de carga. Menciona que el tipo de deformación de los materiales arcillosos es plástica y el comportamiento de estos tiende a ser diferencial, derivada de la composición del suelo, ya que, las arcillas suelen estar intercaladas con materiales granulares y piroclásticos, lo que genera una heterogeneidad mecánica en los materiales y favorece a este fenómeno.

Las zonas antes mencionadas pueden considerarse, para los fines de este trabajo, como zonas de alto riesgo de contaminación tomando en cuenta que están habitadas y no se tiene una cultura difundida sobre el manejo de la basura. Dichos fracturamientos comprometen el agua subterránea e inhabilita la posibilidad de realizar extracciones a profundidades someras ya que, probablemente, el agua no pueda servir para consumo humano y tenga que ser tratada. En la figura 25, se presenta la zonificación realizada en el trabajo de Carreón Freyre (2011).

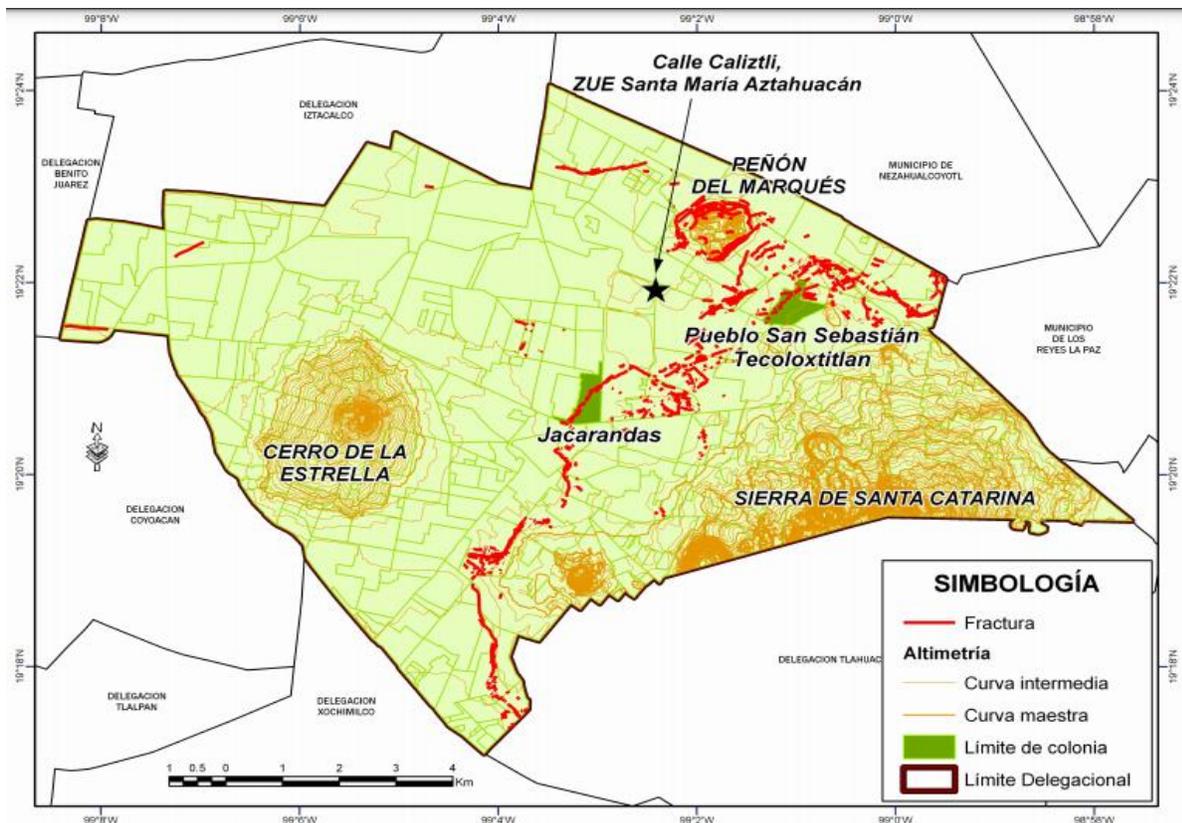


Figura 25. Mapa de Zonificación de fracturas en la Alcaldía de Iztapalapa. Tomado de Carreón, Freyre, et.al. (2011).

2.7.9. Susceptibilidad de laderas

La susceptibilidad es la propiedad de cualquier terreno que indica si las condiciones de este son favorables o no para la estabilidad considerando únicamente factores intrínsecos de los suelos y/o rocas (CENAPRED, 2019). Esto se debe tener muy en cuenta al momento de realizar cualquier planeación urbana, ya que es de suma importancia poder identificar zonas susceptibles a presentarse el fenómeno de remoción de masa, el cual implica un gran peligro para la población y para el patrimonio que les ha costado constituir. Para el año 2014, la alcaldía realizó trabajos para identificar zonas donde se pudiera presentar el fenómeno de remoción de masa y se obtuvo como resultado un mapa. Las consideraciones que se toman para realizar este tipo de estudios consideran la pendiente de los lugares a estudiar, así como el grado de erosión de las rocas presentes, la actividad humana, corrientes de agua, la deforestación existente en la zona, la geología y la geomorfología presente en la zona de estudio.

Uno de los factores que más contribuyen al riesgo por inestabilidad de laderas es el grado de vulnerabilidad de la población (CENAPRED, 2019), esto influye en la capacidad de toma de decisiones de la misma población, dependiendo de la persona o grupo, será su capacidad para

identificar este tipo de amenazas, o en su caso, de lidiar y superar este fenómeno. Es por ello por lo que el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) da una serie de medidas de prevención para este tipo de situaciones. Algunas de las recomendaciones son:

- Cuidar y conservar la vegetación de la ladera.
- Evitar y atender fugas de agua, así como la revisión periódica de la tubería de agua potable y desagüe.
- Desistir la autoconstrucción y solicitar apoyo para cambios, modificaciones y excavaciones en laderas.
- Mantenerse atento a las indicaciones de Protección Civil en la comunidad, sobre todo en periodo de lluvias.
- Revisar constantemente paredes, pisos y techos, en busca de grietas o escalonamientos. Si son detectados, llamar oportunamente a Protección Civil.

El mapa de susceptibilidad elaborado por la alcaldía en el año 2014 (figura 26) considera como zonas de susceptibilidad baja a aquellas en donde se cuenta con una pendiente de entre 25° y 35° de inclinación y una geología donde la erosión es poco presente, dichas zonas, se ubican al pie de monte de las elevaciones. Las zonas con susceptibilidad media están caracterizadas por tener pendientes con un grado de inclinación de entre 36° a 50° de inclinación, y existe una tendencia al movimiento de laderas y, por obvias razones, estas zonas se ubican en las laderas de la zona montañosa. Las zonas con susceptibilidad alta se caracterizan por presentar pendientes con un grado de inclinación de entre 51° y 89°, con severas afectaciones por corrientes de agua y por el fenómeno geológico de la erosión.

Para el cerro de la Estrella, las zonas predominantes son de media susceptibilidad en el flanco norte; baja susceptibilidad al pie de monte; y alta susceptibilidad en la parte de mayor elevación del cerro. Para la Sierra de Santa Catarina, la zona de mayor predominancia de alta susceptibilidad, se concentra en las partes de mayor elevación a lo largo de toda la Sierra, y en menor proporción se tienen zonas de media y baja susceptibilidad. Una de las zonas que más preocupación causa, es en la zona del Cerro del Peñón, la mayoría del área está marcada como zona de alta susceptibilidad. Se sabe que el cerro ha sido acondicionado para colocar unidades habitacionales, removiendo un aproximado del 50% de la masa total del Cerro, incluso, aún existen asentamientos en las laderas del cerro. En las elevaciones restantes de la alcaldía, es bien cierto que existen asentamientos urbanos, aunque la mayoría de ellos se ubican a las faldas del relieve, aunque el riesgo a inestabilidad de laderas sigue latente, todo esto debido a una mala

planificación urbana, lo que ha llevado a que la alcaldía agote en su totalidad sus reservas territoriales.

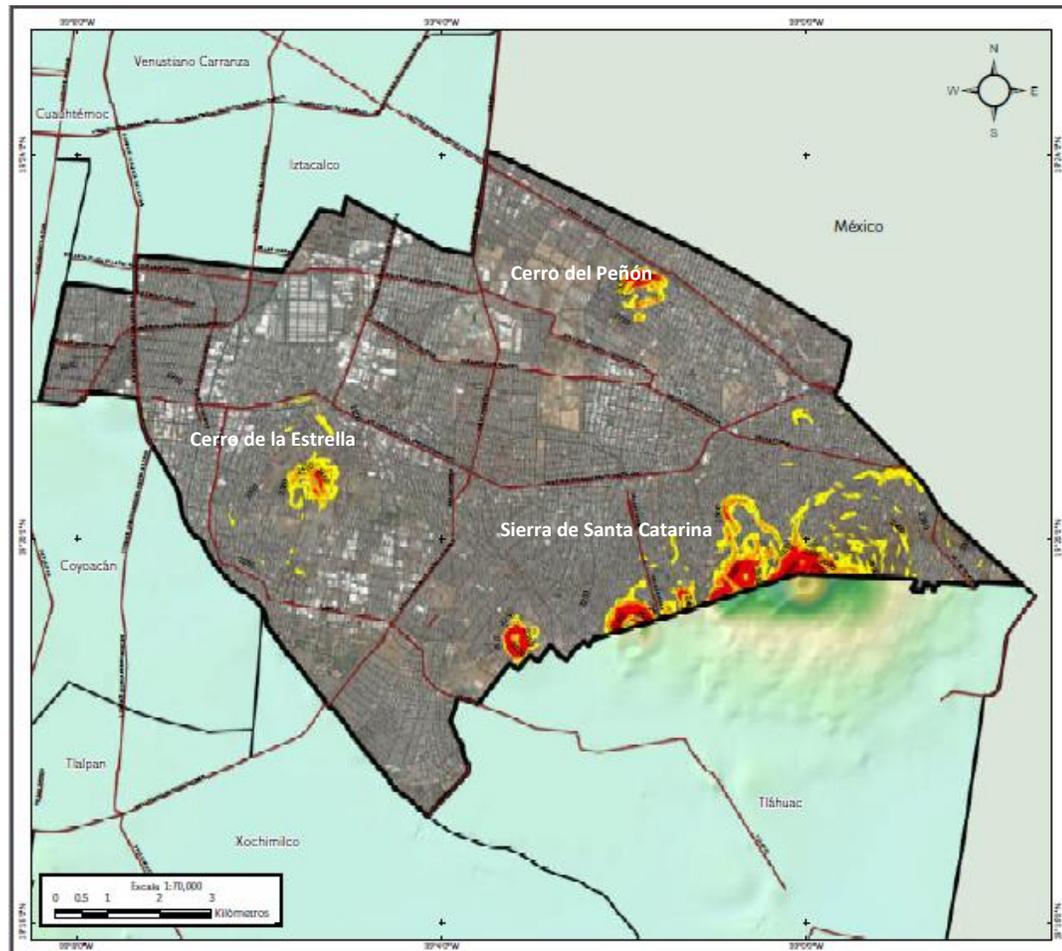


Figura 26. Mapa de Susceptibilidad por inestabilidad de laderas. Tomado de Protección Civil (2014).

2.7.10. Remoción de masa

La remoción de masa o inestabilidad de laderas está definida como la pérdida de la capacidad de un terreno de auto sustentarse, es decir, cuando un terreno montañoso ya no tiene cierta estabilidad este sufre una serie de reajustes o por definitiva termina por colapsar. Este tipo de fenómenos se dan con recurrencia en zonas montañosas, los deslizamientos son el proceso de remoción de masa que se da con mayor frecuencia en todo el país y, esto a su vez, aumentan en temporada de lluvia (CENAPRED, 2020)

Para el caso de la alcaldía, han sido detectados siete polígonos donde se puede presentar el fenómeno de remoción de masa, cuatro de ellos se ubican en las inmediaciones del cerro del Peñón, específicamente en la colonia El Paraíso, los cuales son: Peñón del Marqués (241,291

m²), Ampliación El Paraíso (25,134 m²), El Paraíso (4,665 m²) y La Joya (41,742 m²); uno en la zona del cerro de la Estrella con un área de 129,281 m², uno en la sierra de Santa Catarina con un área de 118,472 m², y Fresnos con un área de 594 m², ubicado en la colonia Xalpa (Protección civil, 2014). Las problemáticas asociadas al proceso de remoción de masa están asociadas a caída de rocas, derrumbes deslizamientos y flujos de detritos. El fenómeno geológico asociado a la remoción de masa por caída de rocas se da en los polígonos marcados como El Paraíso (producto de cortes verticales en las pendientes), Fresnos (debido a las grandes dimensiones de las rocas presentes), Ampliación El Paraíso (Poca compactación de los materiales pétreos) y sierra de Santa Catarina (alto intemperismo y erosión de las rocas presentes), recalcando que en los dos últimos, la caída de rocas es acompañada por derrumbes. Para el cerro de la Estrella, el fenómeno presente se debe a flujos de detritos, riesgo acelerado por la construcción de caminos, taludes con pendientes de 90° que son erosionados, provocando así la formación de cárcavas, adicionado a que en esta zona se reporta la existencia de cavernas, resultado de la extracción de materiales para construcción. Para el polígono marcado como Peñón del Marqués el fenómeno presente es debido a deslizamientos del terreno provocado por el movimiento lento, progresivo y continuo del terreno (Protección Civil, 2014).

A continuación, se muestra el mapa de riesgo por remoción de masa (ver figura 27) elaborado por la alcaldía de Iztapalapa. Cabe resaltar que la mayoría de los polígonos están dentro de las zonas marcadas con alta susceptibilidad e inestabilidad de laderas. Están marcados con números del 1 al 7 y cada uno esta ordenado de la siguiente manera: 1-Peñón del Marqués, 2-Ampliación El Paraíso, 3-El Paraíso, 4-La Joya, 5-Cerro de la Estrella, 6-Sierra de Santa Catarina, y 7-Fresnos.

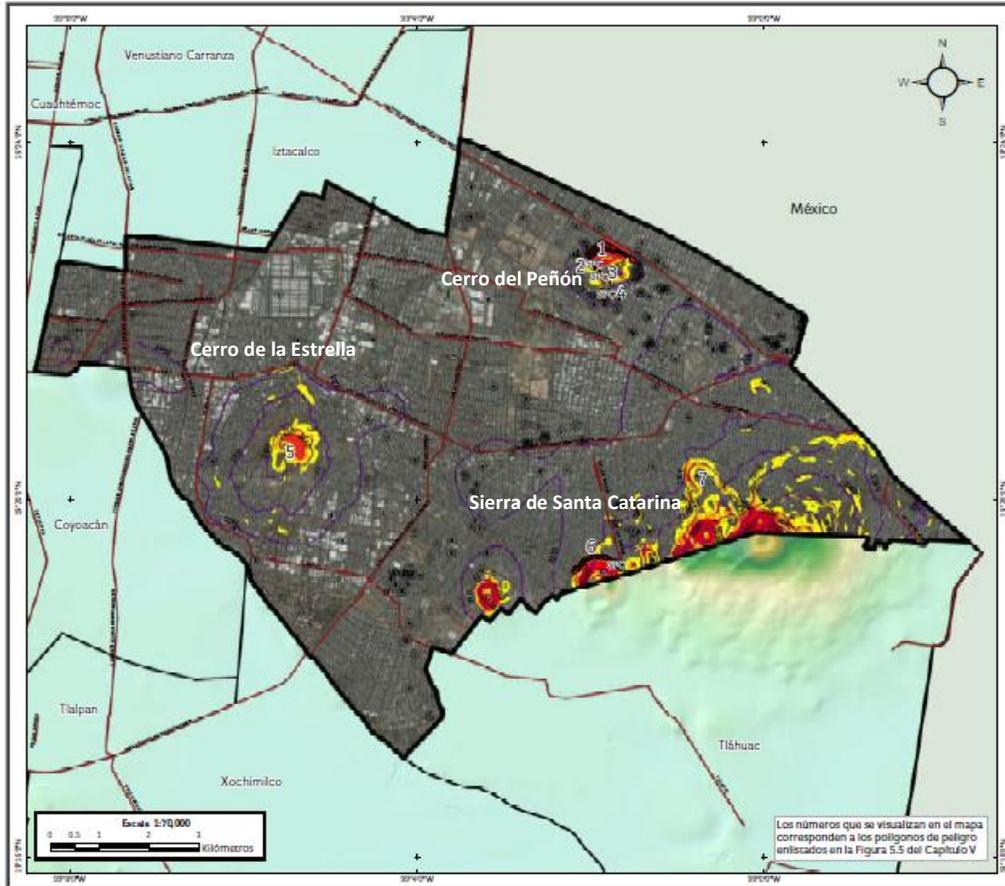


Figura 27. Mapa de riesgo por remoción de masa. Tomado de Altas de riesgos Iztapalapa (2014).

La zona del cerro del Peñón es la más vulnerable, se encuentra ante este tipo de fenómenos geológicos. Es una situación preocupante, ya que pueden ocurrir tragedias debido a los fenómenos antes mencionados, además de las pérdidas de inmuebles, puede haber pérdidas humanas, y esas son irreparables. Es de suma importancia poner la mayor atención posible a esta zona y que la alcaldía tome las medidas pertinentes de protección civil, para evitar este tipo de desastres.

La recomendación especial que se hace en el presente trabajo es evitar construir o realizar asentamientos en zonas de alta vulnerabilidad, como lo son las zonas montañosas, para evitar cualquier tipo de desastres. Si bien es difícil la contratación de personal capacitado para tratar con este tipo de fenómenos al momento de la construcción de inmuebles, para la mayoría de las familias que habitan Iztapalapa, debe ser trabajo de la alcaldía prevenir desastres y apoyar con algún tipo de asesorías en materia de construcción, a un costo accesible, así se podrían evitar demasiados incidentes.

2.8. Marco Socioeconómico

2.8.1. Población

La alcaldía Iztapalapa cuenta con 1,835,486 habitantes (INEGI, 2020) siendo así la más poblada de la CDMX. El porcentaje de hombres en la demarcación, según datos de la misma institución, es aproximadamente el 48.4%, mientras que el porcentaje de mujeres es un poco mayor, consta del 51.6% del total de su población.

Con base en lo anterior es considerando un consumo por habitante de 140 litros por día (lpd), se demanda de un gasto mínimo de 125 lps para satisfacer las necesidades básicas de la población.

La alcaldía está integrada por 319 colonias y localidades (Tabla 3) a las cuales hay que proveer del servicio de agua potable y alcantarillado. La densidad de población por kilómetro cuadrado es de 16,220 hab/km², lo cual implica que en algunas zonas de requiere de mayor volumen de agua e infraestructura de abastecimiento y de drenaje.

Tabla 3. Datos geográficos de Iztapalapa.

Indicador	
Alcaldía	Iztapalapa
Superficie	116.67 km ² .
Localidades urbanas	319
Localidades rurales	0

En lo relativo a la población, con base en el Censo de Población 2020, en la tabla 4 se detallan los datos más representativos.

Tabla 4. Datos demográficos de Iztapalapa.

Indicador	Iztapalapa
Población (2020)	1,835,486 habitantes
Tasa de crecimiento media (2010-2020)	0.1%%
Grupos de edades con mayor población	25-29 años (151,590) 20-24 años (150,740) 30-34 años (144,870)

La tasa de crecimiento es de 0.1%, esto en un periodo de 2010 a 2020, lo que representan 1836 habitantes más a los que se les tendrá que proveer de 140 litros de agua potable. Actualmente no se cuenta con la información de las colonias más pobladas, ya que los datos no han sido publicados ni por INEGI ni en el portal de la Alcaldía.

Realizando un análisis de las cifras de grupos de edades con mayor población, en conjunto, representan el 24.3% de la población total de la alcaldía, es decir, el 24.3% de la población total es representada por adultos “jóvenes”.

2.8.2. Pobreza

En el año de 2015, 33.2% de la población se encontraba en situación de pobreza moderada y 1.72 en situación de pobreza extrema (DataMexico Beta, 2021), prácticamente el 50% de la población se encuentra en condiciones de pobreza, dominando la pobreza moderada, situación que es alarmante en pleno 2021.

En el año de 2020, 0.065% de la población no contaba con acceso a los sistemas de alcantarillado, 0.25% no contaba con suministro de agua, 0.13% no tenía baño y 0.06% no poseía energía eléctrica (DataMexico Beta, 2021).

La vulnerabilidad de la población por carencias sociales alcanzó un 27.5%, mientras que la población vulnerable por ingresos fue de 8.75% (DataMexico Beta, 2021).

