

Universidad de El Salvador
Facultad de Ciencias Naturales y Matemática
Escuela de Física.



Universidad de El Salvador

Hacia la libertad por la cultura

Trabajo de graduación:

**MODELO LITOLÓGICO Y COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE LOS NIVELES
ESTÁTICOS EN POZOS DE MONITOREO EN EL SECTOR DE NEJAPA-
APOPA, DPTO. DE SAN SALVADOR, EL SALVADOR**

Presentado por:

Andrea Yamileth Melgar Vides

Para optar al grado de:

Licenciada en Geofísica

Asesor:

M.Sc. Dagoberto Arévalo Herrera

San Salvador, Ciudad Universitaria, abril de 2019.

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR:

MAESTRO ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

VICERRECTOR ACADÉMICO:

DR. MANUEL DE JESÚS JOYA ÁBREGO

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO:

ING. NELSON BERNABÉ GRANADOS

SECRETARIO GENERAL:

LIC. CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FISCAL GENERAL:

LIC. RAFAEL HUMBERTO PEÑA MARÍN

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

DECANO:

LIC. MAURICIO HERNÁN LOVO

VICEDECANO:

LIC. CARLOS ANTONIO QUINTANILLA APARICIO

DIRECTOR DE LA ESCUELA DE FÍSICA:

M.SC. CÉSAR ARMANDO ALVARADO BATRES

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL DE 2019

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Carmelina Vides y Andrés Melgar, que con mucho esfuerzo me han animado y brindado su apoyo a lo largo de la carrera, por sus palabras de ánimo y completa disposición a ayudar, a mi abuela Candelaria Vides que siempre me ha brindado su apoyo incondicional, a mi hermana Mirella que siempre ha estado pendiente y animándome en cada paso de mi carrera. Y a todos mis familiares que de una u otra forma han estado apoyándome siempre.

A mi asesor: M.Sc. Dagoberto Arévalo, por el tiempo que se ha tomado para asesorar y darme dirección en los momentos difíciles de esta investigación, por creer en mí y animarme a seguir aprendiendo.

A la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) por brindar gran parte de la información utilizada en esta investigación y agradecer a sus técnicos siempre con la mejor disposición de apoyarme durante el desarrollo de mi trabajo.

A mis compañeros de carrera Idalma Guevara, Natalia Campos, Eduardo Mestizo, Aldo Martínez que llevamos esta lucha juntos durante estos años y que me han brindado su amistad y ayuda en diferentes momentos, ha sido un gusto haberlos conocido y poder compartir con ustedes.

A los docentes del departamento de Geofísica por sus enseñanzas.

Al Director de la Escuela de Física M.Sc. César Alvarado, por sus sugerencias.

A Dios todo poderoso, quien ha permitido que alcance esta meta iluminando mi mente en los momentos difíciles.

Gracias.

INDICE

RESUMEN	VII
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Ubicación y descripción del área de investigación.....	4
1.3. Unidades Hidrogeológicas presentes en el área de investigación.	5
1.4. Geología del área de investigación.	7
1.4.1. Formación Bálsamo	8
1.4.2. Formación Cuscatlán	8
1.4.3. Formación San Salvador	8
1.5. Correlación litológica y de registros geofísicos de pozos.	10
.....	10
1.6. Registros Geofísicos en pozos.....	11
1.6.1. Registros Resistivos.....	11
1.6.2. Registros de Radiación Gamma Naturales	12
1.6.3. Registros de Potencial Espontáneo.....	12
1.6.4. Correlación de Registros Geofísicos	13
1.7. Variación de los niveles estáticos en pozos de monitoreo en el área de investigación.....	13
1.7.1. Cálculo de recarga potencial por el método de la variación del nivel freático. 14	
1.7.2. Limitaciones del método VNF.....	17
1.7.3. Cálculo de la recarga acuífera por el método de recarga acuífera subterránea (RAS). 17	
1.7.4. Usos del suelo en el área de investigación.....	18
1.8. Hidráulica de pozos.....	21
1.8.1. Porosidad.....	21
1.8.2. Transmisividad.....	22