2.8.3. Educación

La alcaldía no tiene el mejor nivel educativo en la Ciudad de México, cifras del Censo de Población y Vivienda demuestran que, el mayor nivel educativo presente en la demarcación se encuentra centrado en el nivel secundaria con un 28.4% (403,000 personas), estos datos se generan a partir de la población con edades de 15 años y más. En segundo lugar, se encuentra el nivel de estudios de preparatoria o bachillerato con 26.1% (370,000 personas), en tercer lugar, nivel licenciatura, con un 18.9% (268,000 personas), y por último se encuentra, con un 16.5% (234,000 personas), el nivel de educación primaria. La tasa de analfabetismo es de 1.82%.

2.8.4. Economía

Las actividades económicas son de tipo secundarias (principalmente manufactura) y terciarias, destacando, junto con otras localidades del país, en las actividades manufactureras a nivel nacional según el censo económico de 2009.

Según información generada por el Censo Nacional de Población y Vivienda 2010, disponible en la página web oficial de la alcaldía, muestra que el 53.3% de la población total de entre 12 y más años de edad, eran activos económicamente, mientras que el 43.7% no lo son.

2.8.5. Industria

La industria que más destaca es la manufacturera, contando con 7,385 unidades económicas, representando un 9.41% del total de estas generadas en la alcaldía. Los ingresos generados por esta industria, para el año de 2019, fueron de 63.6 mil millones de pesos, siendo el tercer sector económico que representó mayores ingresos, con un total de empleados de 62,069 (DataMexico Beta, 2021, Censo económico, 2019).

En temas de agua, la industria manufacturera consume un total de 733,324 m³/año (RDAR, 2016). Contemplado que el consumo total es de 146,011,680 m³ /año, representa el 0.5% del consumo total.

2.8.6. Servicios

Los servicios que se encuentran identificados son: servicios de alojamiento temporal y preparación de alimentos y bebidas, Otros servicios, excepto gubernamentales, servicios de salud y asistencia social, servicios de apoyo a los negocios y manejo de residuos y desechos, y servicios de remediación, servicios profesionales científicos y técnicos, servicios educativos, servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes inmuebles e intangibles, servicios de esparcimiento cultural y deportivo, y otros servicios recreativos, transporte, correos y almacenamiento, servicios financieros y de seguros, construcción, Información en medios masivos y corporativos (DataMexico Beta, 2021, Censo económico, 2019).

De los anteriores, los servicios que más unidades económicas registran son otros servicios, excepto actividades gubernamentales con 11,959 unidades económicas con ingresos de 3.47 mil millones de pesos para el año de 2019 y un número de empleados de 22, 258 ; los servicios de alojamiento temporal y preparación de alimentos y bebidas con 8,897 unidades económicas, con ingresos de 7 mil millones de pesos y 25, 521 empleados; y los servicios de salud y asistencia social con 2,696 unidades económicas y un ingreso de 1.69 mil millones de pesos y 7, 331 empleados (DataMexico Beta, 2021, Censo económico, 2019).

Este sector económico es el que cuenta con el mayor consumo de agua, con 1,118,802 m³/año (RDAR, 2016), representando el 0.76% del agua total que se suministra a la alcaldía.

2.8.7. Comercio

El comercio en Iztapalapa está dividido en dos partes: comercio al por menor y al por mayor. El primero es donde reside el mayor número de unidades económicas, contando con 38,354, con un ingreso total de 83.6 mil millones de pesos para el año de 2019 siendo este el sector con mayores ingresos. Cuenta con un total de empleados que laboran en este sector de 80,688.

El comercio al por mayor registra una planta de empleados de 29,980, con un ingreso total de 74.5 mil millones de pesos, siendo la segunda actividad con mayor aporte económico y un total de 3,710 unidades económicas.

El consumo de agua que tiene este sector económico consta de 361,447 m³/año (RDAR, 2016), representando así el 0.24% del suministro total.

Capítulo 3. Problemática del agua

La problemática del agua potable en la alcaldía debe atenderse de manera inmediata, ya que es de conocimiento mundial. Es necesario realizar y proponer nuevas acciones para no solo depender del agua subterránea, sino también aprovechar el agua proveniente de las precipitaciones en la demarcación.

Una de las problemáticas que aquejan a Iztapalapa es que la red de distribución de agua potable cuenta con fugas del orden del 40%, todo esto provocado, principalmente por la inestabilidad del suelo. (Atlas de riesgos de la Delegación Iztapalapa, 2011). Dicho problema también afecta a la red de drenaje, lo que provoca la contaminación del agua subterránea. Para el año 2011, la red de agua potable trabajaba con un déficit de 1.5 m³/s.

La calidad del agua dentro de los mantos acuíferos existentes se ve demeritada por infiltraciones que se presentan en el terreno por cuestiones de tipo de suelo (agrietamiento, fracturamiento), así como también por una falta de cultura sobre el manejo de la basura.

Otra de las problemáticas identificadas es la explotación intensiva del acuífero, lo cual provoca abatimiento de los niveles estáticos, además, recordando que la alcaldía cuenta con una pendiente casi nula y agregando que la mancha urbana funge como una capa impermeable, no permite la recarga de este. Así mismo, el abatimiento genera fracturas y fallas en la capa impermeable, lo que desencadena la contaminación.

Sumado a la problemática anterior que la distribución no es equitativa; en la porción sureste y noreste de la alcaldía, el servicio es constante, pero existen problemas de calidad en el agua; y en la parte norte, centro y sur, el servicio no es constante y el agua es de mala calidad. Sin olvidar que la zona suroriente es la que presenta más afectaciones de carencia y deficiencia en el suministro de agua potable.

Según el Programa Provisional de Gobierno 2019-2020 de la Alcaldía, en el apartado “Agua para todos”, el suministro pactado por el gobierno será de 4,430 litros por segundo (lps), lo que daría un aproximado de consumo de 210 litro por día (lpd) por habitante. Sin embargo, mediciones actuales muestran que solo se distribuyen 2,680 lps, lo que da un consumo al día por habitante de 127.23 lpd. Este valor, aunque no suficiente, satisface las necesidades básicas de la población y el problema es que no todos cuentan con el vital líquido.

El problema del suministro de agua potable ha provocado el descontento de la población contra el Gobierno Local y Federal, ha sido motivo de múltiples manifestaciones, así como cierre de avenidas principales dentro de la demarcación.

En resumen, la distribución de agua potable no es la misma para cada una de las zonas de la alcaldía, agregado a esta situación, el territorio de la demarcación muestra agrietamientos y hundimientos que provocan fallas y afectaciones en la infraestructura para transportar agua potable, así como la posible infiltración de contaminantes a las reservas que se tienen en el subsuelo. Es un problema muy grave que se debe de atender a la brevedad, ya que, "... el derecho humano al agua es indispensable para vivir dignamente y es condición previa para la realización de otros derechos humanos" (ONU, 2002).

Según la ONU, una persona consume un total de 100 l/día de agua, pero este dato no es equitativo en todas las naciones, datos de CONAGUA (2015), sugieren que el mexicano promedio necesita o consume un total de 380 l/día entre agua de consumo y de uso doméstico, más de 3 veces lo propuesto por la ONU. Tomando en cuenta este dato, considerando la población de Iztapalapa, se tendría que suministrar un total de 697,484,680 lpd de agua en Iztapalapa. Cuota que no se cubre por la problemática presentada.

3.1. Normatividad

Si bien se cuenta con algunas normas relacionadas con el agua subterránea, no siempre se aplican en forma correcta. Esta situación genera problemas al no documentar y resguardar de manera adecuada la información, ya que muchas veces se repiten malas prácticas. Por ejemplo en la norma NOM-003-CONAGUA-1996, *Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos*, no se guarda en un repositorio oficial la información que se generó relativa a: Tipo de material perforado, estratigrafía, horizontes permeables, diseño definitivo del pozo, registro geofísico de pozo, muestras de canal y su descripción, pruebas de aforo y bombeo, calidad del agua y geometría del pozo, Así como también equipamiento, entre otros. O bien, los resultados están enterrados en alguna computadora sin poderse aprovechar como marco físico de referencia para otras perforaciones.

En cuanto a la disponibilidad también existe la norma NOM-011-CONAGUA-2000, Conservación del recurso agua -Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, para realizar la cuantificación. Esta situación es similar a lo expuesto anteriormente, la falta de una cultura de medir no permite tener la información actualizada y los valores de disponibilidad se sustentan con datos no apegados a la

realidad (número de pozos, volúmenes de extracción, posición de los niveles estático y dinámico, propiedades hidrodinámicas no acordes al horizonte actual de extracción) (ver Figura 28).

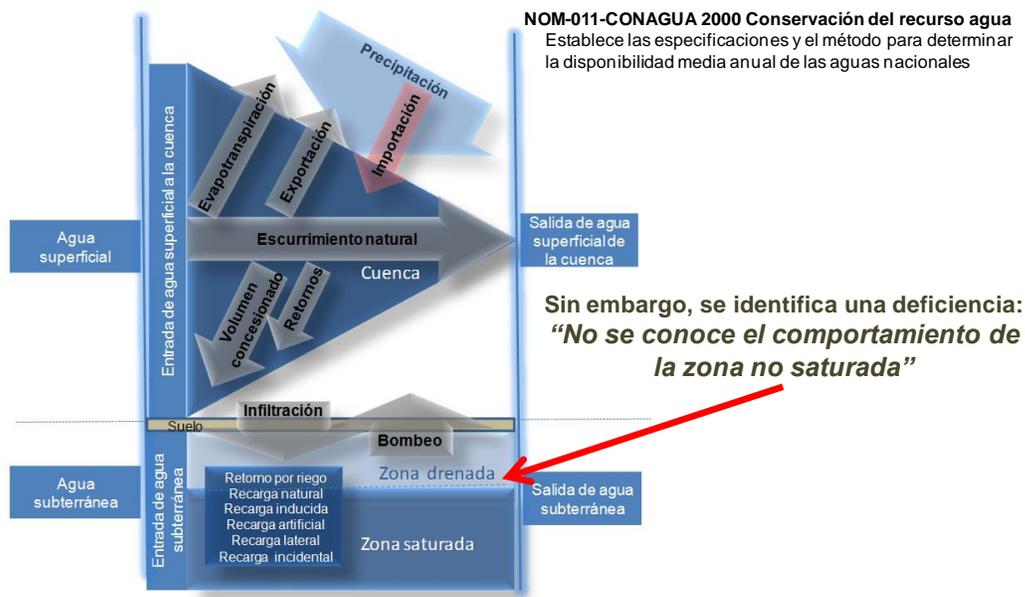


Figura 28. Descripción gráfica de la norma NOM-011-CONAGUA-2000.

Existen dos normas asociadas a la infiltración de agua, la NOM-014-CONAGUA-2007, *Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada*, está orientada a regular el uso del agua residual, considerando al suelo y subsuelo como planta de tratamiento natural, que puede ser aprovechada con una combinación adecuada de retratamiento-tratamiento natural postratamiento, compatible con el método de recarga y con el uso que se le pretenda dar al agua recuperada, estableciendo los requisitos que se deben cumplir en cuanto a la calidad, operación y monitoreo (ver figura 29). Sobre ésta, se desconoce el comportamiento del suelo, si tiene la capacidad de infiltrar y sobre todo de absorber los elementos contaminantes; además, de que, para llevar a cabo una recarga al acuífero, se debe dejar de extraer agua para identificar qué tanto incide en el acuífero, además de que, al plantearse, se piensa que en cualquier sitio se puede aplicar. Esta situación debe de replantearse y a lo mejor no ser tan optimista en que se vaya a recargar, sino más bien, plantearlo como proyectos para mitigar la aceleración del abatimiento.

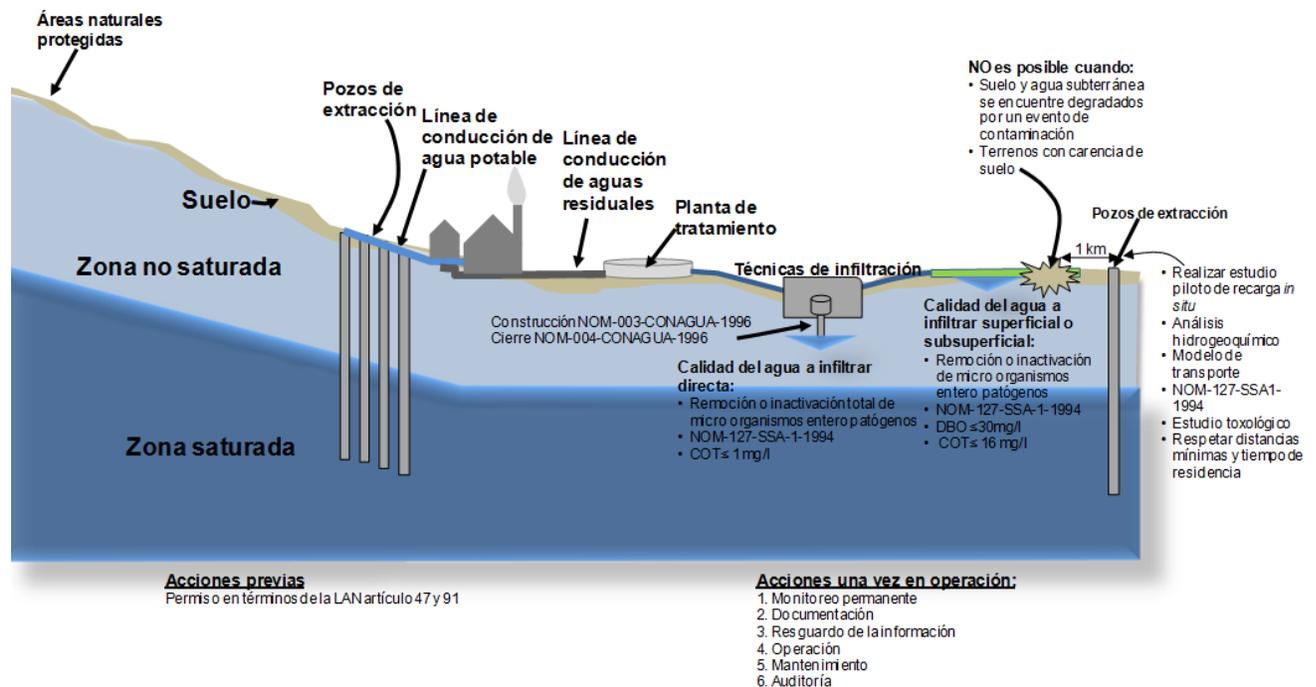


Figura 29. Descripción gráfica de la norma NOM-014-CONAGUA-2007.

En cuanto a la segunda norma, NOM-015-CONAGUA-2007, *Infiltración artificial de agua a los acuíferos. - características y especificaciones de las obras y del agua*, se orienta a la protección de la calidad del agua de los acuíferos y al aprovechamiento del agua pluvial y de escurrimientos superficiales para aumentar la disponibilidad de agua subterránea a través de la infiltración artificial (Ver Figura 30). Sobre esta norma, al no conocer el comportamiento de la zona drenada, es muy aventurero decir que se deberá introducir el agua 5 m por arriba del nivel estático. ¿Qué sucedería si el medio es fracturado? El agua del acuífero se contaminaría; además, de que se plantea que el agua de infiltración debe ser de la misma calidad del acuífero. ¿Para qué “recargarla” si se puede aprovechar?

En esta norma se incluye que el agua que se dispone al suelo y subsuelo, debe cumplir con la calidad, de acuerdo con la norma, para uso potable, lo que eleva sustancialmente el costo de tratamiento, y en muchos casos el agua del acuífero se encuentra contaminada.

Es importante identificar los retos que enfrenta el SACMEX y su compromiso con la sociedad y ambiente (ver Figura 31).

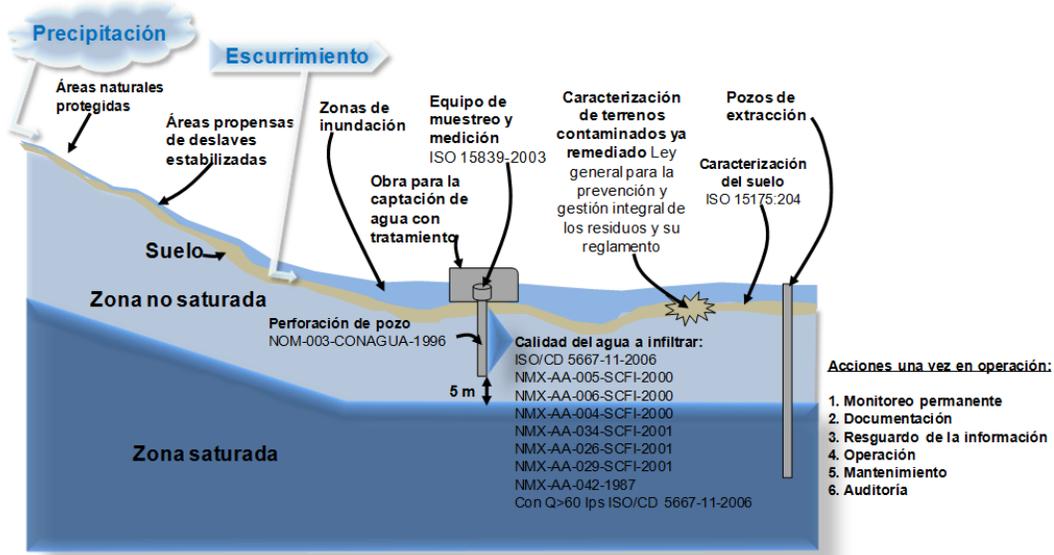


Figura 30. Descripción gráfica de la norma NOM-015-CONAGUA-2007.

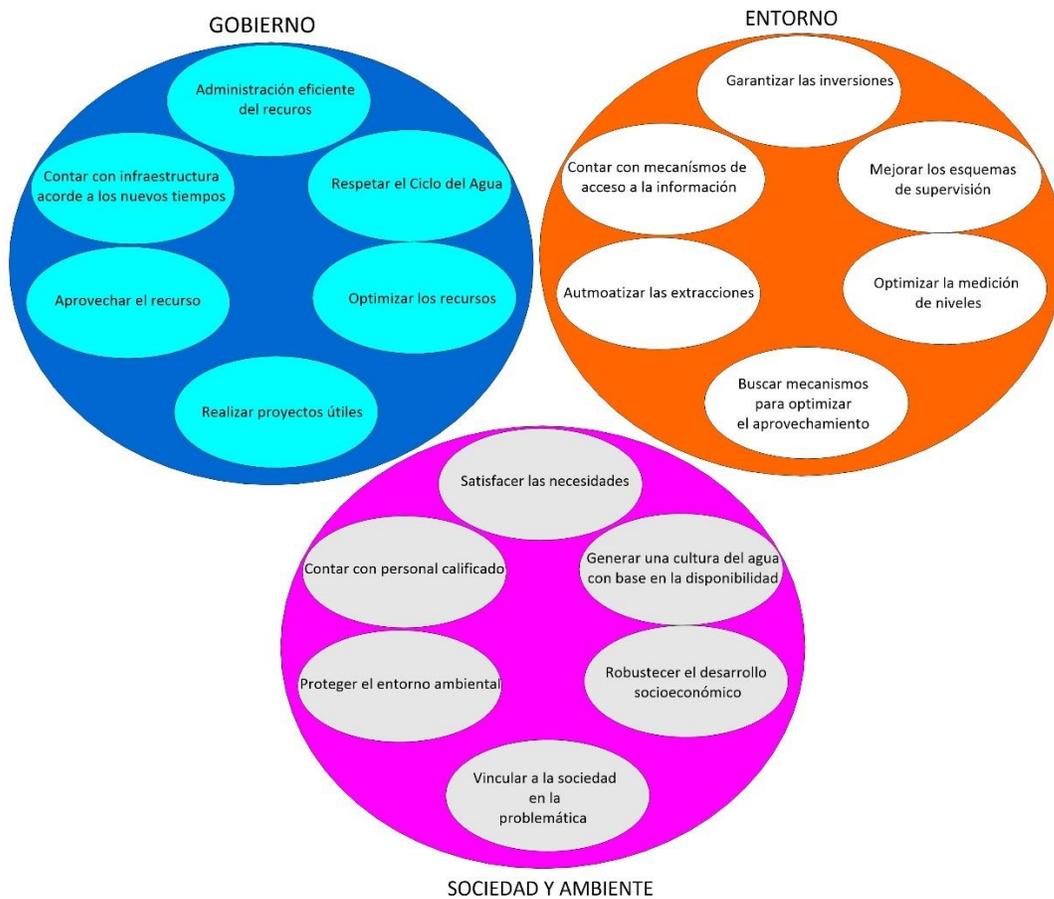


Figura 31. Elementos del entorno y su impacto.

De la figura 31 se infiere la complejidad de los proyectos a realizar en el futuro, ante la incertidumbre, si se contará o no con el recurso agua, se deberá buscar la armonía entre el gobierno, sociedad, entorno y ambiente.