1.8.3.	Coeficiente de Almacenamiento.....	22
1.8.4.	Conductividad hidráulica	23
1.8.5.	Análisis de las pruebas de bombeo.....	24
1.8.6.	Método de Jacob (Cooper y Jacob) para estimar los parámetros hidrogeológicos de transmisividad y coeficiente de almacenamiento mediante las pruebas de bombeo las cuales se analizaron través de una hoja de cálculo desarrollada en Excel.	25
1.8.7.	Estimación de parámetros hidrogeológicos, transmisividad y coeficiente de almacenamiento (T, S) a partir de las pruebas de bombeo en régimen variable, ésta estimación se realizó a través del software SSNE.....	27
2.	METODOLOGÍA.....	29
2.1.	Recopilación de la información pre-existente.	30
2.2.	Recolección de datos de campo.....	31
2.3.	Procesamiento de la información tanto litológica como de monitoreo en los pozos del área de estudio.....	31
2.4.	Interpretación de resultados.	33
2.5.	Equipo y software utilizados en el desarrollo de la investigación	34
3.	RESULTADOS.	37
3.1.	Modelo Litológico del Área de Investigación	37
3.2.	Discusión de los resultados obtenidos en los perfiles de correlación litológica y geofísica.....	47
3.3.	Comportamiento temporal de los parámetros medidos en el acuífero (nivel estático, temperatura y conductividad eléctrica del agua).....	48
3.4.	Impermeabilización del suelo en el área de investigación.....	55
3.5.	Régimen de precipitaciones anuales en El Salvador	58
3.6.	Cálculo de la Recarga potencial a través de la variación del nivel freático (VNF). 59	
3.7.	Recarga Acuífera Subterránea (RAS-FORGAES).....	64
3.8.	Cálculos de Transmisividad y coeficiente de almacenamiento para el acuífero en el área de estudio	68
3.9.	Análisis de la explotación del acuífero a través de pozos y manantiales.....	75
3.10.	Análisis del efecto de la explotación del acuífero en el corto y mediano plazo, por medio del comportamiento temporal del nivel estático medido en los pozos de monitoreo.....	76
4.	CONCLUSIONES.....	77
5.	RECOMENDACIONES	80

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	81
7. ANEXOS	83
Anexo I. Litología.....	83
Anexo II. Registros Geofísicos.....	100
Anexo III. Parámetros Hidrogeológicos.....	109

Índice de Figuras

Figura 1. 1: Mapa de ubicación del área de investigación.....	4
Figura 1. 2: Mapa de las unidades hidrogeológicas del área de investigación. Fuente Mapa hidrogeológico de El Salvador, ANDA-COSUDE, escala 1:100,000.	5
Figura 1. 3: Mapa Geológico del área de investigación. Fuente: Misión Geológica Alemana, año 1,971. Escala 1:100,000.....	7
Figura 1. 4: Esquema crono estratigráfico de las formaciones y miembros geológicos presentes en la zona de estudio.	9
Figura 1. 5: Ascenso del nivel freático vs precipitaciones que los produjeron, valores de almacenamiento calculados (Quiroz-Londoño, Martínez & Massone, 2012).	16
Figura 1. 6: Mapa sobre usos de suelo en el área de investigación. Fuede MARN, Mapa de Usos del Suelo de El Salvador, año 2012.	20
Figura 1. 7: Esquema de prueba de bombeo.	25
Figura 2. 1: Esquema metodológico de actividades según los objetivos propuestos. ..	30
Figura 2. 2: Equipo utilizada para medición de los parámetros hidrogeológicos (nivel estático, temperatura y conductividad eléctrica del agua) (SNF7304)	34
Figura 2. 3: Sonda multiparámetro empleada en la medición de los parámetros hidrogeológicos (nivel estático, temperatura y conductividad eléctrica del agua)	35
Figura 2. 4: Sonda que mide el nivel del agua en los pozos.....	35
Figura 3. 1: Mapa de ubicación de los perfiles de correlación litológica y geofísica dentro del área de investigación.....	38
Figura 3. 2: Monitoreo de nivel estático pozo CDD El Ángel.	48
Figura 3. 3: Monitoreo de Temperatura y Conductividad eléctrica del agua, pozo CDD de El ángel	49
Figura 3. 4: Monitoreo de nivel estático pozo Plaza Integración	50
Figura 3. 5: Monitoreo de Temperatura y Conductividad eléctrica del agua, pozo Plaza Integración.....	51
Figura 3. 6: Monitoreo de nivel estático pozo INSINCA.....	52
Figura 3. 7: Monitoreo de Temperatura del agua, pozo INSINCA.....	53
Figura 3. 8: Monitoreo de nivel estático pozo COBEA.	53

Figura 3. 9: Monitoreo de Temperatura y Conductividad eléctrica del agua, pozo COBEA.	54
Figura 3. 10: Área de investigación año 1970.	55
Figura 3. 11: Área de investigación año 2002.	56
Figura 3. 12: Área de investigación año 2010.	57
Figura 3. 13: Área de investigación año 2012.	57
Figura 3. 14: Área de investigación año 2018.	58
Figura 3. 15: Resumen de lluvias para el municipio de Apopa, Según El MARN.	59
Figura 3. 16: Mapa de ubicación de los pozos de monitoreo utilizados para el cálculo de la recarga acuífera.	60
Figura 3. 17: Monitoreo de nivel estático pozo COBEA, valor mínimo círculo rojo, valor máximo círculo verde.	62
Figura 3. 18: Monitoreo de nivel estático pozo Plaza Integración, valor mínimo círculo rojo, valor máximo círculo verde.	63
Figura 3. 19: Mapa de recarga acuífera método RAS. FORGAES-MARN, Año 2005.	66
Figura 3. 20: Visualización del software SSNE, para análisis de prueba de bombeo pozo CDD El Ángel.	69
Figura 3. 21: Muestra la curva del comportamiento de la prueba de bombeo pozo El Ángel.	72
Figura 3. 22: Muestra la curva del comportamiento de la prueba de bombeo pozo INSINCA.	75

Índice de Tablas

Tabla 1. 1: Inventario de pozos con litología utilizados en el desarrollo de la investigación. N- No tiene registros geofísicos, S- Si tiene registros geofísicos.	10
Tabla 1. 2: Descripción de las categorías de uso de suelo 2011. Fuente. SIT – OPAMSS. Insumo utilizado: imagen de satélite WordView 2011-2012 adquirida para el proyecto y propiedad del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).	19
Tabla 3. 1: Resumen de la variación entre los valores máximos y mínimos medidos de los parámetros en el periodo de registro de los pozos de monitoreo.	54
Tabla 3. 2: Resumen de almacenamiento específico (specific yield) por textura para 17 estudios (Johnson, 1967).	61
Tabla 3. 3: Resultados de la estimación de la recarga por el método de la Variación del Nivel Freático (VNF).	64
Tabla 3. 4: Muestra los datos para el análisis de la recarga por el método RAS.	67
Tabla 3. 5: Datos de entrada a la hoja de cálculo de Excel.	70
Tabla 3. 6: Muestra los datos de entrada requeridos en el programa (tiempo y descensos)	70
Tabla 3. 7: Datos de entrada a la hoja de cálculo de Excel.	73
Tabla 3. 8: Muestra los datos de entrada requeridos en el programa (tiempo y descensos).	73

RESUMEN

El conocimiento de la litología de una zona es esencial para establecer medidas encaminadas a la protección del recurso hídrico, sin tener un conocimiento previo del mismo, de sus características y comportamiento es difícil implementar buenos planes de manejo sostenible del agua subterránea. La zona estudiada es de gran importancia industrial, habitacional y agrícola.

Se construyó un modelo litológico con la finalidad de conocer detalladamente las principales características litológicas e hidrogeológicas de las capas en profundidad así como también su potencial acuífero en el área de interés, para ello se construyeron 4 perfiles de correlación cubriendo un área de 21.96 km^2 del municipio de Apopa departamento de San Salvador, se utilizó la información litológica y de registros geofísicos de los pozos perforados en el área, también se desarrolló un análisis de la variación de los niveles estáticos, conductividad eléctrica y temperatura del agua con registros de dichos parámetros en 6 pozos de monitoreo.

Se realizó el cálculo de recarga acuífera con dos métodos el de la variación de niveles freáticos (VNF) para el cual se utilizaron los registros de variación de nivel de dos pozos; el pozo COBEA y el pozo Plaza Integración, el cálculo se desarrolló para un período de registro de un año, se utilizaron solamente 2 de los 6 pozos de monitoreo por ser los que presentaban un mejor comportamiento en los datos de registro, también se calculó con el método de recarga acuífera subterránea (RAS) el cual se refiere a la recarga potencial de agua subterránea sin considerar las explotaciones a través de los pozos.

Esta investigación compara los resultados obtenidos de la estimación de la recarga hídrica potencial (RAS) con la metodología de la recarga hídrica estimada por el método de la Variación del Nivel Freático (VNF) (aproximadamente 8.11 millones de $m^3/año$), respecto a la recarga hídrica potencial subterránea (RAS) (aproximadamente 9.11 millones de $m^3/año$). Los resultados obtenidos por ambos métodos tuvieron una variación de 1 millón de $m^3/año$, ésta diferencia entre los métodos podría estar sujeta a que el método de la Variación del Nivel Freático se ve influenciado por la extracción del agua del acuífero por medio de los pozos de explotación. La explotación del acuífero en un año es de 14.34 millones de metros cúbicos, mientras que el promedio de la recarga por el método VNF y RAS es de 8.61 millones cúbicos al año, se infiere que existen 5.73 millones de metros cúbicos de diferencia, de continuar la extracción pueden haber problemas de desabastecimiento de agua potable en la zona por lo que es de suma importancia tomar medidas de sostenibilidad en el acuífero.