A medida que pase el tiempo se presentarán problemas relacionados con:

- Organización del crecimiento poblacional, hacia donde dirigirlo o cómo planearlo.
- Disminución y agotamiento de fuentes locales de abastecimiento.
- De dónde traer agua para satisfacer la demanda.
- Incrementos de riesgos geológicos asociados a la subsidencia, agrietamiento y hundimiento del terreno.
- Movimientos diferenciales del terreno que afectan a la infraestructura urbana.
- Gastos para pagar indemnizaciones por afectación a la infraestructura urbana ocasionados por el agua de lluvia no controlada y hundimiento del terreno
- Aprovechamiento o desalojo del agua residual.
- Descontento social.
- Legislación y normatividad del agua.
- Falta de personal capacitado para enfrentar los retos del agua.
- Contar con los recursos económicos suficientes para plantear nuevas inversiones para satisfacer la demanda del agua.
- Sobre costo del agua por traerlo de zonas fuera de la Alcaldía.
- El reto es enorme y se deberán poner en práctica la eficiencia, experiencias, nuevas tecnologías y conocimientos sobre el uso y aprovechamiento del agua, para garantizar los retornos de inversión de los proyectos.

3.2. Identificación de necesidades

La identificación de necesidades de la alcaldía Iztapalapa es una actividad prioritaria, ya que a partir de ellas se propondrán las directrices que lo lleven a ser una institución reconocida por su conocimiento y apoyo de las necesidades de disponibilidad, distribución, control, gestión y saneamiento del agua.

Con el propósito de identificar y tener una visión más clara sobre la problemática del agua en la alcaldía, se planteó un análisis sobre las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas que se presentan en ella; cabe mencionar que estas se plantean a nivel personal, con base en la conceptualización que se tiene del problema, en la Tabla 5 se plantean algunas de las acciones e ideas que se identifican:

Tabla 5. Análisis, ideas y acciones a realizar identificadas del análisis de la información.

Fortalezas:	Debilidades
<ul style="list-style-type: none"> • Identificar: <ul style="list-style-type: none"> ✓ La disponibilidad de agua. ✓ La problemática en materia de agua que se presenta. ✓ Los proyectos prioritarios. ✓ Al recurso humano experimentado. ✓ La tecnología e infraestructura disponible. ✓ Cómo se administran los proyectos de inversión. ✓ La cultura del agua. ✓ Los servicios que se proporcionan a la población. ✓ Las limitaciones técnicas, económicas, financieras políticas y sociales que se presentan en materia de agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar: <ul style="list-style-type: none"> ✓ El recurso económico suficiente para resolver la problemática. ✓ Manera en cómo se documentan los proyectos. ✓ Falta de una herramienta informática que concentre la información hidrogeológica. ✓ Carencia de personal suficiente, preparado y experimentado para enfrentar el reto. ✓ Trabajo en equipo. ✓ Mecanismo de difusión sobre la problemática del agua y cómo se enfrenta. ✓ Cómo se toman de decisiones. ✓ Competencia por el recurso. ✓ No existe cultura del agua.
Oportunidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fortalecer el diseño y documentación de los proyectos de inversión. ✓ Preparar al personal con los conocimientos y habilidades necesarias para resolver la problemática y prever riesgos. ✓ Fortalecer el conocimiento hidrogeológico. ✓ Desarrollar una cultura del agua con base en la disponibilidad. ✓ Contar con una base de datos actualizada de la situación y condición del acuífero que permita la toma oportuna de decisiones. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ No contar con agua de calidad para abastecer a la población. ✓ No contar con el recurso económico para realizar los proyectos. ✓ Fuga de talento técnico. ✓ Pérdida de oportunidad por tiempos largos en el diseño y documentación de proyectos de inversión. ✓ Altos costos de operación por ineficiencia en el servicio.

Por lo anterior, habrá necesidad de orientar los proyectos a:

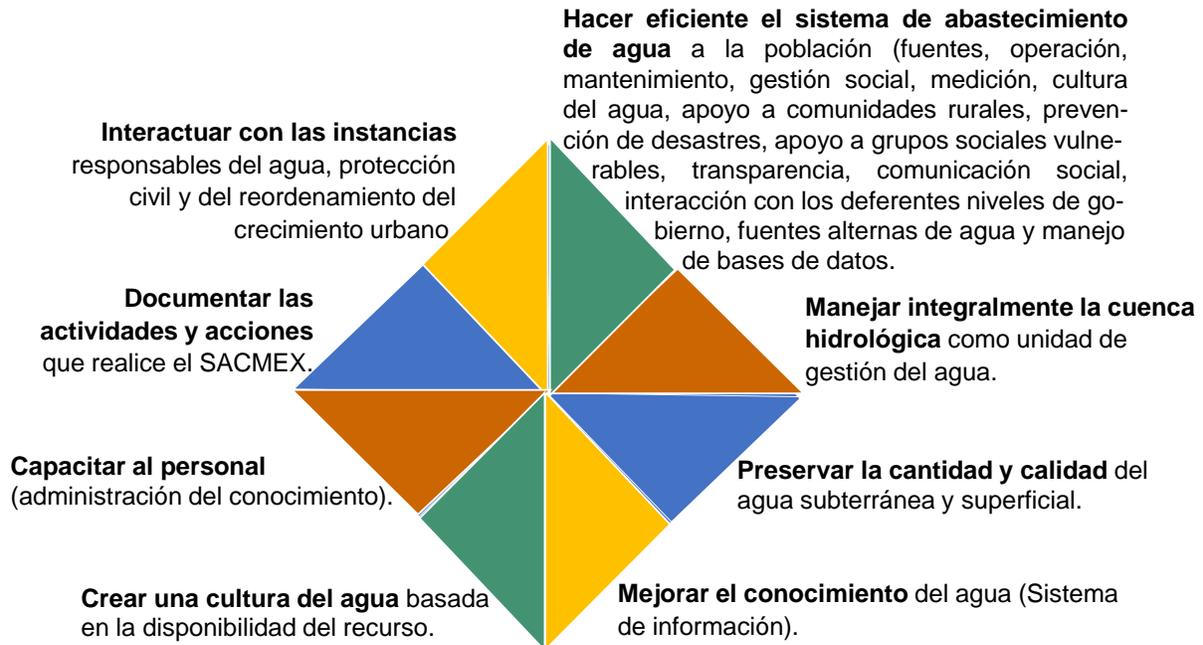


Figura 32. Orientación de proyectos.

Los esfuerzos y retos de la sustentabilidad tienen en la cuenca hidrográfica, la unidad básica para ordenar los esfuerzos del manejo del territorio, con una visión común y buscando la adaptación al cambio climático de los sectores, que tienen vulnerabilidad por los inminentes cambios en los regímenes de precipitación y temperatura.

Sobre esto, el conocimiento de las actividades y acciones a realizar por el SACMEX es la parte fundamental para formular y desarrollar cualquier tipo de proyecto. De contar con el conocimiento integral a nivel cuenca de las condiciones que prevalecen en ella, la incertidumbre se reduce y se incrementa el éxito de los proyectos (ver Figura 33).

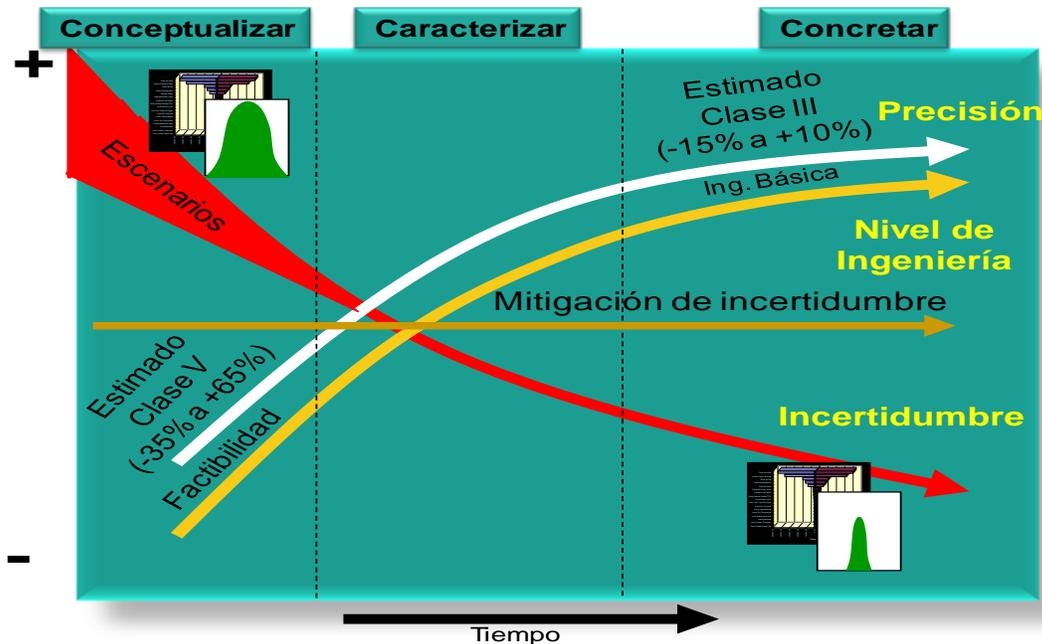


Figura 33. Elementos considerados y resultados esperados aplicando un conocimiento documentado.

Hay que poner atención en temas relacionados con la eficiencia en el bombeo de utilizar energías alternativas para la operación de los pozos, así como proponer mejoras y modificaciones a la legislación en materia de agua y normas en cuanto a la recarga del acuífero con agua tratada, para disminuir el impacto que pudiera presentarse por la infiltración de agua contaminada al acuífero a través del medio fracturado.

En cuanto a la situación social se deberá trabajar mucho con los habitantes para que le den el valor real al agua; si bien hoy en día algunas colonias no cuentan con un suministro continuo, el hecho de tenerla por tandeo o por periodos, es más que suficiente para resignarse; sin embargo, a medida que el agua sea más escasa o los periodos de abastecimiento más largos, el descontento será mayor. Si bien, el agua se considera como un Derecho Humano, por una parte, y por otra un don divino, hay que recordar que, si bien puede haber agua en un lugar determinado, tiene un valor económico conducirlo a la puerta de las casas de los habitantes, situación que la gente no comprende. El crecimiento de las actividades socioeconómicas demanda de grandes inversiones; sin embargo, si no se cuenta con una fuente sustentable de abastecimiento de agua potable, un manejo integral del recurso, todo lo ya dicho se puede venir a tierra.

Si bien el acuífero presenta grandes problemas de disponibilidad en este momento, es necesario identificar nuevas fuentes de abastecimiento de agua, controlar la contaminación y prevenir el

riesgo geológico. Lo anterior, requiere de personal especializado que evalúe el entorno físico, geológico, hidrogeológico, hidrogeoquímico, socioeconómico y financiero para la oportuna toma de decisiones.

El SACMEX tiene una responsabilidad muy importante y trascendente en la toma de decisiones en el sector hídrico: *“Abastecer y proveer de agua en cantidad y calidad a la población”*. Para ello, cuenta con el conocimiento sobre los estudios que se han realizado sobre evaluación del potencial hídrico subterráneo, construcción de pozos, generando obras de almacenamiento y distribución del recurso, redes de drenaje, así como también obras de conducción de agua residual y de tratamiento para sanear el territorio que administra.

Las necesidades del SACMEX en la alcaldía, en materia de conocimiento, se orientan a:

- Contar agua en cantidad y calidad.
- Buscar fuentes de abastecimiento locales y externas.
- Contar y mantener la información actualizada sobre las condiciones y situación del agua en el acuífero
- Resguardar en un sistema de información geográfico la información hidrogeológica.
- Bases de datos la información.
- Innovar, desarrollar y promover metodologías para disponer, mantener o incrementar el conocimiento hidrogeológico.
- Fomentar y fortalecer una cultura de comunicación a todos los niveles.
- Desarrollar una cultura del agua a través de los diferentes medios de comunicación.

Los retos por enfrentar se orientan a:

- Optimizar el desarrollo de los proyectos de abastecimiento, distribución, control y saneamiento.
- Actualizar y mejorar los esquemas de extracción y distribución del agua.
- Identificar áreas de oportunidad para el mejor aprovechamiento del agua.
- Disminuir el grado de incertidumbre de los proyectos.

Con base en lo anterior, se reitera que los proyectos en el futuro serán más complejos y requerirán de personal especializado y capacitado. A su vez los proyectos demandarán un grado

de sustentabilidad mayor, lo cual se logra, entre otros, con una metodología sistemática que permita conocer la asertividad y evolución de estos.

Cabe recalcar que en la manera en que se optimicen los proyectos el abastecimiento de agua a la población se verá beneficiado en los costos de operación y distribución.

Capítulo 4. Estrategia para ordenar y desarrollar el conocimiento del agua

subterránea

La historia ha mostrado que, a pesar de haber realizado una infinidad de estudios de factibilidad hidrogeológica, de exploración geológica y geofísica, cuantificación del agua disponible en los acuíferos, perforaciones de pozos, estudios de calidad del agua, identificación de zonas vulnerables y de riesgo, no se cuenta con el conocimiento integral del comportamiento del agua, en específico, dentro de los límites de la alcaldía Iztapalapa. Lo anterior reduce la oportunidad de:

- Planear las necesidades en el corto, mediano y largo plazo del recurso.
- Ordenar el crecimiento de la Alcaldía, a pesar de que se cuenta con un plan de desarrollo.
- Dar continuidad a proyectos.
- Prevenir riesgos.
- Tomar decisiones oportunas sobre el uso, manejo, reaprovechamiento y distribución del recurso.

Por otra parte, en la Tabla 6 se plantean algunas de las situaciones que no permiten el logro de los objetivos en materia del recurso agua.

Tabla 6. Nuevo enfoque para la sustentabilidad del agua.

<u>Situación actual</u>	<u>Situación deseada</u>
La disponibilidad de agua en cantidad y calidad se ve afectada por el crecimiento de la población y planta productiva que demanda día a día mayores volúmenes de agua.	Contar con el recurso agua en cantidad y calidad para sustentar las actividades socioeconómicas de la Alcaldía.
El conocimiento actual del SACMEX está disperso, almacenado en estudios y su <i>Know How</i> en la mente de los técnicos encargados de generarlo y aplicarlo.	Conocimiento orientado a resultados basado en una metodología sistemática que permita tomar la decisión adecuada y oportuna de los proyectos de inversión.
No hay una cultura del agua orientada al cuidado de la calidad del agua superficial.	Apoyar en promover la educación de la población.
El ciclo del agua está alterado.	Entender el ciclo del agua de la cuenca hidrográfica como unidad de gestión en cualquier proyecto relacionado con el agua.

<u>Situación actual</u>	<u>Situación deseada</u>
Se desconoce la disponibilidad de agua superficial y subterránea y en particular de la condición que guarda la Alcaldía Iztapalapa.	Mantener actualizada la información hidrogeológica del acuífero, en especial dentro de los límites de la demarcación de la Alcaldía Iztapalapa.
Se realizan estudios de evaluación hidrogeológica y factibilidad de nuevas fuentes en forma aislada, para reponer pozos, en zonas donde la exploración indirecta es imposible de realizar.	Concentrar la información y tomar decisiones en conjunto entre los tres niveles de gobierno y los responsables de las actividades productivas, para reinterpretar la geología e hidrogeología.
Existen diversas fuentes de información.	Promover un sistema de resguardo de información único.
La cuantificación actual de los estudios de disponibilidad se ocupa información no actualizada	Fortalecer el sistema de medición que tiene el SACMEX y hacerlo extensivo a los otros usuarios del agua.
Se tiene en estos momentos una eficiencia del 60%. El volumen que se ocupa del agua superficial prácticamente se pierde en la red de drenaje o afecta la infraestructura urbana.	Captar y aprovechar de manera eficiente el agua de lluvia.
Catálogo de captaciones no actualizado, a pesar de los esfuerzos que realiza la CONAGUA a través del REPDA.	Actualizar la información de las captaciones ante la CONAGUA.
Existen plantas de tratamiento con diferentes procesos.	Contar con plantas de tratamiento que realicen procesos similares para reducir costos de mantenimiento y operación.
Si bien se realiza ya un tratamiento del agua residual, esta no se aprovecha al ser tirada de nueva cuenta a los cuerpos superficiales aguas abajo, así como los residuos.	Aprovechar el agua residual tratada para recargar el acuífero o bien para ser usada con otros fines, y en su caso, llegar al tratamiento necesarios para ser aprovechados como agua potable. Los lodos aprovecharlos, una vez procesados, como fertilizantes.
Las concentraciones de sólidos totales disueltos del agua superficial van en incremento.	Disminuir el vertido de agua residual cruda a través de incrementar la red de alcantarillado a las comunidades que no cuentan con él y realizar el tratamiento del agua residual pertinente.
Se desconoce el estado actual de los basureros municipales y no municipales.	Llevar acciones de limpieza y control de lixiviados para que no contaminen al acuífero y cuerpos superficiales de agua.

<u>Situación actual</u>	<u>Situación deseada</u>
La Alcaldía Iztapalapa es vulnerable a la contaminación por rotura de la red de drenaje, licuefacción y permeabilidad del suelo.	Contar con un programa de mantenimiento y protección de fuentes de abastecimiento, distribución y recolección de agua.
La falta de educación restringe el entendimiento del ciclo del agua y no puede plantearse un proyecto de cultura del agua ad-hoc a las condiciones de la zona.	Promover la educación de la gente como medio para vivir mejor y tomar mejores decisiones.
La falta de una comunicación eficiente genera descontento social.	Promover y favorecer la comunicación como medio para fortalecer el conocimiento del agua.
El personal del SACMEX requiere de capacitación permanente para proporcionar un mejor servicio.	Identificar las competencias del personal de Organismo a través de programas de capacitación que requiera el organismo y el personal.
No se documentan las acciones que se realizan sobre el agua.	Contar con un proceso de administración del conocimiento que permita identificar, seleccionar, capturar, resguardar, aprovechar y evaluar el conocimiento que se genere sobre el uso y manejo del agua.
Personal con conocimientos sobre el manejo integral del agua que no ha tenido la actualización requerida	Establecer planes de seguimiento y capacitación del personal actual y preparar a nuevos técnicos.

La estrategia que se propone en este trabajo se enfoca en el establecimiento del manejo sustentable del agua en la alcaldía Iztapalapa, haciendo énfasis que la información generada a la fecha, *banco de información*, es la base para conformar el contexto hidrogeológico. El *cambio de cultura* hay que trabajarlo con los diferentes sectores de la población para concientizar sobre las condiciones que presenta el agua en cuanto a su disponibilidad. La identificación de necesidades actuales y futuras de agua se plantea con base en la información disponible. En la Figura 34 se muestra el esquema cómo se plantea el manejo sustentable del agua. También es necesario pensar que una vez que se tenga un orden en el manejo integral del agua, habrá que pensar en el manejo integral del medio ambiente.



Figura 34. Estrategia para el manejo sustentable del agua (Exevhi).

Hay que tomar en cuenta que el cambio climático, si bien en los últimos años ha favorecido con agua pluvial extraordinaria, es necesario identificar los periodos a futuro en que el agua podrá ser escasa, y hay que recordar que el 30% del agua que abastece actualmente proviene del sistema Lerma-Cutzamala y del estado de México.

Para tener el conocimiento de esto, es necesario contar con un sistema de información documental, en donde además de identificar y concentrar el conocimiento tácito que se ha generado en todos los rubros que inciden en la disponibilidad y manejo del agua, sea la base para generar nuevo conocimiento, no repetir proyectos que se hayan hecho con anterioridad y sobre todo lograr la eficiencia en el servicio de proveer agua a la población.

En cuanto al conocimiento del subsuelo a profundidad. Dado que la mancha urbana en la alcaldía prácticamente cubre el 90% y se requiere de realizar investigaciones a más de 1000 m de profundidad, para la búsqueda de agua, la aplicación de las técnicas geofísicas se limita a aplicar sísmica de reflexión y gravimetría.

Sísmica de reflexión. En cuanto a la sísmica de reflexión, se deberá realizar un diseño de adquisición con base en el medio, no aplicarlo como se acostumbra en el área petrolera; es muy diferente medir un ambiente sedimentario a uno volcánico. Lo anterior implica desde definir la frecuencia del tipo de geófonos a emplear, la frecuencia de vibración que deberá aplicarse al terreno para generar la perturbación sísmica, así como el apilamiento. Lo anterior es para reducir el ruido y mejorar la calidad de la señal. Se propone un levantamiento de 60 km (ver Figura 35).



Figura 35. Propuesta de líneas de sísmica de reflexión (Imagen tomada de Google Earth).

Tabla 7. Ubicación líneas de sísmica de reflexión.