INTRODUCCIÓN

El Salvador es un país con suficiente disponibilidad del recurso hídrico; tanto superficial como subterráneo, sin embargo los niveles de contaminación de las aguas superficiales son altos según el informe de calidad de agua (MARN, 2015) los cuales han mejorado muy poco según el informe de calidad del agua (MARN, 2017), las aguas superficiales no cumplen con los parámetros de calidad según las normas para consumo humano (agua potable). Dada esta situación, se intensifica la explotación de las aguas subterráneas como una fuente con menor grado de contaminación, aunque representa un mayor costo su extracción, ya que se requiere perforar muy profundo, instalar equipos de bombeo que incrementan el consumo de energía eléctrica y por ende, un mayor costo económico para el suministro del agua potable a la población.

Ésta es la importancia que tienen las aguas subterráneas para el suministro del agua potable a la población, por lo que se vuelve importante realizar estudios como este, para tener un mejor conocimiento del comportamiento de los acuíferos y los materiales geológicos en los que éstos se desarrollan, con el objetivo de hacer un manejo adecuado del recurso hídrico.

En éste trabajo se realiza un modelo litológico y se determina el comportamiento temporal del nivel estático del sistema acuífero que comprende el sector de Nejapa-Apopa, con la finalidad de hacer un uso adecuado y sostenible del recurso hídrico. Esto se llevará a cabo mediante el análisis de la información de 6 pozos de monitoreo y los pozos de explotación perforados en la zona, desarrollando correlaciones de registros geofísicos y de las columnas litológicas y el estudio de parámetros físicos en los pozos de monitoreo: temperatura, conductividad eléctrica del agua y variación del nivel estático. El estudio comprende un área de 21.96 km^2 y una población de 180,500 habitantes aproximadamente (Boletín Estadístico, ANDA 2016) este dato podría aumentar en poco tiempo, debido a que existen nuevos proyectos habitacionales que se llevaran a cabo en la zona, demandando más recursos hídricos en el área y disminuyendo la infiltración en el suelo, ocasionando con esto, una explotación mayor del acuífero.

Para el desarrollo del estudio se contó con el apoyo de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) tanto en la logística de trabajo de campo y de oficina, como de acceso a bases de datos y equipos de monitoreo en campo.

OBJETIVOS

Para el desarrollo de la presente investigación se plantearon los objetivos siguientes.

OBJETIVO GENERAL

Realizar un modelo litológico y determinar el comportamiento temporal del nivel estático en los pozos de monitoreo del sistema acuífero que comprende el sector de Nejapa-Apopa, a través del análisis de la información litológica, geofísica y de monitoreo obtenida en campo y la existente, esto para lograr una mejor gestión del recurso hídrico en la zona.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Sistematizar la información litológica de la zona, mediante el levantamiento de columnas litológicas de pozos perforados y la correlación de los registros geofísicos existentes de dichos pozos, para presentar un modelo litológico.
- Determinar el comportamiento estacional del sistema acuífero a través de la medición del nivel estático en los pozos de monitoreo ubicados en la zona de estudio en el periodo 2015 a 2018.
- Desarrollar un análisis del efecto de la explotación del acuífero en el corto y mediano plazo, por medio del comportamiento temporal del nivel estático medido en los pozos de monitoreo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

En los municipios de Apopa y Nejapa se han realizado pocos estudios sobre correlaciones litológicas y geofísicas, variación de nivel estático y monitoreo de variables físicas del acuífero que ambos municipios comparten. Se tiene conocimiento sobre estudios de la Evaluación Hidrogeológica y Vulnerabilidad Intrínseca del Sistema Acuífero del municipio de Nejapa, San salvador, en el estudio de (Gil, 2006), se realizó un modelo hidrogeológico aplicando la metodología GOD, se desarrollaron 22 sondeos eléctricos verticales y los análisis químicos de muestras de agua subterránea de los sistemas acuíferos en la zona.

Dicho estudio, hace mención a que en el área existen dos acuíferos principales, uno en depósitos piroclásticos del cuaternario y otro en lavas fracturadas del cuaternario. El segundo acuífero es principalmente libre y en algunos sectores es semiconfinado, explotado por pozos perforados para el abastecimiento público y privado del municipio de Nejapa. Desde el punto de vista de vulnerabilidad intrínseca, se determinó que las características hidrogeológicas, la profundidad del nivel del agua y la cobertura del acuífero en depósitos piroclásticos evidencian una vulnerabilidad baja en un 22% del área evaluada, la vulnerabilidad media se presenta en un 62% del área analizada y un 16% está en el área restante la vulnerabilidad es alta.