Línea	Avenida principal	Kilómetros
1	Periférico oriente	11.5
2	Ermita Iztapalapa	14.0
3	Zaragoza	7.5
4	Eje 6 sur	12.0
5	Canal Nacional	10
6	Camino Real a Tlaltenco	5.0

Objetivos:

- Investigar a una profundidad de 2 a 3 km para verificar la presencia de los tres acuíferos definidos por CONAGUA y detectar el contacto del Paleógeno-Neógeno con el Cretácico.
- Definir con mayor precisión el espesor del material lacustre.

Gravimetría. Se plantea la ejecución de una campaña de exploración gravimétrica para identificar la posible continuidad de las estructuras volcánicas en el subsuelo de Sierra de Santa Catarina, cerros de la Estrella y Peñón de los Baños. Se propone realizar un recorrido de 21.5 km con estaciones a cada 250 m. (Figura 36). Las líneas propuestas se encuentran en la tabla 8.



Figura 36. Propuesta de líneas de gravimetría (Imagen tomada de Google Earth).

Tabla 8. Dirección y sentido de líneas propuestas de gravimetría.

Línea	trayectoria	Kilómetros
1	Cerro de la Estrella – Peñón del Marques	7.5
2	Peñón del Marques – Santa Catarina	6.0
3	Cerro de la Estrella – Santa Catarina	8.0

Objetivos:

- Investigar a una profundidad de 1,500 a 2,000 m para verificar la presencia del graben que se ha estado definiendo son base en los estudios realizados.
- Definir la posible continuidad de las estructuras geológicas que se identifican en superficie.

Para determinar condiciones superficiales, se propone:

Prospección eléctrica. Para caracterizar la zona superficial, con fines de conocer las condiciones del suelo, ver su condición de fracturamiento y deformación, así como posible contaminación, el método de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) y el método de Polarización inducida (IP) deberá aplicarse. No se propone un número de líneas porque el costo sería muy alto. Protección Civil de la Alcandía ya ha emprendido esta actividad, sin embargo, deberá replantearse el arreglo electrodico, la profundidad de investigación, así como también el apilamiento de los datos; además, se deberá considerar en la adquisición el geoposicionamiento real de cada electrodo, ajustar los datos de campo a la separación real entre electrodos, aplicar filtros e inversión para obtener una imagen lo más real a las condiciones del subsuelo. Se deberá considerar un arreglo de electrodos simétrico. La profundidad de investigación deberá ser al menos a los 30 m en cada línea, por lo que la longitud de estas deberá ser de al menos 250 m

Objetivos:

- Investigar a una profundidad de hasta 30 m la distribución de los valores de resistividad obtenidos para asociarlos a fracturamiento, fallas, estratigrafía, zonas con presencia de cavidades y contaminación.

Ruido sísmico. Es una técnica geofísica, poco usada, que no necesita una fuente artificial para generar ondas sísmicas. Para el caso de Iztapalapa, el tipo de fuente sísmica que utilizaría sería la actividad humana, colocando una serie de estaciones sísmicas para la detección de este tipo de ruido. Se propone ubicar un total de 13 estaciones sísmicas en puntos estratégicos dentro de la alcaldía, para realizar secciones sísmicas con los datos recabados de cada estación. Se propone realizar el análisis de los datos realizando un total de cuatro secciones, las cuales, agrupan los datos de las estaciones sísmicas. Las líneas propuestas están enunciadas en la tabla 9.

Tabla 9. Estaciones y líneas propuestas de ruido sísmico.

Línea	Estación
(Naranja)	1,2,3,4,5
(Rosa)	1,6,7,8,9
(Roja)	6,11,12
(negra)	3,12,13

La distribución de las estaciones se muestra en la figura 37.



Figura 37. Distribución de estaciones sísmicas y líneas de interés.

En lo relativo a la **hidrogeología**:

1. Actualizar el Censo de Aprovechamientos de agua subterránea, en cuanto a ubicación, posición al nivel del agua y gastos.
2. Realizar pruebas de bombeo en 10 pozos distribuidos dentro de la demarcación de la alcaldía.
3. Nivelar los brocales de los pozos.
4. Actualizar la disponibilidad del agua subterránea.
5. Medir la calidad del agua, identificar el o los contaminantes y ver su distribución en el subsuelo.
6. Actualizar el mapa de riesgo geológico incluyendo la parte de riesgo hidrogeológico.
7. Validar si las zonas consideradas como de recarga aún lo son o bien, con base en la geofísica definir los horizontes de roca hacia donde inyectar el agua con fines de favorecer la infiltración.
8. La modelación del flujo de agua subterránea en la Alcaldía es una herramienta muy importante para definir las condiciones actuales del acuífero de esta porción de la cuenca de México, con ello, se puede realizar modelos de flujo y conocer el potencial del acuífero, para evitar la explotación intensiva de los mismo, y con ello realizar una actualización de las condiciones en las que se encuentra, y con ello obtener predicciones sobre su manejo futuro.

La implementación de un sistema de información hidrogeológico deberá incluir, además, un sistema de información geográfica y de gestión el cual debe orientarse a:

- Resguardar la información geológica, hidrogeológica, hidrogeoquímica, hidrogeofísica y geotécnica.
- Organizar y desarrollar el conocimiento.
- Identificar las necesidades y capacidades.
- Determinar proyectos que generen valor.
- Planear las necesidades en el corto, mediano y largo plazo del recurso de los proyectos.
- Desarrollar una metodología en la planeación que optimice los recursos y de mejores resultados.
- Prevenir riesgos.
- Tomar decisiones oportunas.

En la Figura 38 se muestra la visión que se tiene en cuanto al manejo integral del agua de algunos de los elementos que lo integran.



Figura 38. Algunos de los elementos que deben considerarse para el Sistema de Información Hidrogeológico.

Capítulo 5. Conclusiones

Con base en el análisis de la información recabada en el presente trabajo, y en los objetivos planteados se puede concluir lo siguiente:

Se cumple el propósito de realizar una caracterización hidrogeológica e hidrogeofísica de las condiciones de la porción del acuífero de la CM en Iztapalapa, que sirve como punto de partida para nuevos trabajos. Se tiene un acuífero de tipo semiconfinado, conformado por distintas rocas y materiales de los periodos Cuaternario, Paleógeno-Neógeno y Cretácico, teniendo una división de tres posibles acuíferos, uno superficial y dos profundos. Se obtienen secciones geológicas a partir de los datos geofísicos recolectados, una profunda (3 km con la gravimetría) y dos a profundidad media (del orden de 500 m de profundidad con el método eléctrico), todas estas calibradas con información de cortes litológicos de pozos. Se obtienen parámetros hidrogeológicos que coinciden con los valores promedio para el tipo de roca que conforma el acuífero (material piroclástico, roca volcánica fracturada). La escasa información pone un tope para realizar un adecuado análisis de las condiciones, sin embargo, es una buena aproximación a pesar de esta situación que se maneja.

El problema del agua en Iztapalapa es debido a distintos factores que impiden el buen reparto y administración de este recurso, así como su uso. En primera instancia están los factores físicos, como lo son las condiciones geológicas en las que se encuentra esta porción del acuífero de la CM. El fenómeno de subsidencias presente, genera una compactación en el acuitardo, así como hundimientos en la alcaldía, provocando la filtración de contaminantes hacia el acuífero y daños en infraestructura urbana. Se ha comprobado que la subsidencia es debido a la explotación desmedida del acuífero, y a la nula infiltración de agua al subsuelo, provocado por la expansión desmedida de la población en el territorio de la alcaldía y a las pocas áreas verdes existente.

Todo lo anterior lleva a evaluar la calidad del agua subterránea, la cuál es otro problema, debido a que, no se cumple con los valores estipulados por la NOM-127-SSA1-2017 para agua de uso y consumo humano. Los estudios existentes, presentados en este trabajo, en cada uno de los rubros, rebasan los límites permisibles. En pocas palabras, no se cuenta con agua de calidad para satisfacer las necesidades de la población.

Al no contar con agua subterránea de calidad, se requiere ayuda de las fuentes superficiales, las cuales son nulas en la alcaldía. El recurso se trae del sistema Lerma-Cutzamala y de la infraestructura de captación. El problema radica en que, no se cuenta con la suficiente

infraestructura para el reparto de agua, y a parte está dañada. Cerca del 40% del agua para uso y consumo humano se pierde debido a las fugas existentes en el sistema de distribución.

En materia social, hay que tener presente que la alcaldía es una de las más pobladas dentro del territorio de la Ciudad de México, la primera en este caso, y la segunda a nivel nacional, contando con una población de 1,835,486 habitantes. Tomando en cuenta este dato, según la OMS, una persona requiere un aproximado de 100 l/día de agua, lo cual da un total de 183,548.600 millones de litros al día de agua, pero, el mexicano promedio consume un total de 380 l/día (CONAGUA, 2015), lo que daría un total de 697,484,680 l/día, cuota que no se cumple con los 4.63 m³, que serían 400,032,000 l/día suministrados por el sistema Lerma-Cutzamala, y con el abastecimiento de los pozos existentes (los cuales no funcionan todos) tomando en cuenta que se tiene un 40% de pérdida por fugas en el sistema de distribución, y la distribución desigual, no se cubren las necesidades de este vital recurso, cerca de la mitad de la población se estaría quedando sin agua. Agregado a ello, la alcaldía no cuenta con el mejor nivel educativo en la ciudad, lo que sugiere una menor conciencia en el cuidado del agua.

Las soluciones que se plantan en este trabajo, en primera instancia, para realizar una buena aproximación a las condiciones actuales del acuífero en los límites de esta demarcación, es la actualización de la información. Se necesita realizar una fuerte inversión por parte del organismo regulador, con apoyo de las estructuras de gobierno (local y federal), todo ello para realizar campañas de exploración y generar nuevo conocimiento, así como campañas para inculcar la cultura del cuidado del agua, no solo a la población, sino también a la industria.

Se necesita actualizar las condiciones en las que se encuentra la infraestructura de extracción, como lo son los pozos, un censo de los mismos, así como la medición del nivel estático de cada uno de ellos, con el fin de realizar un balance de aguas subterráneas y generar modelos recientes que representen las condiciones actuales del acuífero. dentro de los límites de la demarcación. Se plantea realizar exploración indirecta por medio de la geofísica con los métodos antes expuestos, esto para identificar estructuras en el subsuelo de la alcaldía, con el fin de detectar zonas con mayor riesgo geológico (el método de ruido sísmico es superficial, y ayudará a caracterizar en este sentido con buena resolución, acompañado del método TRE e IP, este último para detección de contaminantes), así como generar nuevos escenarios geológicos que permitan el planteamiento de nuevos modelos hidrogeológicos (la gravimetría y la sísmica de reflexión se adaptan a las condiciones actuales de la alcaldía, aunque sus costos son elevados, se propone debido a su alta resolución y pocas de fuentes de ruido, que, si existieran, complicarían la

adquisición y el procesamiento de los datos obtenidos), e identificar zonas con un alto riesgo de contaminación, así como zonas de infiltración de agua hacia el acuífero. No se propone algún método de prospección geofísica diferente a los expuestos, debido a que, la complejidad del procesamiento de los datos obtenidos sería alta, y la certeza de la veracidad de los datos sería dudosa, como es el caso de los métodos electromagnéticos que, en diferentes condiciones, son los preferidos para la caracterización hidrogeológica y búsqueda de agua subterránea, por su bajo costo y fácil aplicación.

Generar nuevos estudios centrados en la hidrogeoquímica del agua en cada uno de los pozos existentes, así como un monitoreo continuo de la calidad de la misma, para así tomar decisiones sobre su rehabilitación o cierre definitivo con base a lo estipulado en la ley. Una vez teniendo esto en cuenta, se necesita la inversión en infraestructura dedicada al tratamiento de agua.

La capacitación y actualización del conocimiento del personal del SACMEX y CONAGUA, para llevar a cabo esta tarea, es de suma importancia, ya que serán los encargados de validar toda la información generada y de la toma de decisiones que con esta se genere, son inversiones que estos organismos deben tener contemplados.

La revisión y reparación de la infraestructura es de vital importancia, si se quiere cubrir la meta de las necesidades de agua de la población, esto ayudaría a reducir la pérdida de agua debido al deterioro y mal estado de las herramientas utilizadas para su distribución.

No solo se debe depender de las fuentes subterráneas, por ello, es necesario generar nuevos programas destinados a la captación de agua pluvial, y darles mayor difusión a los existentes. Esto debe ir de la mano con información sobre la cultura del cuidado del agua, e incentivar a la población a integrarse en la solución de la problemática del agua que aqueja a Iztapalapa.

Todo lo anterior es un proceso paulatino, requiere de una buena inversión económica, de tiempos suficientes para el procesamiento de toda la información generada, así como de personal altamente calificado para realizar esta tarea. Todo esto no sería necesario si se invirtiera en lo *“realmente importante”* como lo es el cuidado y administración del agua. Hay que tener en cuenta que *“sin agua, no hay vida”*.

Bibliografía y referencias

- Álvarez (1961). Provincias fisiográficas de la República Mexicana. Recuperado el día 30 de Octubre de 2020 de: <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca03/2402/1961-24-2%20Alvarez%20Jr..pdf>
- Araujo, S. (2010). Aplicación del principio de Fermat a la tomografía sísmica. Parte I: fundamentos físicos. La granja 12(2), Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. p13-18.
- Arce, J.L., Layer, P., Martínez, I., Salinas, J.I., Macías-Romo, Ma. del C., Morales-Casique, E., Benowitz, J., Escolero, E., Lenhardt, N. (2015). Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 67, Núm 2. p 123-143.
- Arce, J.L., Layer, P.W., Morales-Casique, E., J., Benowitz, J.A., Rangel, E., Escolero, O., 2013a, New constraints on the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and whole-rock chemistry: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 266, 34-49.
- Castro-Soto, C.D. (2015). Caracterización Geoeléctrica del sitio de disposición final prados de la montaña. Ciudad de México. Tesis de licenciatura. México, CDMX. 53p.
- CENAPRED. (2019). ¿Vulnerabilidad o Susceptibilidad a la inestabilidad de laderas? Recuperado el día 11 de junio de 2021 de: <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/vulnerabilidad-o-susceptibilidad-a-la-inestabilidad-de-laderas>
- CENAPRED. (2020) Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas. Recuperado el día 11 de junio de 2021 de: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/inestabilidad-laderas.html>
- CFE. (1988). Estudio geofísico del Valle de México. Subdirección de construcción, Unidad de estudios de Ing. Civil, Subjefatura de estudios Geológicos, México, D.F. 61p.
- Chaussard, E., Havazli, E., Fattahi, H., Cabral-Cano, E., & Solano-Rojas, D. (2021). Over a century of sinking in Mexico City: No hope for significant elevation and storage capacity recovery. *Journal of Geophysical Research: SolidEarth*, 126, e2020JB020648. 18 p.

- CIGSA. (2000). Integración de los estudios de resistividad eléctrica por SEV, tendidos de Refracción Sísmica, Cross-Hole y Gravimetría levantados en la Cuenca de México. 125 p.
- CONAGUA (2015). Agua y desarrollo sostenible. Recuperado el día 25 de agosto de 2023 de: https://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/carrera_agua_2015.pdf
- CONAGUA. (2020). Actualización de la Disponibilidad anual de agua en el Acuífero Zona Metropolitana de la CD. de México (0901), Ciudad de México. 34p.
- CONAGUA. (S/F). Estaciones climatológicas en Iztapalapa, recuperado el día 23 de noviembre de 2020 de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- DataMÉXICOBETA. (2021). Iztapalapa, Municipio de Ciudad de México. Recuperado el día 11 de junio de 2021 de: https://datamexico.org/es/profile/geo/iztapalapa_23/08/2021
- de Cserna, Z., de la Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M., Triay, L., Mitre-Salazar, L.M., Mota-Palomino, R., 1988, Estructura geológica, gravimétrica, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 104, 71 p., 4 mapas
- Demant (1978). Características del eje neovolcanico Transmiexicano y sus problemas de interpretación. UNAM, instituto de geología, revista vol 2, núm 2, p. 172-189.
- Domínguez-Maríani, E., Vargas-Cabrera, C., Martínez-Mijangos, F., Gómez-Reyes, E., Monroy-Hermosillo, O. (2015). Determinación de los procesos hidrogeoquímicos participantes en la composición del agua de las fuentes de abastecimiento a pobladores de la delegación Iztapalapa, D.F., México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 67, núm. 2, p. 299-313.
- Enciclopedia de Municipios y delegaciones de México. (S/F). Iztapalapa. Recuperado el día 21 de mayo de 2021 de: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM09DF/delegaciones/09007a.html>
- Federico Mooser, 2014a, Pozo San Lorenzo Tezonco. IC Ingeniería Civil, órgano oficial del Colegio de Ingenieros Civiles de México, Núm. 537, enero de 2014a, p.15-19.
- Federico Mooser, 2014b, Geología del valle de México y otras regiones del país, Primer edición, Colegio de Ingenieros Civiles en México, 144 pp.

- FisicaLab. (S/F). Principio de Huygens. Recuperado el día 7 de febrero de 2022 de: <https://www.fiscalab.com/apartado/principio-huygens>
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. (2008). Decreto que contiene el programa delegacional de desarrollo urbano para la delegación Iztapalapa. Recuperado el día 21 de mayo de 2021 de: http://www.data.seduvi.cdmx.gob.mx/portal/docs/programas/PDDU_Gacetas/2015/PPDU-IZTAPALAPA.pdf
- García-Palomo, A., Zamorano, J.J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., Macías, J.L., 2008, El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25 (1), 158–178.
- Gravimetría del Valle de México 1951, Proporcionada por el Ing. Francisco Alejandro Arroyo Carrasco.
- GEYNE, R. V., C. FRIES, Jr., K. SEGERSTROM, F. R. BLACK y F. I. WILSON, 1963. *Geología y Yacimientos Minerales del Distrito de Pachuca-Real del Monte, Estado de Hidalgo, Mex., CRNR, México, D. F.*
- Grobde, N., Mordret, A., Barde-Cabusson, S., Ellison, L., Lach, M., Seo, Y.-H., et al. (2021). A multihydrogeophysical study of a watershed at Kaiwi Coast (O‘ahu, Hawai‘i), using seismic ambient noise surface wave tomography and self-potential data. *WaterResourcesResearch*, 57, e2020WR029057. 21p.
- Humboldt, A.v., 1849, *Cosmos*: Londres, Henry G. Bohn Ltd., v. 1, 390 p.
- Lezama-Campos, J.L., Morales-Casique, E., Castrejón-Pineda, R., Arce, J.L., Escolero, O.A. (2016). Interpretación del registro geofísico del pozo profundo San Lorenzo Tezonco, y su correlación litológica en la Cuenca de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, volumen 33, núm 2, p 198-208.
- Lorenzo Meriggi, José Luis Macías, Simone Tommasini, Lucia Capra, Sandro Conticelli, Heterogeneous magmas of the Quaternary Sierra Chichinautzin volcanic field (central Mexico): the role of an amphibole-bearing mantle and magmatic evolution processes, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 25, núm. 2, 2008, p. 197-216
- Lugo-Hubp, J., Mooser, F., Pérez-Vega, A., Zamorano-Orozco, J., 1994, Geomorfología de la Sierra de Santa Catarina, D.F., México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11, 43–52.

- Macías, J.L., Arce, J.L., García-Tenorio, F., Layer, P.W., Rueda, H., Reyes-Agustín, G., López-Pizaña, F., Avellán, D., 2012, Geology and geochronology of Tlaloc, Telapón, Iztaccíhuatl and Popocatepetl volcanoes, Sierra Nevada, central Mexico, *en* Aranda-Gómez, J.J., Tolson, G., Molina-Garza, R.S., (eds.), *The southern Cordillera and Beyond: Geological Society of America, Field Guide 25*, p 163–193.
- Molina-Berbeyer, R., (S/F) Hundimiento de la Ciudad de México y su relación con los estudios de mecánica de suelos, geoquímicos, geofísicos y geológicos de las aguas del subsuelo de la Cuenca del Valle de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Recuperado el día 21 de mayo de 2021 de: <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/index.php/component/content/article/342-sitio/articulos/tercera-epoca/2002/1626-2002-1-molina>
- Morales-Casique, E., Escolero, O.A., Arce, J.L. (2015). Estimación de parámetros mediante inversión y análisis de las pérdidas hidráulicas lineales y no-lineales durante el desarrollo y aforo del pozo San Lorenzo Tezonco. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 67, Núm 2. p 203-214.
- Mosser, F. (2019) Corte litológico Pozo Mirado 2.
- MXCITY, (2019), Estas son las 4 áreas verdes que pronto serán renovadas para los ciudadanos. Recuperado el día 5 de marzo de 2021 de: <https://mxcity.mx/2019/02/las-cuatro-areas-verdes-que-pronto-seran-renovadas-para-los-ciudadanos/>
- ONU (2002). Observación General 15. Aplicación del Pacto Internacional de los Derechos Económicos, Sociales y Culturales, El derecho al agua (artículos 11 y 12 del Pacto). Doc. HRI/GEN/1/REv.7. Recuperado el día 6 de diciembre de 2020 de http://tbinternet.ohchr.org/_layouts/treatybodyexternal/Download.aspx?symbolno=HRI%2FGEN%2F1%2FRev.7&Lang=es
- Orellana, E., 1982. Prospección Geoeléctrica en corriente continua, 2ª edición. Thomson Paraninfo, S.A.
- Padilla y Sanchez (1989). Geology and tectonics of the basin of Mexico and their relationship with the damage caused by the earthquakes of September 1985. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 1989, 7, 17-28.

- PAOT. (1997). Programa Delegacional de Desarrollo Urbano de Iztapalapa. Recuperado el día 21 de mayo de 2021 de: <http://www.paot.org.mx/centro/programas/delegacion/iztapal.html#reservat>
- Pérez-Cruz, G.A., (1988). Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México: México D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Maestría, 83 pp.
- Primera Alcaldía Iztapalapa. (2019). Anuncia alcaldía de Iztapalapa y SEDEMA recuperación integral del cerro de la estrella. Recuperado el día 21 de mayo de 2021 de: <http://www.iztapalapa.cdmx.gob.mx/boletines/?bol=1118>
- Protección Civil (2014) Atlas de peligros y riesgos de la Ciudad de México. Actualización de los Mapas de Riesgo. Iztapalapa. Tomado el día 15 de octubre de 2020 de : http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/storage/app/media/docpub/atlasriesgo/MR_Iztapalapa.pdf
- SACMEX. (2011). Niveles estáticos de pozos en la alcaldía de Iztapalapa.
- SACMEX. Aforos de los pozos Agrícola Oriental No. 5 y 6, Iztapalapa No. 6 y Tláhuac-Neza No.24.
- SCHLAEPFER, J. C., 1968. Resumen de la Geología de la Hoja México, Distrito Federal y Estados de México y Morelos. Hoja México 14 Q-h (5), Ese. 1: 100 000. Inst. Geol., UNAM, México, D. F.
- SHERIDAN, F. M., 1979. Emplacement of Pyroclastic Flow: A Review. Geol. Soc. Amer .. Special Paper 180, 125-136.
- Schlumberger Oilfield Glossary. (S/F). Ley de Snell. Recuperado el día 7 de febrero de 2022 de: https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/s/snells_law#:~:text=La%20descripci%C3%B3n%20matem%C3%A1tica%20de%20una,interfase%20de%20los%20dos%20medios.
- Secretaria de Protección civil. (2014). Mapa de riesgos de la Delegación Iztapalapa. Recuperado el día 22 de octubre de 2020 de http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/storage/app/media/docpub/atlasriesgo/MR_Iztapalapa.pdf
- SEDEMA. (2013). Reporte de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. 41 p.

- SEDEMA. (2016). Registro de Descargas de Aguas Residuales Ciudad de México. 41p.
- Vazquez Sánchez, E., & Jaimes Palomera, R. A. (1989). Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2), 133–190.
<https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1989.28.2.1026>
- Velasco-Tapia y Verma, Estado actual de la investigación geoquímica en el campo monogenético de la Sierra de Chichinautzin: análisis de información y perspectivas, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 18, núm. 1, 2001, p. 1-36

ANEXOS

ANEXO A. Generación del modelo geológico del subsuelo a partir de la gravimetría

- Creamos un proyecto nuevo

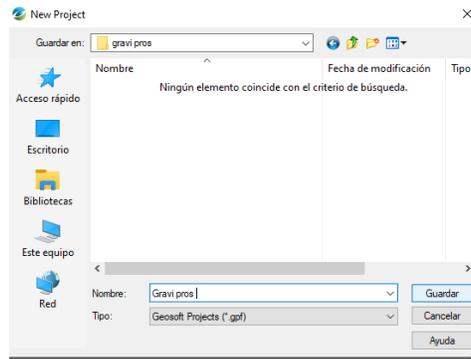


Figura A 1. Generación de proyecto en Oasis Montaj.

- Importamos los datos a utilizar en un archivo de texto

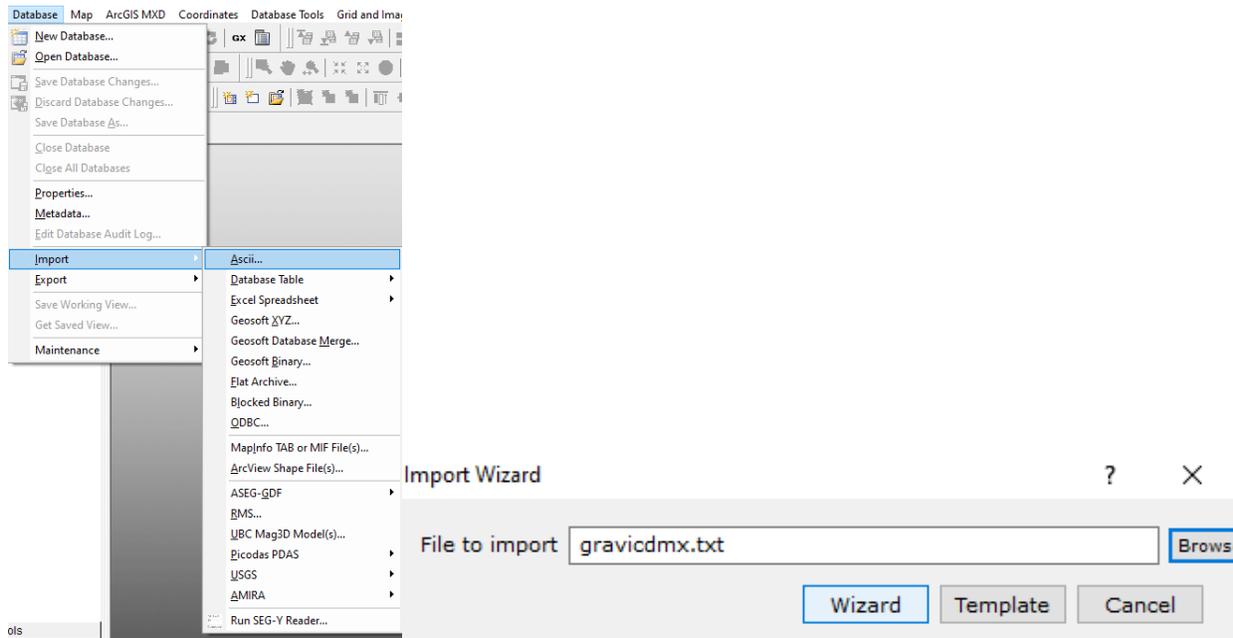


Figura A 2. Importar datos de gravimetría en Oasis Montaj.

ID	Coordenada X	Coordenada Y	Elevación	Mononalia de Bouguer
0.0	A75326	2154904	2253	12.0
1.0	A75841	2154816	2254	12.0
2.0	A76099	2154711	2253	12.0
3.0	A76316	2154574	2252	12.0
4.0	A76433	2154469	2252	12.0
5.0	A76575	2154338	2252	12.0
6.0	A76641	2154007	2251	12.0
7.0	A76641	2153788	2253	12.0
8.0	A76591	2153543	2255	12.0
9.0	A76591	2153248	2259	12.0
10.0	A76566	2153135	2264	12.0
11.0	A76567	2152947	2264	12.0
12.0	A76617	2152789	2268	12.0
13.0	A76704	2152663	2274	12.0
14.0	A76838	2152546	2274	12.0
15.0	A76972	2152522	2268	12.0
16.0	A77164	2152523	2265	12.0
17.0	A77427	2152551	2259	12.0
18.0	A77619	2152675	2254	12.0
19.0	A77867	2152891	2252	12.0
20.0	A78038	2153137	2257	12.0
21.0	A78248	2153254	2264	12.0
22.0	A78463	2153207	2264	12.0
23.0	A78608	2153074	2258	12.0
24.0	A78747	2152873	2255	12.0
25.0	A78783	2152593	2256	12.0
26.0	A78632	2152301	2259	12.0

Figura A 3. Datos importados.

- Creación mapa topográfico

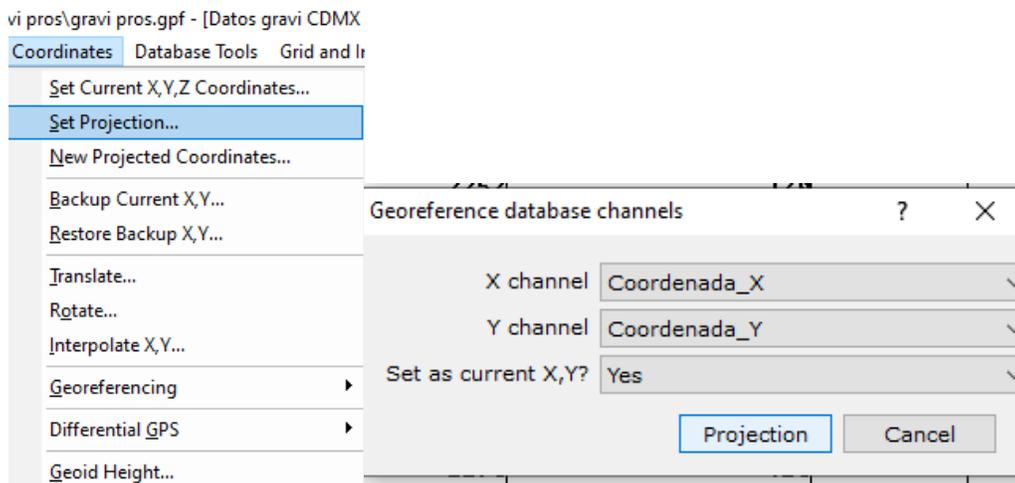


Figura A 4. Selección de datos para mapa topográfico.

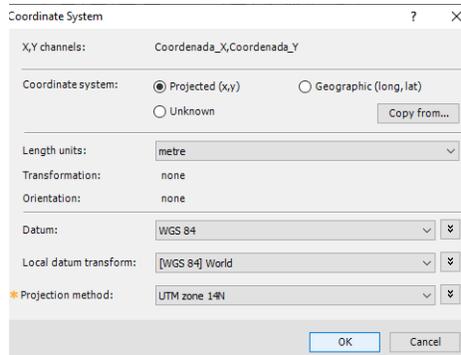


Figura A 5. Georreferenciación de los datos de topografía.

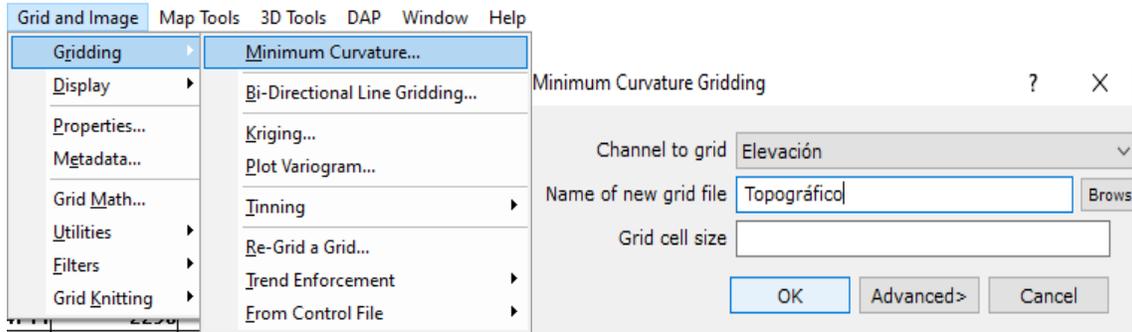


Figura A 6. Selección del método de interpolación.

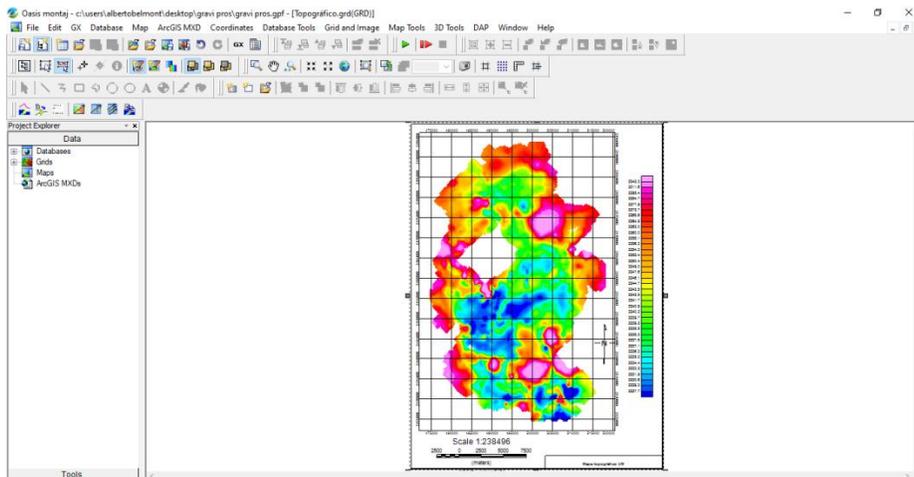


Figura A 7. Mapa topográfico.

- Obtención del mapa de anomalía de Bouguer.

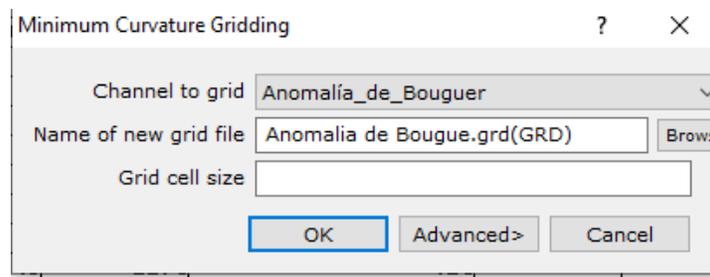


Figura A 8. Selección de datos para generar el mapa de la Anomalía de Bouguer.

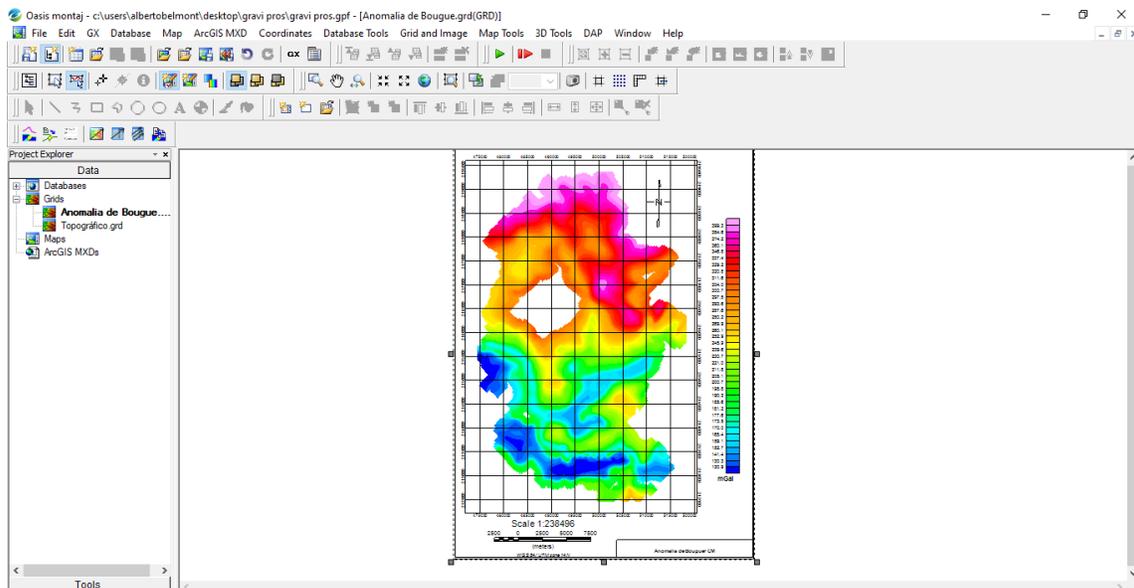


Figura A 9. Mapa de la Anomalia de Bouguer.

Separación regional residual

- Activación módulo MAGMAP

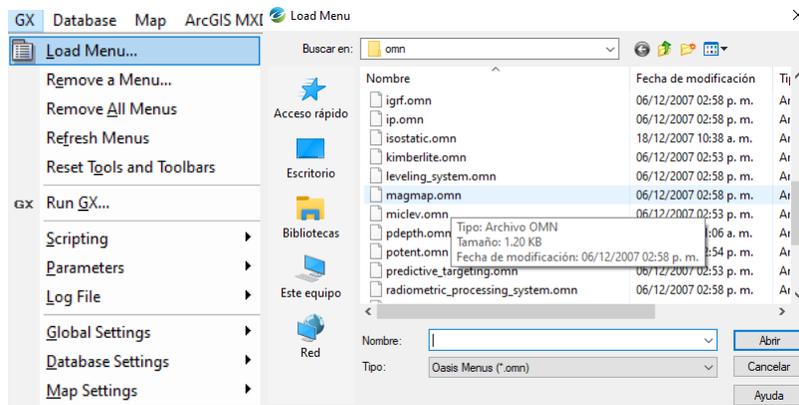


Figura A 10. Módulo MAGMAP para obtener la transformada de Fourier de los datos de la Anomalia de Bouguer.

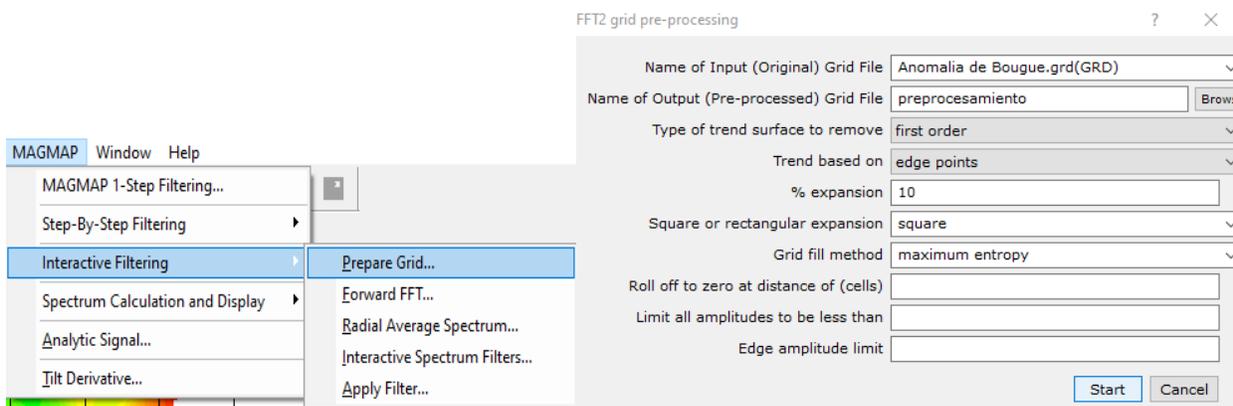


Figura A 11. Selección de los datos para pre procesamiento.

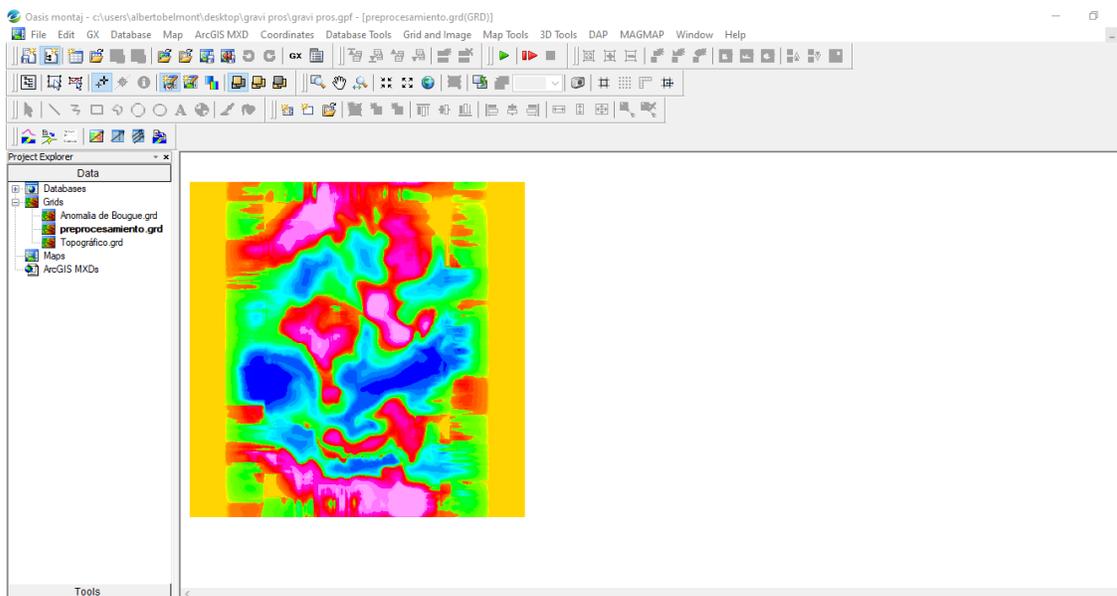


Figura A 12.Resultados del pre procesamiento.