Para el desarrollo de la investigación que se plantea, es de importante conocer los materiales geológicos y la vulnerabilidad Intrínseca de los acuíferos en la zona.

Se ha revisado el estudio realizado por (Alvarado, 2007). El determinó un Modelo Conceptual y Vulnerabilidad Intrínseca del Acuífero Quezaltepeque-Nejapa, aplicando la metodología GOD, proporciona información geológica de la zona de interés, los resultados del trabajo muestran que el acuífero Quezaltepeque-Nejapa se encuentra en una capa geoelectrica con resistividades entre $10 \Omega m$ y $100 \Omega m$.

1.2. Ubicación y descripción del área de investigación.



Figura 1. 1: Mapa de ubicación del área de investigación

En la Fig. 1.1. Se muestra el área de investigación comprendida en los municipios de Apopa y Nejapa, tiene una extensión de 21.96 km^2 y forma parte del área Metropolitana de San Salvador, está delimitada de la manera siguiente: al norte con los municipios de Guazapa y Aguilares, al oeste con el municipio de Nejapa, al sur con los municipios de Mejicanos, Ayutuxtepeque y Ciudad Delgado. La zona está densamente poblada e industrializada con proyectos habitacionales a desarrollarse, por lo que la demanda de agua en el acuífero es cada vez mayor.

1.3. Unidades Hidrogeológicas presentes en el área de investigación.

Las características hidrogeológicas están determinadas por los procesos volcánicos y erosivos que han ocurrido en una determinada zona. La diferenciación de las unidades hidrogeológicas presentes en la zona estará influenciada por las características hidráulicas (conductividad hidráulica) de los diferentes materiales que constituyen cada una de las formaciones geológicas identificadas.