- Aplicación de la transformada de Fourier para obtener espectro de potencias

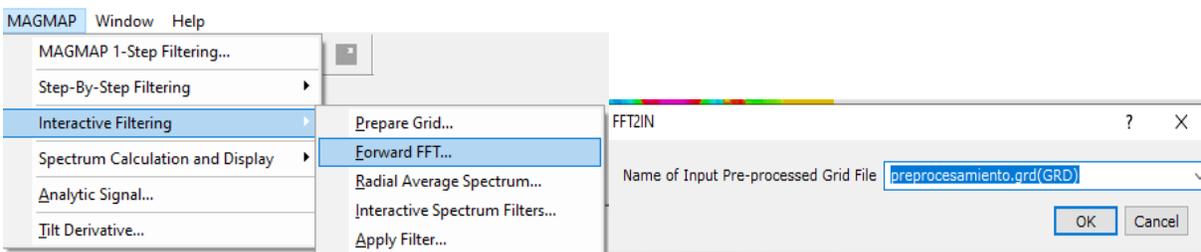


Figura A 13. Selección del módulo para obtener la transformada rápida de Fourier y selección de los datos a los que se les aplicará.

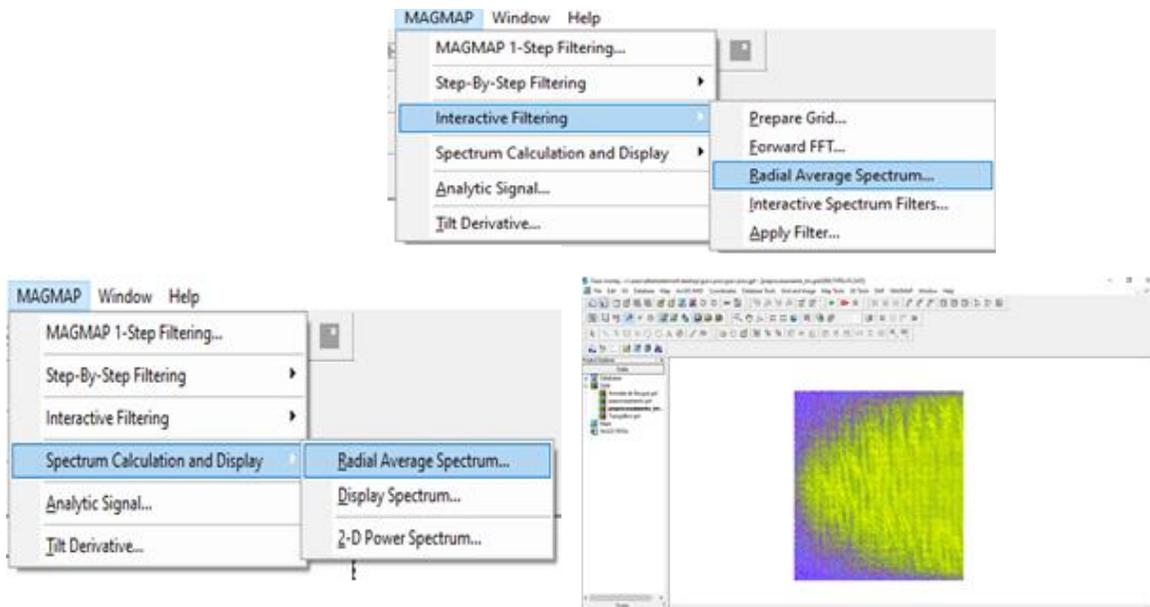


Figura A 14. Aplicación de filtros para obtención de espectro radial, cálculo y espectro obtenido.

- Con los pasos anteriores se obtiene el espectro de potencias

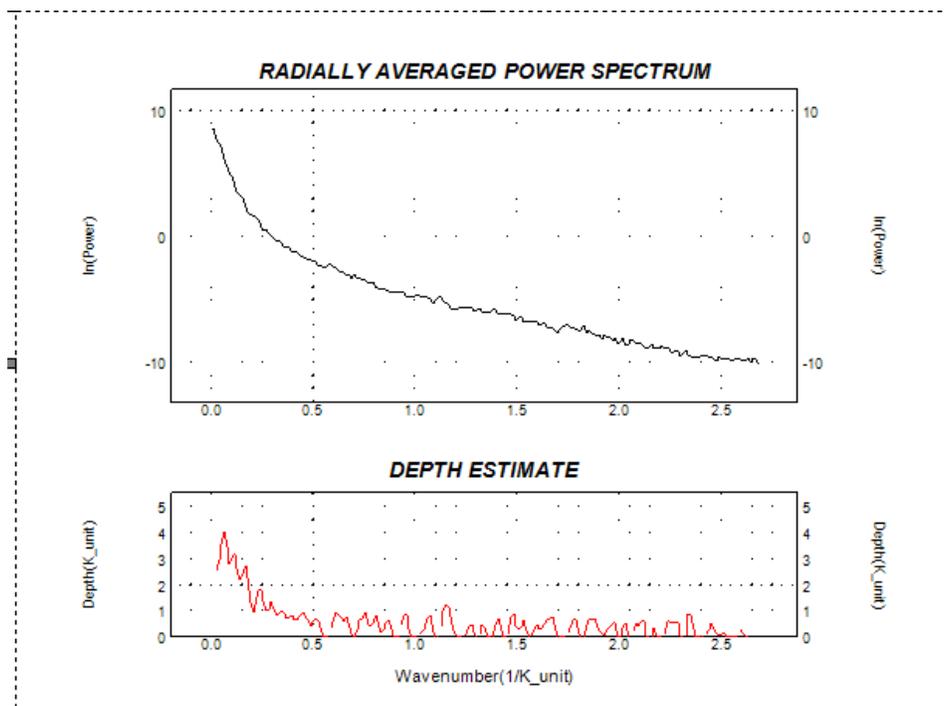


Figura A 15. Espectro de potencias y profundidad estimada.

- Aplicamos filtros al espectro de potencias para obtener quitar efectos regionales

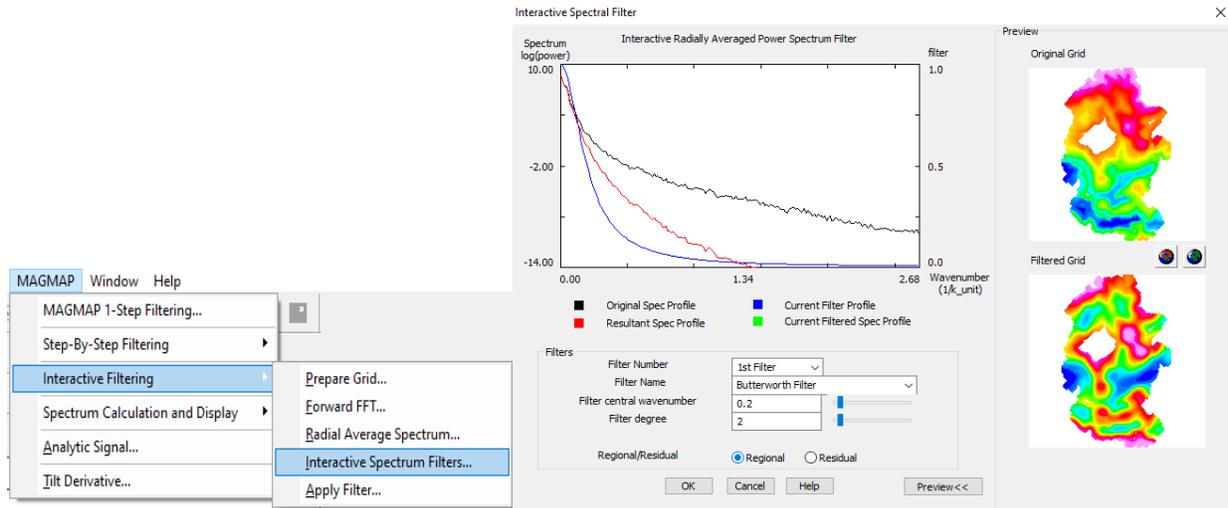


Figura A 16. Aplicación del filtro tipo butterworth para separación regional-residual.

- Obtención de la anomalía regional

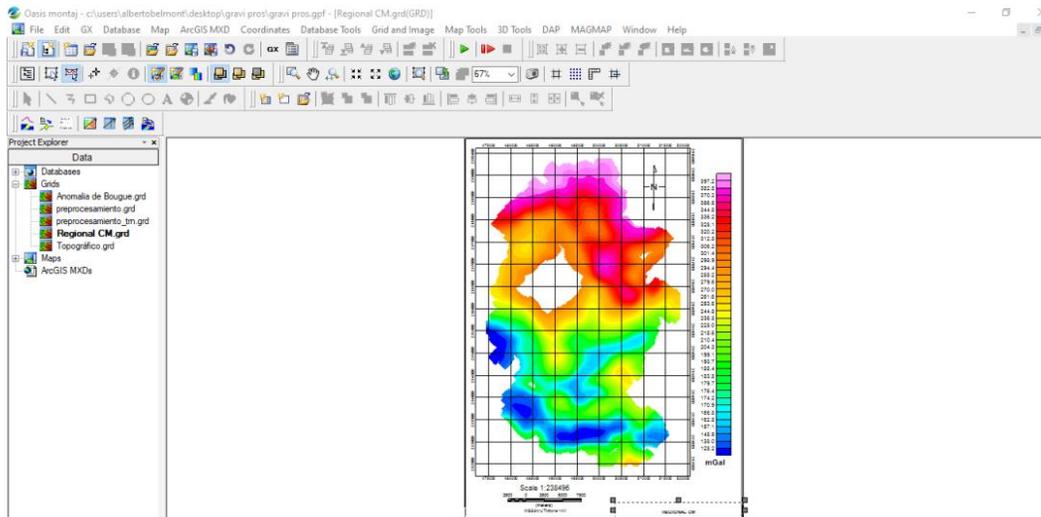


Figura A 17. Anomalía regional.

- Obtención de la anomalía residual

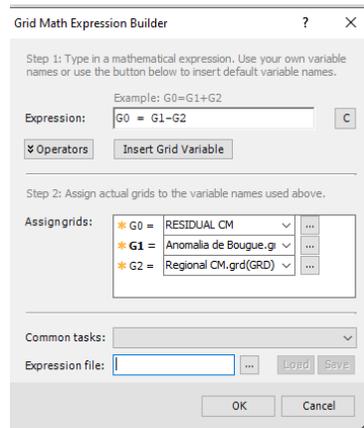


Figura A 18. Obtención de la anomalía residual, realizando la resta entre la anomalía de bouguer y la anomalía regional.

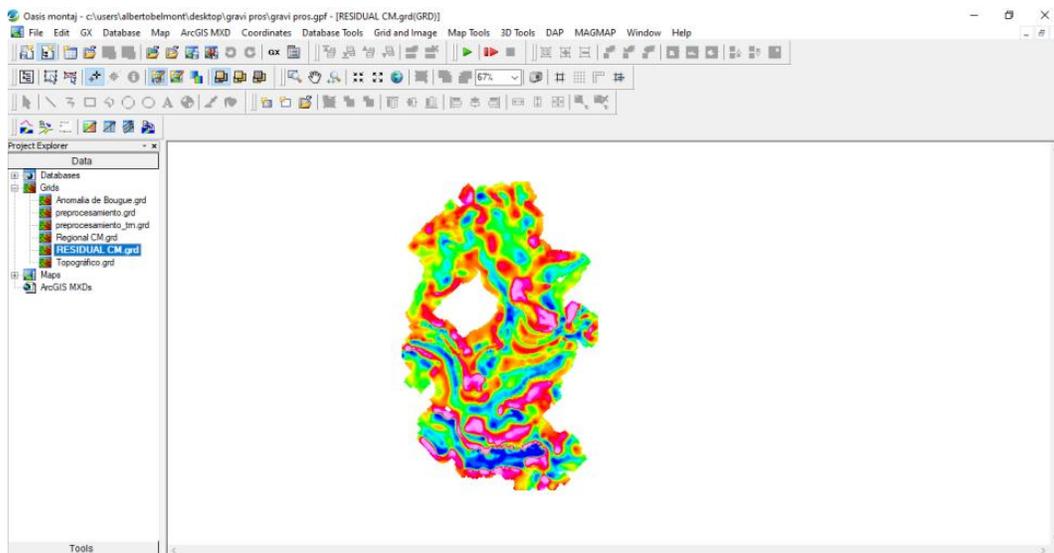


Figura A 19. Anomalía residual.

Obtención del modelo geológico

- Activación del módulo GM-SYS

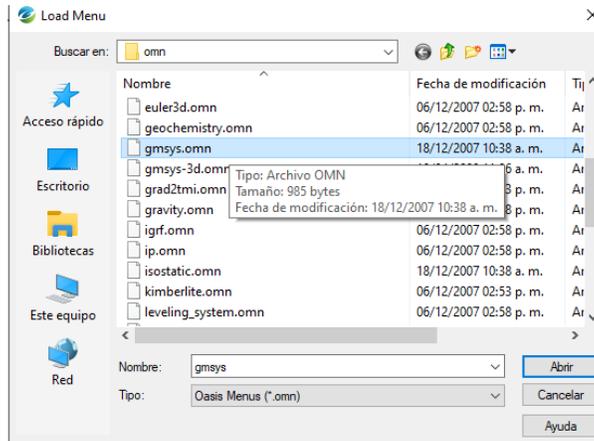


Figura A 20. Módulo GM-SYS para obtención del modelo geológico a partir de la gravimetría.

- Trazado del perfil gravimétrico

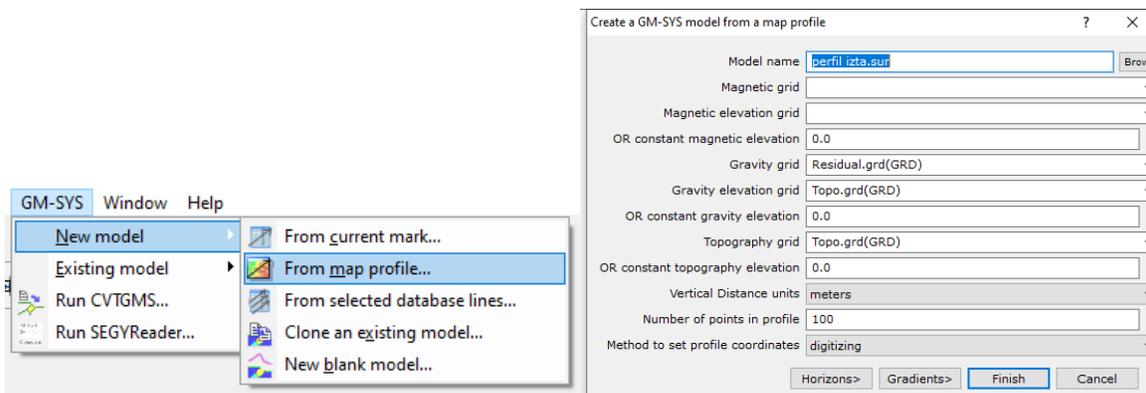


Figura A 21. Trazo del perfil gravimétrico utilizado para la generación del modelo geológico.

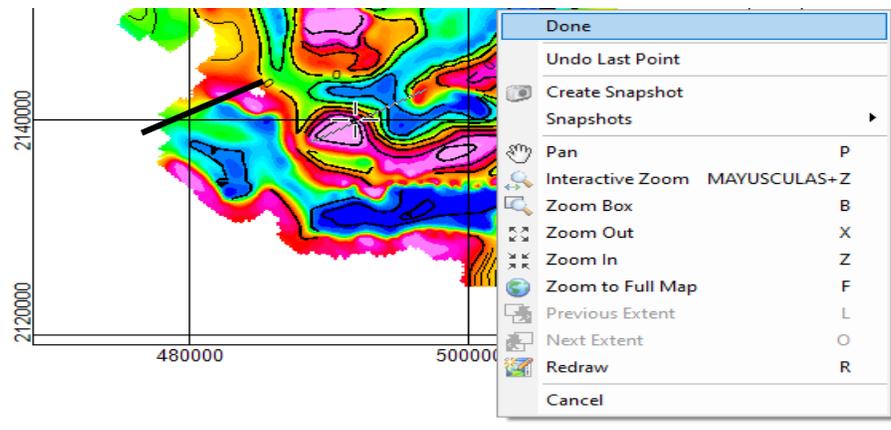


Figura A 22. Perfil Trazado.

Perfil gravimétrico y topografía para ajustar, la curva punteada son los datos de campo, la curva negra es la curva de ajuste y la curva roja es la curva de error.

Posterior a ello, se determinan valores de densidad para las diferentes capas del modelo.

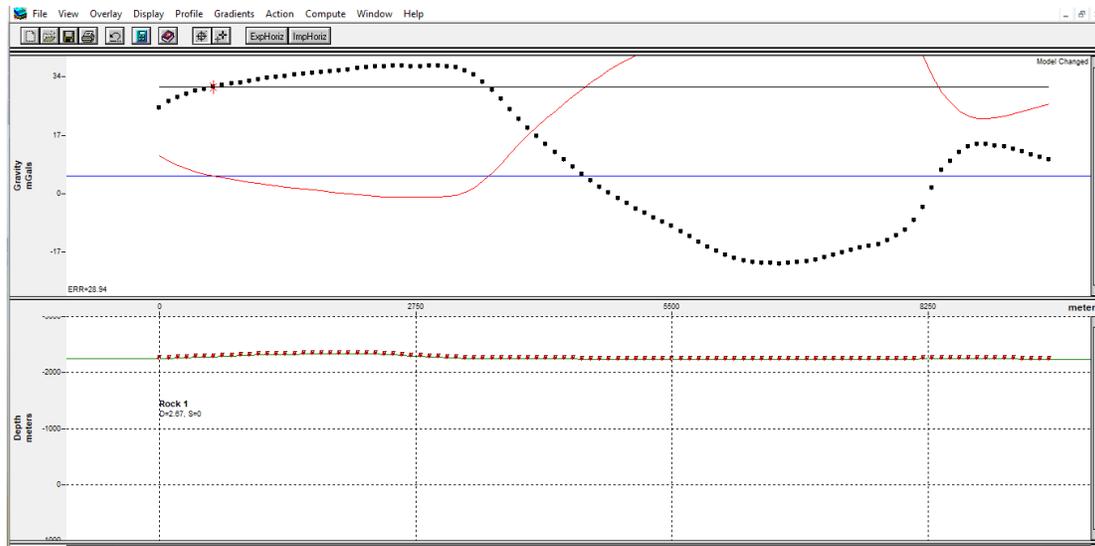


Figura A 23. Curvas de ajuste.

Modelo terminado tras ajuste de la curva de ajuste a los datos obtenidos, y los valores de densidad asignados a cada capa.

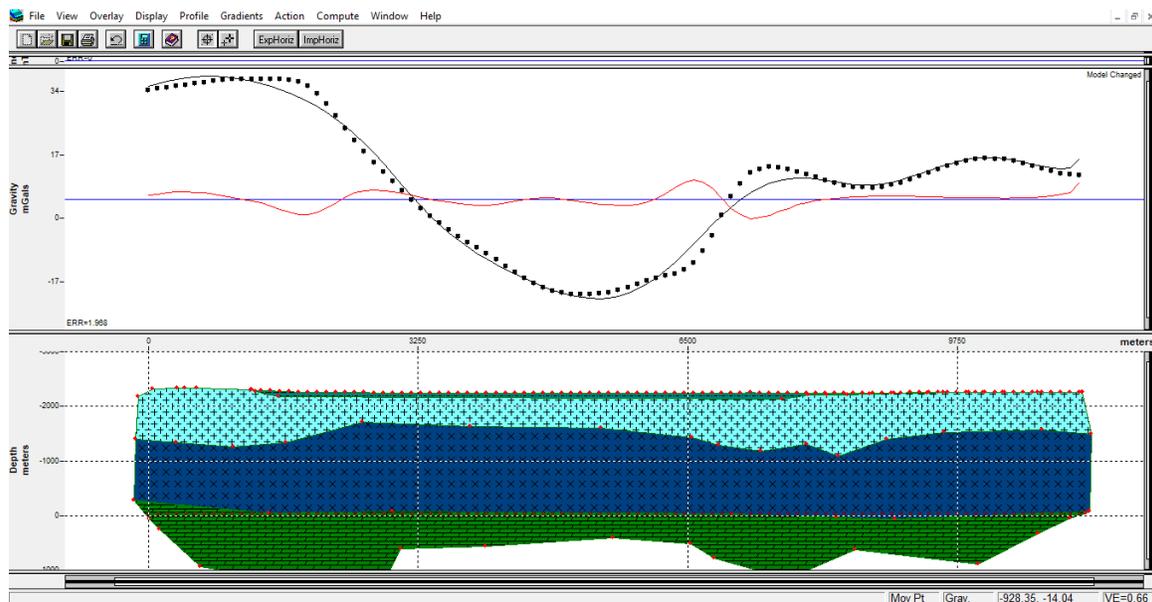


Figura A 24. Modelo geológico generado.

ANEXO B. Principios físicos de cada método geofísico expuesto

B-1. Método gravimétrico

El método gravimétrico consiste en mediciones de la aceleración de la gravedad en un sitio determinado, con el fin de identificar si existen variaciones u anomalías de densidad en las unidades geológicas presentes en dicho sitio. Es un método de campo natural y relativamente de bajo costo, que normalmente se aplica a fases preliminares en ciertos proyectos.

El método basa su funcionamiento en la ley de gravitación universal, estableciendo una relación en la interacción de distintos cuerpos. Entonces, la fuerza que existe sobre la masa de la tierra puede definirse como (F) y la aceleración gravitacional g sobre la masa es (g):

$$F = G \frac{mM}{R^2} (1.1) \quad g = \frac{F}{m} = G \frac{M}{R^2} (1.2)$$

Debemos tener en cuenta la forma de la tierra, el geoide, representa una superficie equipotencial que coincide con el nivel medio del mar, la fuerza de gravedad en cualquier punto es perpendicular a esta superficie, por lo que hay que considerar los valores de potencial gravitacional del elipsoide(f).

$$f = \frac{R_e - R_p}{R_e} (1.3)$$

R_e : Radio ecuatorial R_p : Radio polar

Se calcula la aceleración de la gravedad para un modelo elipsoidal de la tierra, con la siguiente ecuación:

$$g_\omega = A(1 + B \text{sen}^2 \omega - C \text{sen}^2 2\omega) (1.4)$$

Y sustituyendo los valores de aceleración, radio en el polo y ecuador, más otras constantes y achatamiento, se obtiene la formula internacional de la gravedad.

$$g_w = 9.7803267714 \frac{1 + 0.00193185138639 \text{sen}^2 \omega}{\sqrt{1 - 0.00669437999013 \text{sen}^2 \omega}} \frac{m}{s^2} (1.5)$$

Sabiendo lo anterior, el método de aplicación de la gravimetría consiste en una masa suspendida en un resorte, el cual se deforma proporcionalmente a la fuera de la gravedad que actúa en la masa

Con ello y usando la constante (k) del resorte, la elongación (d) y la masa (m) se obtiene la aceleración de la gravedad

$$g = \frac{kd}{m} (1.6)$$

También se deben realizar las correcciones correspondientes, el efecto por deriva (transporte y clima), efecto de mareas (atracción gravitatoria del sol y la luna), corrección de aire libre (mediciones a diferentes alturas), corrección de Bouguer (diferencia de elevaciones entre el nivel observado y nivel del mar), corrección topográfica (por el relieve), etc.

Además, la gravimetría tiene problemas debido a las incógnitas como la densidad del material y la profundidad a la que se encuentra, por lo que, para determinar estos parámetros, se hace uso de técnicas como la inversión de los datos a partir del espectro de potencia o la energía relativa al número de onda.

B-2. Método de reflexión sísmica

El método de reflexión sísmica es una de las técnicas más empleadas en la industria petrolera. Esta técnica geofísica permite obtener información del subsuelo a través del control de los tiempos de llegada de ondas elásticas, estas, generadas por medio de una fuente artificial y detectadas por un sismómetro. Con ello, se obtienen imágenes del subsuelo con las que se puede hacer una relación geológica, todo esto tras el estudio de las diferentes formas de onda y sus tiempos de trayecto.

Para obtener los tiempos de arribo de las ondas elásticas, se dispone de una serie de sensores colocados en línea recta, a una distancia conocida, comúnmente llamado tendido sísmico.

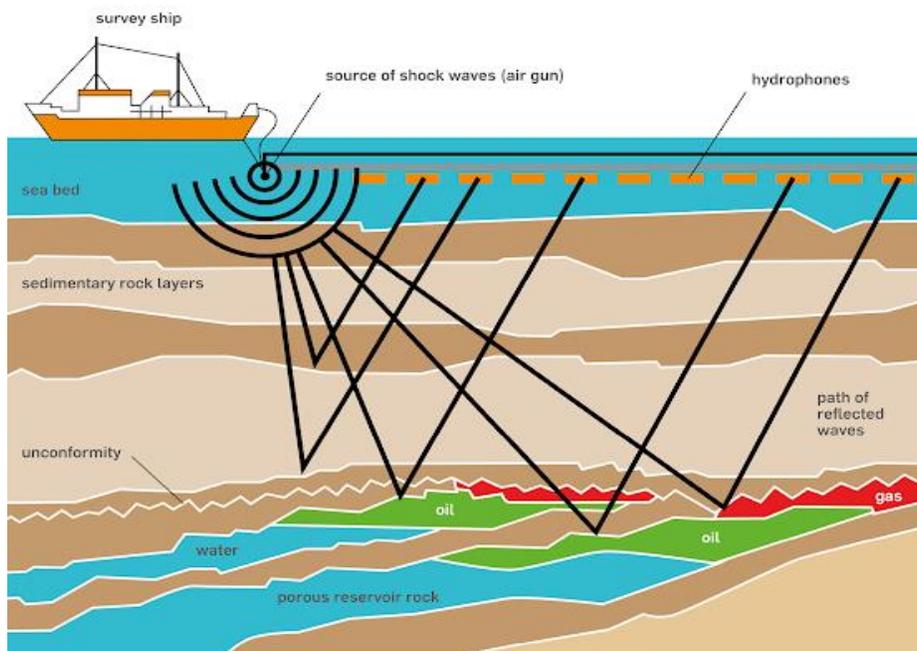


Figura B 1. Modelo de reflexión sísmica. Tomada de geostudyblog.blogspot.com.

Las leyes que de las que se vale este método son principalmente la ley de Snell, y los principios de Fermat y Huygens.

Principio de Huygens

El principio de Huygens nos permite explicar fenómenos ondulatorios relacionados con la propagación de la onda, tales como la reflexión, la refracción y la difracción. Establece, a groso modo, que cada punto que forma parte de un frente de onda, puede considerarse un generador de ondas secundarias que se propagan en la misma dirección de perturbación, conteniendo la velocidad de propagación y frecuencia de la onda primaria.

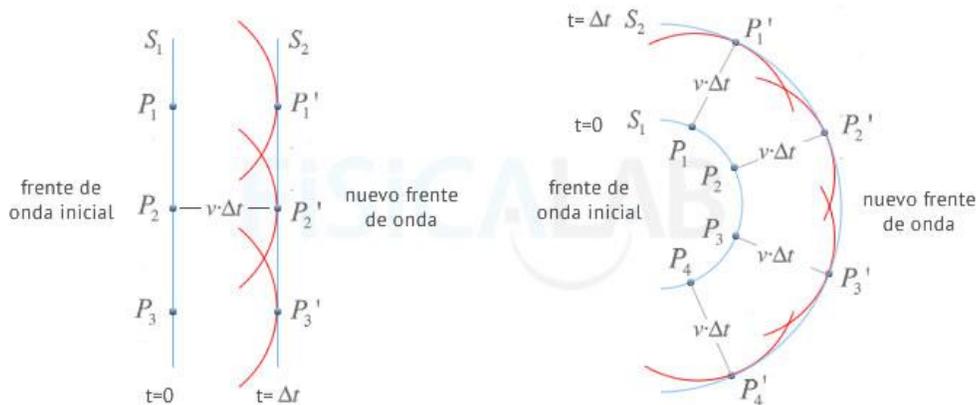


Figura B 2. Principio de Huygens en la propagación de ondas planas (izquierda) y en ondas esféricas (derecha). tomada de fisicalab.com.

Principio de Fermat

Este principio establece que de todas las trayectorias posibles entre un punto A (fuente) y un punto B (receptor), el rayo sísmico sigue la trayectoria de menor tiempo entre dichos puntos. Esto quiere decir que el tiempo de viaje de un rayo sísmico, tiende ser el mínimo. Si consideramos un diferencial de la distancia a lo largo de la trayectoria del rayo, y la velocidad de la onda en dicho medio como una constante, se puede representar, matemáticamente de la siguiente forma:

$$t = \int_A^B \frac{ds}{c} = \text{mínimo} \quad (2.1)$$

Por otro lado, si consideramos que τ^* representa la trayectoria de menor tiempo, o tiempo mínimo, el principio de Fermat puede representarse como:

$$\tau^* = \min \tau^P \quad (2.2)$$

P representa el conjunto de todas las trayectorias posibles que conectan a los dos puntos y puede representarse en términos de la trayectoria particular de tiempo mínimo P^* como:

$$\tau^* = \int_{p^*} p(x) ds \quad (2.3)$$

La función $p(x) = \frac{1}{c}$. Nos dice que todas las trayectorias del rayo dependerán de la distribución de las velocidades existentes en el medio, esto para cualquier medio heterogéneo.

Ley de Snell

La ley de Snell puede derivarse del principio de Fermat y establece una relación entre los ángulos de incidencia, reflexión y refracción de una onda, con la velocidad del medio en el cual se propagan.

La ley de Snell puede expresarse, matemáticamente, de la siguiente forma:

$$n_1 \text{sen}(i) = n_2 \text{sen}(r) \quad (3.1)$$

Dónde:

- n_1 = índice de refracción del primer medio
- n_2 = índice de refracción del segundo medio
- $\text{sen}(i)$ = seno del ángulo de incidencia
- $\text{sen}(r)$ = seno del ángulo de refracción

En otras palabras, explica el fenómeno de refracción, o el cambio físico en la dirección de un frente de onda, a medida que se propaga de un medio a otro, con un cambio de velocidad y la reflexión y la conversión parcial de una onda P en una onda S en la interfase de los dos medios. Esta ley está orientada principalmente hacia la propagación de la luz, pero también es aplicable a ondas sísmicas.

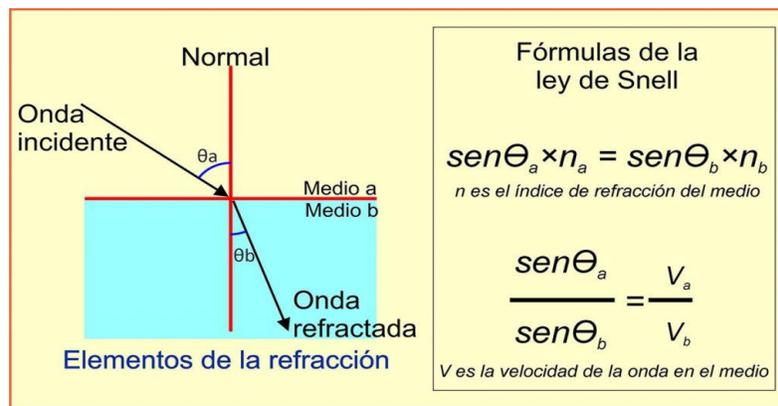


Figura B 3. Ley de Snell. Tomada de <https://leerciencia.net>.

B-3. Método de sondeo eléctrico vertical (SEV)

Se conoce como sondeo eléctrico vertical (SEV) a una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción de corriente. En las configuraciones de adquisición, dos electrodos son usados para inyectar corriente eléctrica y dos para medir la diferencia de potencial medida, la correlación entre corriente inyectada, diferencia de potencial y un factor geométrico relativo a la posición de los cuatro electrodos determina el valor de la resistividad aparente del sitio. Este valor de resistividad aparente corresponde a una cierta profundidad, función de la separación entre electrodos. Los datos de resistividad aparente obtenidos en cada SEV se representan por medio de una curva bi-logarítmica, en función de la distancia creciente entre electrodos. La finalidad del SEV es averiguar la distribución vertical de resistividades bajo el punto deseado. Para el presente trabajo, no se muestran curvas de resistividad, debido el trabajo citado no están presentes.

La resistividad de un medio depende de distintos factores, como lo son el tipo de roca, contenido de agua en la misma, humedad en el medio, así como la temperatura y presencia de gases o hidrocarburos, entre otros más. En la siguiente imagen, se presentan algunos valores de resistividad considerados para distintos materiales

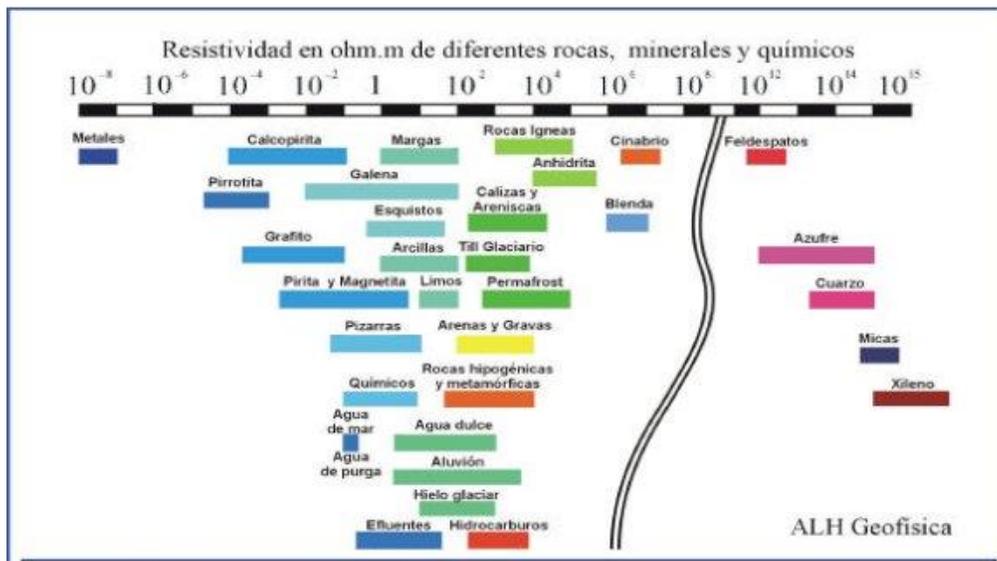


Figura B 4. Gráfico de resistividad de diferentes rocas, minerales y químicos. Tomada de estrucplan.com.

Para obtener el valor de la resistividad aparente desde el valor del voltaje, se utiliza la ecuación:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (4.1)$$

Dónde:

k: Factor geométrico

ΔV : Voltaje

I: Corriente

a: Abertura de los electrodos

El factor geométrico depende del arreglo electródico utilizado, y al calcular dicho factor, se obtiene el punto que contendrá el valor de resistividad aparente, también conocido como punto de atribución. Para realizar su cálculo, se utiliza la siguiente ecuación:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (4.2)$$

Arreglos electródicos.

Para llevar a cabo la adquisición de resistividad aparente, existen diferentes tipos de arreglos electródicos, que como se mencionó anteriormente, constan de 4 electrodos, dos destinados a la inyección de corriente eléctrica al medio que llamaremos A y B, y dos más para medir la diferencia de potencial en el medio que llamaremos M y N, cada uno de separados a una distancia conocida. Los dispositivos más usados son aquellos que se disponen en una línea recta, algunos de los más utilizados son arreglo Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo.

Arreglo Wenner.

El arreglo Wenner consta un arreglo lineal entre los electrodos de potencial y los electrodos de corriente, separados a una distancia equidistante "a", en un orden *AMNB*. Este arreglo es sensible a cambios verticales en la resistividad del medio.

Para el cálculo de la resistividad en este dispositivo, se considera el factor geométrico característico del mismo, el cual es de la forma $K = 2\pi a$ (4.3), entonces, sustituyendo el factor geométrico en la ec. 4.1 tenemos que el cálculo de la resistividad es

$$\rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (4.4)$$

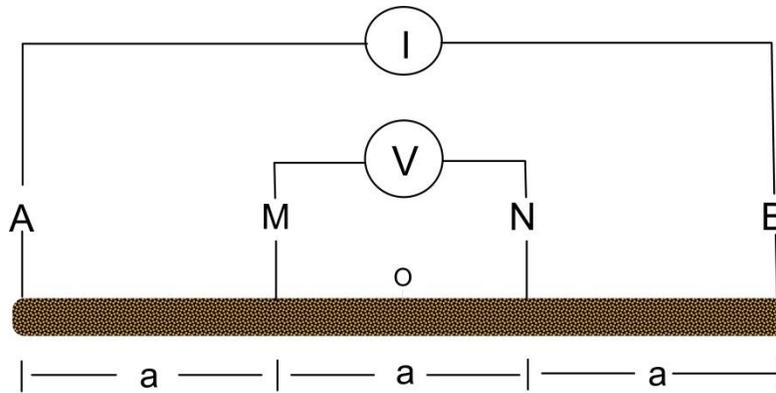


Figura B 5. Arreglo Wenner.. Modificado de Orellana (1982).

Arreglo Schlumberger.

Este arreglo contempla una disposición eléctrica similar al arreglo Wenner, pero para este caso, la distancia entre los electrodos de potencial es mucho menor que la de los de corriente. Se dice que la distancia $AB > 5MN$. Este arreglo es sensible a la detección de estructuras tanto horizontal como verticalmente.

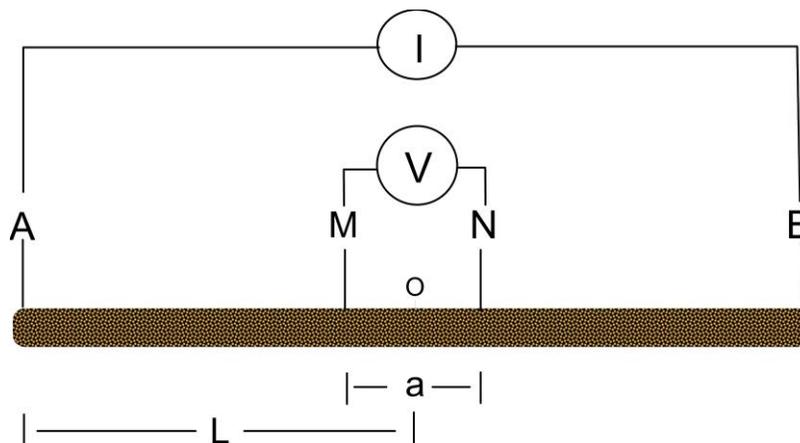


Figura B 6. Arreglo Schlumberger. Modificado de Orellana (1982).

La distancia L comprende desde el electrodo A hasta el punto O. Si se considera que OA es igual a la distancia OB, entonces el cálculo de la resistividad con este arreglo se puede realizar con la siguiente ecuación:

$$\rho = \pi \left(L^2 - \frac{a^2}{4} \right) \frac{\Delta V}{Ia} \quad (4.5)$$

Arreglo Dipolo-Dipolo

Este arreglo es uno de los más utilizados para identificar presencia de cavidades, o estructuras verticales en el subsuelo, ya que presenta una buena resolución para cambios laterales en la resistividad del medio.

El arreglo consiste en un par de electrodos A y B, separados entre sí, a una distancia “a”, para poder medir la diferencia de potencial en los electrodos M y N, igualmente separados a una distancia “a”.

Entre estos dipolos existe una distancia de separación “na”. Cabe resaltar que el factor “a” siempre se mantiene fijo, y el factor “n” se va aumentando, esto con el fin de que la profundidad de investigación sea mayor.

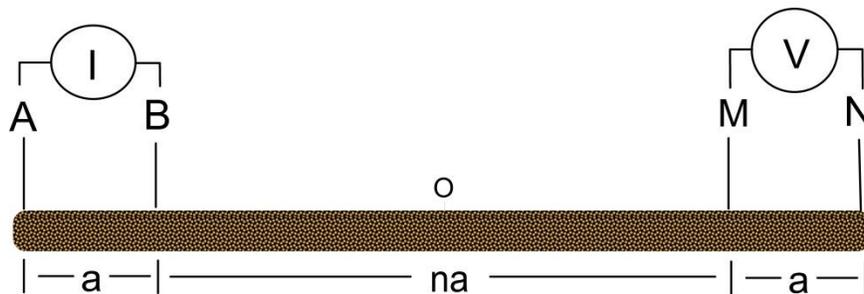


Figura B 7. Arreglo Dipolo-Dipolo. Modificado de Orellana (1982).

Dicho arreglo se mueve a lo largo del perfil sin modificar su geometría y, una vez medida la intensidad de corriente administrada y el potencial que se generó. Se utiliza el factor geométrico $K = \pi a n(n + 1)(n + 2)$ (4.6) y se calcula la resistividad aparente, por medio de la siguiente fórmula:

$$\rho = \pi a n(n + 1)(n + 2) \frac{\Delta V}{I} \quad (4.7)$$

ANEXO C. Hidrogeología

C-1. Conceptos básicos.