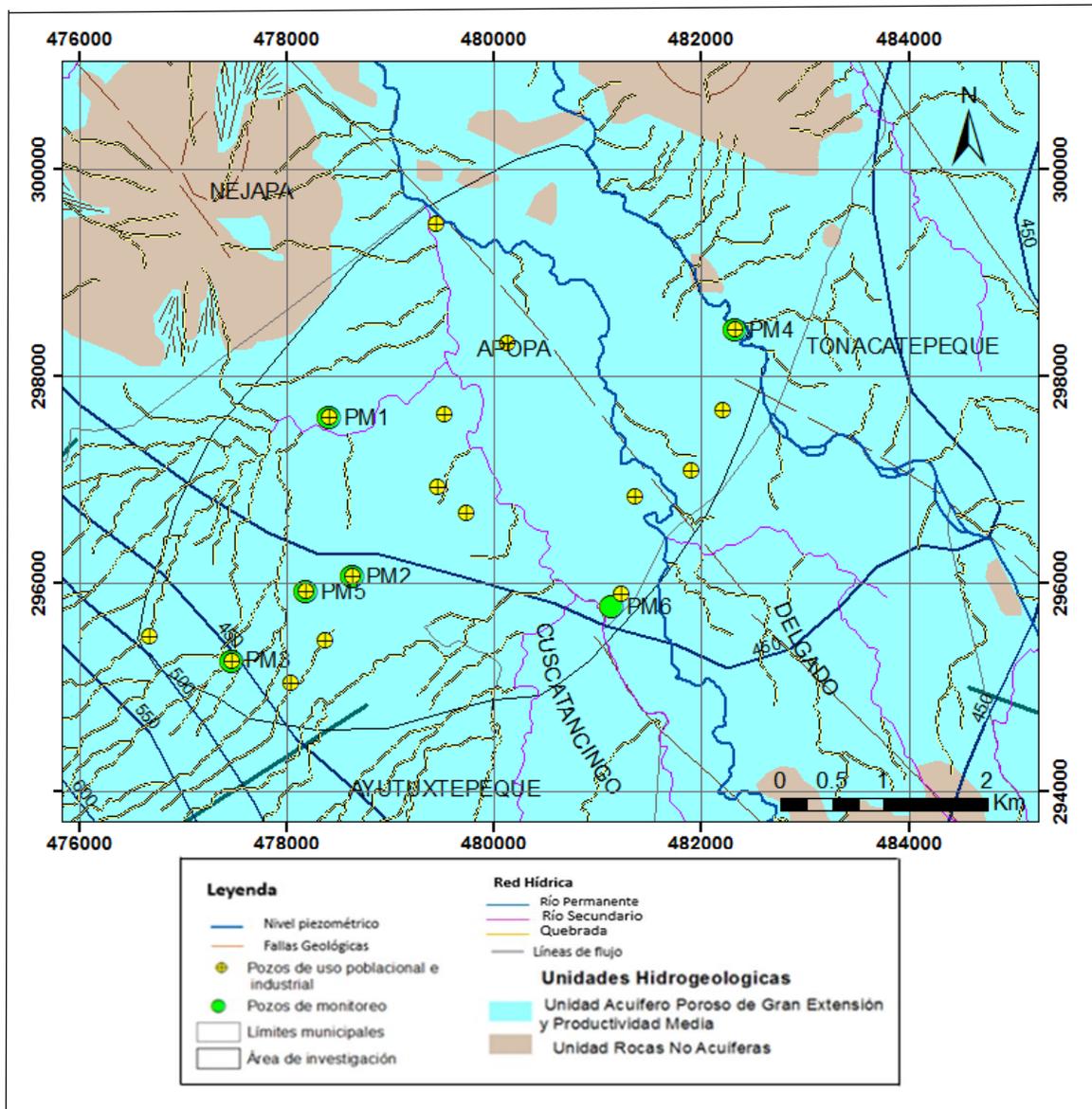


Figura 1. 2: Mapa de las unidades hidrogeológicas del área de investigación. Fuente Mapa hidrogeológico de El Salvador, ANDA-COSUDE, escala 1:100,000.

Las unidades hidrogeológicas según el Mapa de la Figura 1.2, presentes en el área de estudio son:

Unidad acuífero granular poroso de gran extensión y productividad media

Los materiales de esta unidad consisten, principalmente, en materiales aluviales (gravas, arenas, cantos rodados, etc.), además de piroclásticos aglomerados y retrabajados (pómez, lapilli, tobas), teniendo una distribución granulométrica que varía de fina a gruesa. Las conductividades hidráulicas pueden variar de medianas a bajas, como consecuencia del grado de cementación o compactación que pueden tener los granos de los materiales que la constituyen. Esta unidad puede tener más de 50 metros de espesor. Esta cubre más del 95 % el área de estudio.

Unidad rocas no acuíferas.

Los materiales de esta unidad están compuestos por flujos macizos de lavas, rocas metamórficas, intercalados con tobas aglomeradas y brechosas, lahares cementados y presenta conductividades hidráulicas muy bajas o casi nulas, debido a su baja porosidad o a su alto grado de compactación y cementación. Se considera que constituyen el basamento de los acuíferos identificados en la zona de estudio. La profundidad a la que se encuentra esta unidad se desconoce; ya que en las perforaciones realizadas (a más de 100 m.) no se ha logrado identificar su presencia. Su espesor puede superar los 300 metros. Esta cubre menos del 5% el área de estudio.