Un acuífero está definido como una formación geológica constituida por una o más capas de roca, cuya propiedad es almacenar y ceder agua. A la parte donde se encuentra o se almacena el agua dentro del acuífero se le denomina zona saturada. Para que un acuífero se forme, requiere de ciertas propiedades en el medio, como lo son la permeabilidad que es la capacidad de un material que permite a los fluidos atravesar a dicho material, sin alterar su estructura, la porosidad que es la cantidad de poros existentes dentro de cierto volumen, la conductividad y transmisividad hidráulica, que son parámetros característicos del flujo del agua subterránea. Todos estos le dan características hidráulicas al acuífero.

Existen diferentes tipos de acuíferos, esto depende de las características de las capas de roca que lo conforman. Los acuíferos se pueden clasificar en:

- Acuífero libre: que están sometidos únicamente a la presión atmosférica, en los cuales, existe una superficie real o libre de agua almacenada. Este tipo de acuífero es delimitado por dos tipos de zonas, la zona no saturada que es aquella que se encuentra entre el terreno y hasta donde se encuentra el nivel de agua o nivel freático; y la zona saturada donde se encuentra almacenada el agua dentro de la formación
- Acuífero confinado: Aquel donde el agua está sometida a presiones mayores que la atmosférica, y en este, el agua ocupa la totalidad de los poros existentes en la formación. Estos están conformados por dos capas de material impermeable que funge como un sello, y la capa de material permeable donde se almacena el agua. La extracción de agua en ellos viene de la descompresión de esta y de la compresión de la matriz en la que se concentra. Si existe una compresión de este tipo de acuíferos, que no sea reversible, puede causar subsidencia del terreno.
- Acuífero semiconfinante: en este tipo de acuíferos son similares a los confinados solo que, la capa superior del mismo es una de tipo semipermeable llamada acuitardo, la cual, permite filtraciones hacia el acuífero y permite su recarga.



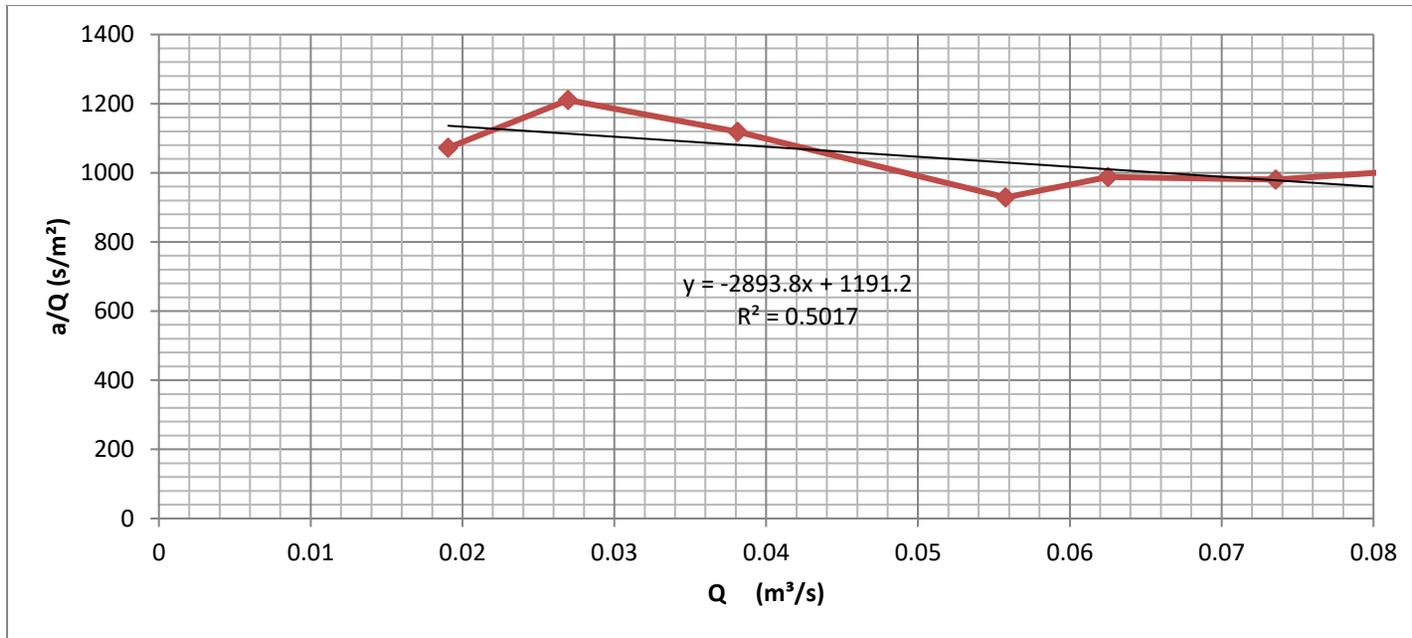
Figura C 1. Modelo de un acuífero. Tomada de http://aquabook.agua.gob.ar/407_0

C-2 Tablas y graficas de pruebas de aforo en los pozos utilizados para el cálculo de la transmisividad y conductividad hidráulica

AGRÍCOLA ORIENTAL No. 6

Pozo Agricola Oriental No. 6					
R.P.M.	PIEZOMETRO	GASTO	N.ESTÁTICO	N.DINÁMICO	ABATIMIENTO
1200	9	19.06	62.4	82.85	20.45
1300	18	26.96	62.4	95.03	32.63
1400	36	38.13	62.4	105.07	42.67
1500	77	55.77	62.4	114.2	51.8
1600	97	62.59	62.4	124.16	61.76
1700	134	73.57	62.4	134.52	72.12
1800	165	81.64	62.4	144.38	81.98

Q (L.P.S.)	Q (m³/s)	N.D. (m)	Abatimiento (a) (m)	a/Q (s/m²)	BQ (m)	CQ² (m)	a t calc (m)	a Tobs (m)	Q/a Tobs (lps/m)	Q/a F (lps/m)	T (m²/s)	T (m²/d)
19.06	0.01906	82.85	20.45	1072.927597	22.704272	-1.05127008	21.6530019	20.45	0.9320293 4	0.83948959	8.39E-04	72.5319006
26.96	0.02696	95.03	32.63	1210.311573	32.114752	-2.10333422	30.0114178	32.63	0.8262335 3	0.83948959	8.39E-04	72.5319006
38.13	0.03813	105.07	42.67	1119.066352	45.420456	-4.20728685	41.2131692	42.67	0.8936020 6	0.83948959	8.39E-04	72.5319006
55.77	0.05577	114.2	51.8	928.814775	66.433224	-9.00056559	57.4326584	51.8	1.0766409 3	0.83948959	8.39E-04	72.5319006
62.53	0.06253	124.16	61.76	987.6859108	74.485736	-11.3147606	63.1709754	61.76	1.0124676 2	0.83948959	8.39E-04	72.5319006
73.57	0.07357	134.52	72.12	980.2908794	87.636584	-15.6628224	71.9737616	72.12	1.0201053 8	0.83948959	8.39E-04	72.5319006
81.64	0.08164	144.38	81.98	1004.164625	97.249568	-19.2874363	77.9621317	81.98	0.9958526 5	0.83948959	8.39E-04	72.5319006

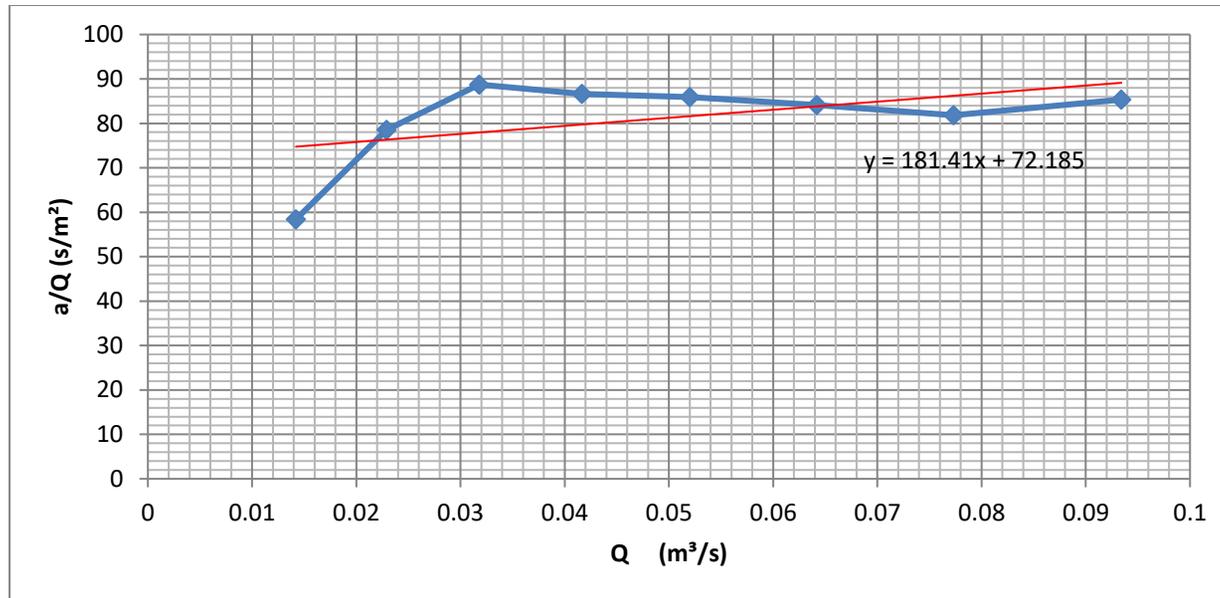


Pozo Agrícola Oriental No. 6		
N.ESTÁTICO	62.4	m
prof. Pozo =	350	m
E.saturoado=	287.6	m
K=	2.92E-06	m/s

AGRÍCOLA ORIENTAL No. 5

Pozo Agricola Oriental No.5					
R.P.M.	PIEZOMETRO	GASTO	N.ESTÁTICO	N.DINÁMICO	ABATIMIENTO
1100	5	14.21	70.33	71.16	0.83
1200	13	22.91	70.33	72.13	1.8
1300	25	31.78	70.33	73.15	2.82
1400	42	41.67	70.33	73.94	3.61
1500	67	52.02	70.33	74.8	4.47
1600	102	64.19	70.33	75.73	5.4
1700	145	77.32	70.33	76.66	6.33
1800	216	93.41	70.33	78.3	7.97

Q (L.P.S.)	Q (m ³ /s)	N.D. (m)	Abatimiento (a) (m)	a/Q (s/m ²)	BQ (m)	CQ ² (m)	a t calc (m)	a Tobs (m)	Q/a Tobs (lps/m)	Q/a F (lps/m)	T (m ² /s)	T (m ² /d)
14.21	0.01421	71.16	0.83	58.4095707	1.02574885	0.03663105	1.0623799	0.83	13.37562955	13.8532936	1.39E-02	1.20E+03
22.91	0.02291	72.13	1.8	78.5683108	1.65375835	0.09521632	1.74897467	1.8	13.09910336	13.8532936	1.39E-02	1.20E+03
31.78	0.03178	73.15	2.82	88.7350535	2.2940393	0.18321837	2.47725767	2.82	12.82870184	13.8532936	1.39E-02	1.20E+03
41.67	0.04167	73.94	3.61	86.6330694	3.00794895	0.31499831	3.32294726	3.61	12.54007263	13.8532936	1.39E-02	1.20E+03
52.02	0.05202	74.8	4.47	85.928489	3.7550637	0.49091005	4.24597375	4.47	12.25160661	13.8532936	1.39E-02	1.20E+03
64.19	0.06419	75.73	5.4	84.1252532	4.63355515	0.7474738	5.38102895	5.4	11.9289453	13.8532936	1.39E-02	1.20E+03
77.32	0.07732	76.66	6.33	81.8675634	5.5813442	1.08453835	6.66588255	6.33	11.59936429	13.8532936	1.39E-02	1.20E+03
93.41	0.09341	78.3	7.97	85.3227706	6.74280085	1.58287991	8.32568076	7.97	11.21950297	13.8532936	1.39E-02	1.20E+03

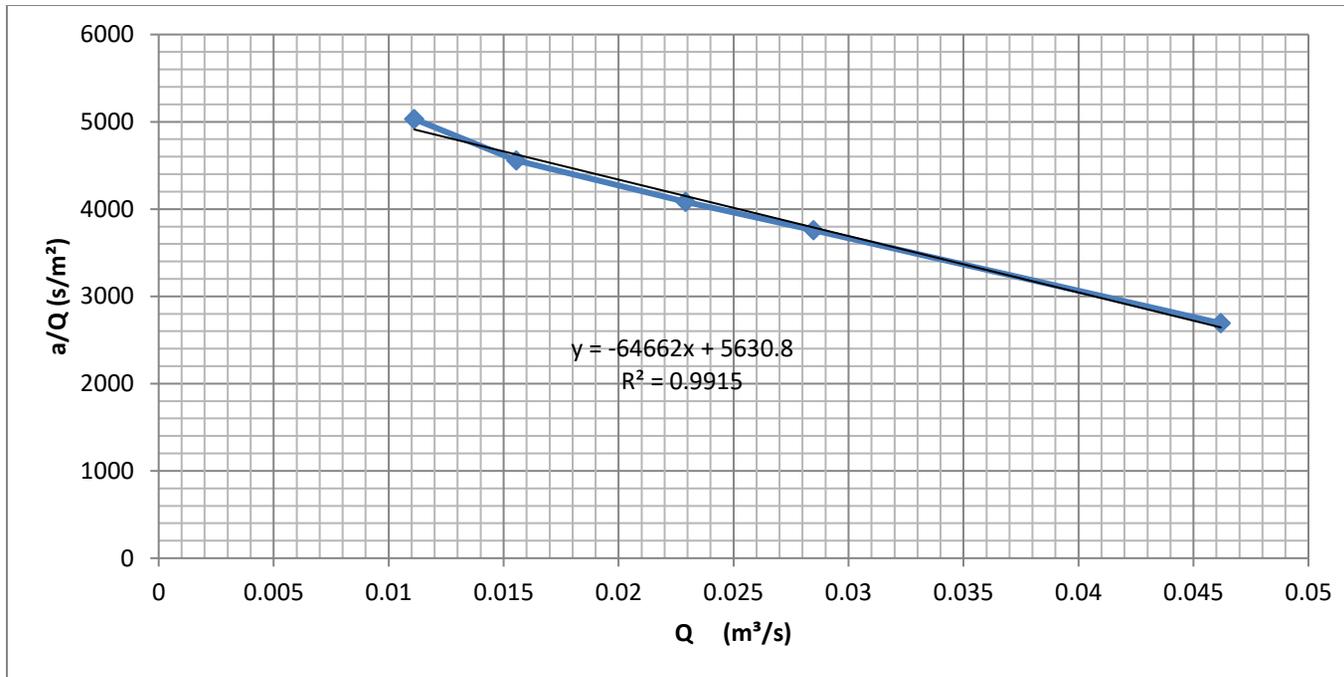


Pozo Agricola Oriental No.5		
N.ESTÁTICO	70.33	m
Prof. Pozo =	350	m
E. Saturado=	279.67	m
k=	4.95E-05	m/s

IZTAPALPA No. 6

Pozo Iztapalapa No.6				
RPM	GASTO	N D	ABATIMIENTO	N.ESTÁTICO
1100	11.11	81.1	55.91	25.19
1200	15.56	96.1	70.91	25.19
1300	22.91	118.7	93.51	25.19
1400	28.48	132.19	107	25.19
1500	46.19	149.5	124.31	25.19

Q (L.P.S.)	Q (m³/s)	N.D. (m)	a (m)	a/Q (s/m²)	BQ (m)	CQ² (m)	a t calc (m)	a Tobs (m)	Q/a Tobs (lps/m)	Q/a F (lps/m)	T (m²/s)	T (m²/d)
11.11	0.01111	81.1	55.91	5032.40324	62.558188	-7.98136645	54.5768215	55.91	0.19871222	0.17759466	1.78E-04	15.3441784
15.56	0.01556	96.1	70.91	4557.19794	87.615248	-15.6555496	71.9596984	70.91	0.21943308	0.17759466	1.78E-04	15.3441784
22.91	0.02291	118.7	93.51	4081.62375	129.001628	-33.9390211	95.0626069	93.51	0.24500053	0.17759466	1.78E-04	15.3441784
28.48	0.02848	132.19	107	3757.02247	160.365184	-52.4480207	107.917163	107	0.26616822	0.17759466	1.78E-04	15.3441784
46.19	0.04619	149.5	124.31	2691.27517	260.086652	-137.957418	122.129234	124.31	0.37157107	0.17759466	1.78E-04	15.3441784

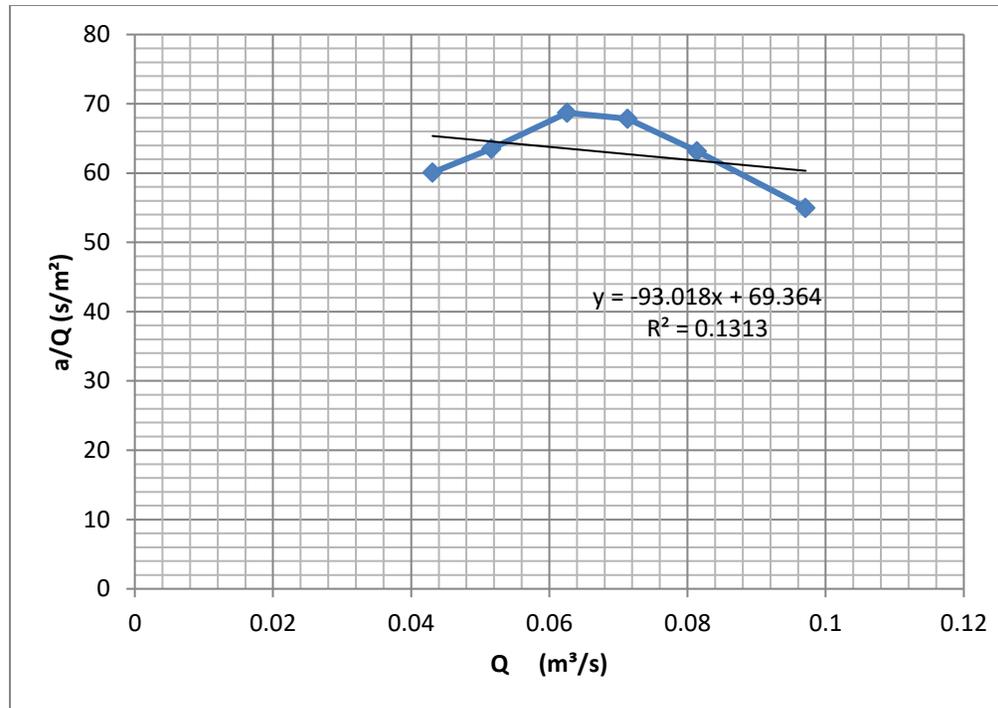


Pozo Iztapalapa No.6		
N. ESTÁTICO	25.19	m
Prof. Pozo =	350	m
E. Saturado=	324.81	m
K=	5.47E-07	m/s

TLÁHUAC NEZA No. 24

Pozo Tláhuac-Neza 24			
RPM	GASTO	N DINÁMICO	ABATIMIENTO
1300	43.1	76.25	76.25
1400	51.63	76.94	76.94
1500	62.59	77.96	77.96
1600	71.34	78.5	78.5
1700	81.39	78.8	78.8
1800	97.1	79	79

Q (L.P.S.)	Q (m³/s)	N.D. (m)	a (m)	a/Q (s/m²)	BQ (m)	CQ² (m)	a t calc (m)	a Tobs (m)	Q/a Tobs (lps/m)	Q/a F (lps/m)	T (m²/s)	T (m²/d)
43.1	0.0431	76.25	2.59	60.0928074	2.9895884	-0.17279117	2.81679723	2.59	16.64092664	14.41670031	1.44E-02	1.25E+03
51.63	0.05163	76.94	3.28	63.528956	3.58126332	0.24795407	3.33330925	3.28	15.74085366	14.41670031	1.44E-02	1.25E+03
62.59	0.06259	77.96	4.3	68.7010705	4.34149276	0.36439877	3.97709399	4.3	14.55581395	14.41670031	1.44E-02	1.25E+03
71.34	0.07134	78.5	4.84	67.8441267	4.94842776	-0.4734054	4.47502236	4.84	14.73966942	14.41670031	1.44E-02	1.25E+03
81.39	0.08139	78.8	5.14	63.1527215	5.64553596	0.61618212	5.02935384	5.14	15.83463035	14.41670031	1.44E-02	1.25E+03
97.1	0.0971	79	5.34	54.9948507	6.7352444	0.87701184	5.85823256	5.34	18.1835206	14.41670031	1.44E-02	1.25E+03



Pozo Tláhuac-Neza 24		
N. ESTÁTICO	73.66	m
Prof. Pozo =	350	m
E. Saturado=	276.34	m
K=	5.22E-05	m/s