1.4. Geología del área de investigación.

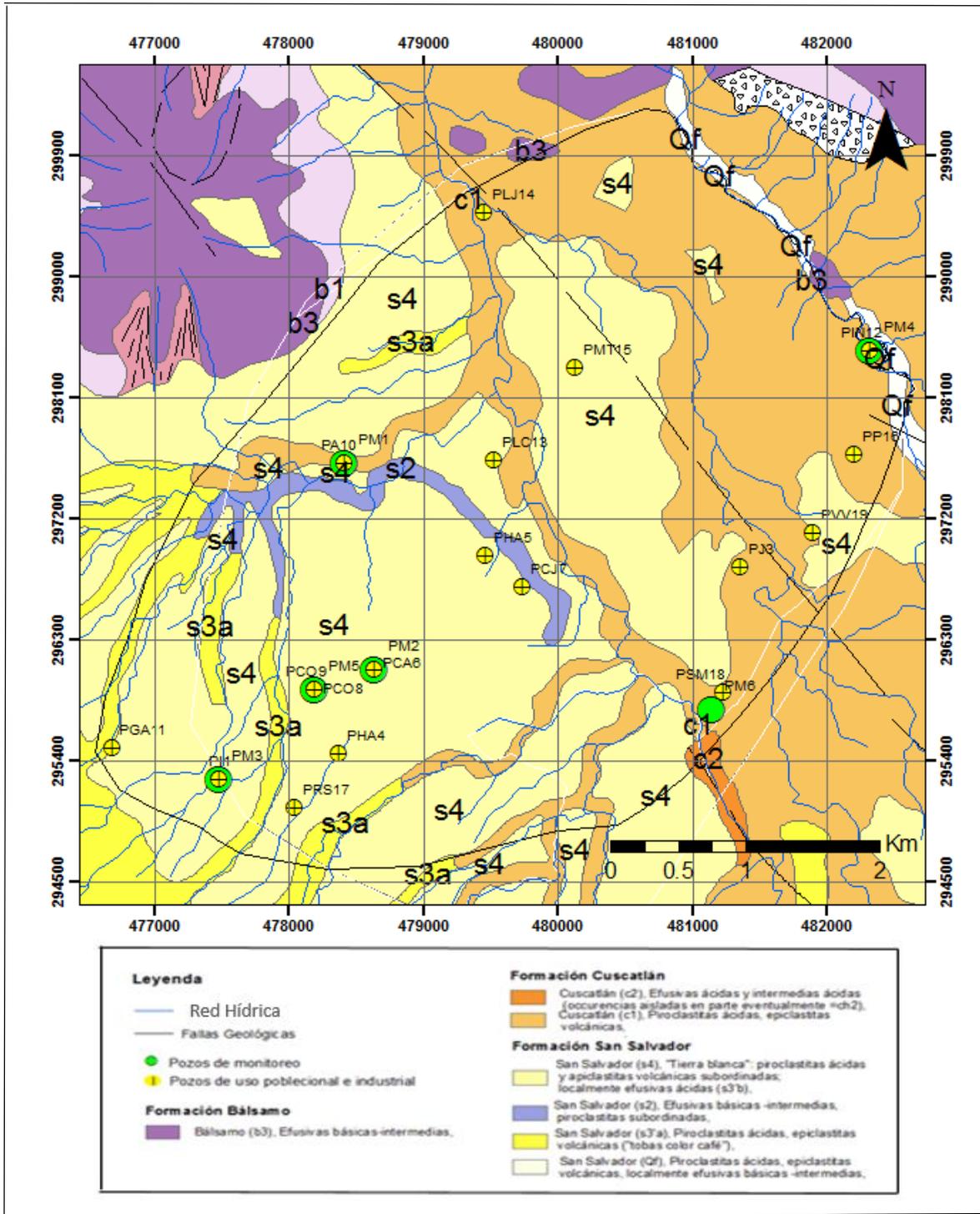


Figura 1. 3: Mapa Geológico del área de investigación. Fuente: Misión Geológica Alemana, año 1,971. Escala 1:100,000.

La geología dominante del área de investigación corresponde al cuaternario y terciario, se encuentran materiales de origen volcánico provenientes de diferentes eventos eruptivos.

A continuación se describen las formaciones geológicas así como también sus miembros presentes en la zona.

1.4.1. Formación Bálsamo

En este grupo se encuentran los miembros más antiguos presentes en la zona, corresponden al Mioceno y Plioceno, descrita (Baxter, 1994) dentro de la zona de investigación afloran en superficie el miembro b3.

Miembro b3

Constituido por una secuencia de rocas volcánicas de tipo efusivas básicas-intermedias piroclásticas, epiclastitas volcánicas subordinadas. Las cuales comprenden el miembro medio de la formación.

1.4.2. Formación Cuscatlán

Definida (Baxter, 1994) como una secuencia volcano-sedimentaria del Plio-pleistoceno. Los miembros de ésta formación presentes en la zona son el c1 y c2.

Miembro c1

Formado por tobas caracterizadas por la presencia de lapilli de pómez y fragmentos de lavas dacíticas vítreas y andesitas, inmersas en cenizas finas no estratificadas.

Miembro c2

Definido como rocas efusivas básicas intermedias, tipo andesíticas y basálticas.

1.4.3. Formación San Salvador

Descrita (Baxter, 1994), constituye la formación más reciente, está compuesta por una secuencia de piroclásticas ácidas y efusivas ácidas-básicas intercaladas. Se ubica en el Pleistoceno Superior o Recientes. Los miembros geológicos presentes son el s2, s3'a, s4 y Qf.

Miembro s2

Corresponde a flujos y coladas de lava provenientes de la estructura volcánica de San Salvador de tipo andesítica basáltica o piroclásticas intermedias.

Miembro s3'a

Está compuesto por piroclástitas ácidas y epiclástitas volcánicas descritas como “tobas superiores de color café” provenientes de la caldera de Ilopango.

Miembro s4

Definido cómo una secuencia volcánica de piroclástitas ácidas, lapilli, pómez y cenizas volcánicas provenientes de la caldera de Ilopango.

Miembro Qf

Compuesto por depósitos sedimentarios del cuaternario que se presentan al pie de la zona oeste y noroeste del cerro de Nejapa.

La disposición estratigráfica de los miembros presentes en la zona se muestra en la figura 1.4:

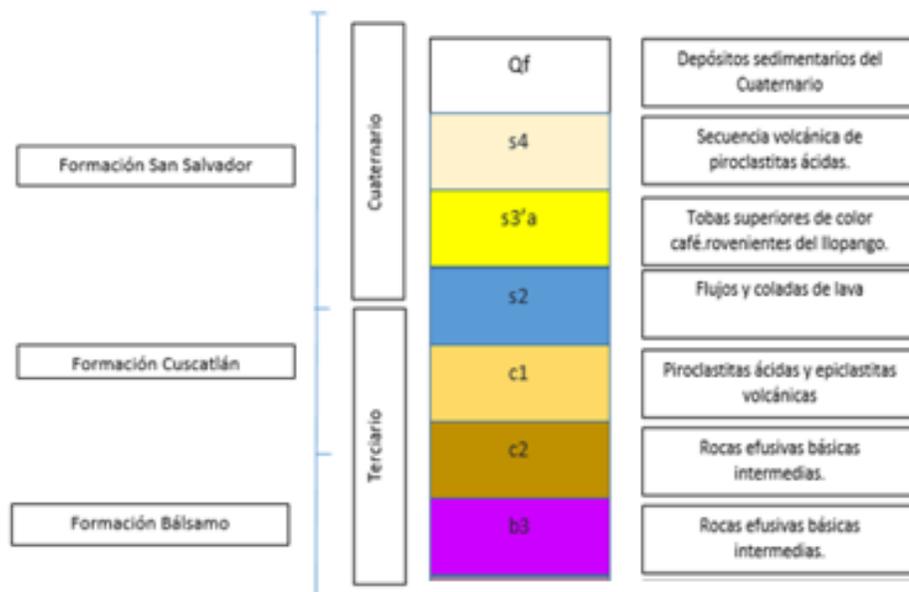


Figura 1. 4: Esquema crono estratigráfico de las formaciones y miembros geológicos presentes en la zona de estudio.

1.5. Correlación litológica y de registros geofísicos de pozos.

En la investigación se desarrollaron varias columnas litológicas y perfiles de correlación litológica y geofísica, a continuación, se explican de manera general los conceptos básicos para su realización.

Una correlación litológica es la correspondencia entre dos o más columnas litológicas de pozos próximos entre sí, donde lo que se pretende es determinar si un estrato geológico tiene continuidad espacial, ya sean en profundidad o espesor (Excel Alzate & Branch, 2006).

En la tabla 1.1, se presenta el inventario de todos los pozos utilizados en la investigación desarrollada.

Tabla 1. 1: Inventario de pozos con litología utilizados en el desarrollo de la investigación. N- No tiene registros geofísicos, S- Si tiene registros geofísicos.

Nº	ID	POZO	ELEVACIÓN (msnm)	NIVEL ESTÁTICO (m)	REGISTOS GEOFÍSICOS
1	PI1	Pozo Plaza Integración	525	75.90	N
2	PZ2	Pozo 1 El Zapote	600	95.71	N
3	PJ3	Pozo Jacarandas	435	11.19	N
4	PHA4	Pozo 2 Hacienda El Ángel	430	48.77	N
5	PHA5	Pozo 3 Hacienda El Ángel	430	48.77	N
6	PCA6	CDD El Ángel	480	62.18	S
7	PCJ7	Pozo Cementerio Jardín Monte Los Olivos	476	47.24	S
8	PCO8	Pozo COBEA 1	495	57.91	S
9	PCO9	Pozo COBEA	495	53.34	N
10	PA10	Pozo El Ángel	420	62.18	S
11	PGA11	Pozo 1 cantón Guadalupe/Palo Alto	580	32.61	S
12	PIN12	Pozo INSINCA	418	28.45	S
13	PLC13	Pozo La Cancha	460	44.50	S
14	PLJ14	Pozo La Junta 2	430	5.70	S
15	PMT15	Pozo Madre Tierra	445	29.26	N
16	PP16	Pozo Popotlan 2	447	38.71	S
17	PRS17	Pozo RANSA	511	67.36	S
18	PSM18	Pozo Santa Marta	470	32.74	N
19	PVV19	Pozo Valle Verde	461	65.43	N

El objetivo fundamental de una correlación litológica es poder tener una visión más completa de la historia geológica y los parámetros geofísicos de una región determinada. Es un procedimiento que sirve para establecer la correspondencia entre partes geográficamente separadas de una unidad geológica. Es una de las técnicas de mayor interés en la Litología, este método es de gran utilidad, ya que, con base en secciones geológicas, pozos y secciones sísmicas se logra conocer la continuidad o discontinuidad lateral de las formaciones geológicas (Excel Alzate & Branch, 2006).

1.6. Registros Geofísicos en pozos

Un registro geofísico es la medición continua en profundidad de un parámetro geofísico como, por ejemplo: resistividad eléctrica, potencial espontáneo, temperatura y conductividad eléctrica del agua, radiación gamma natural. Siendo estos los parámetros más comunes utilizados para las aguas subterráneas, ya que existen muchos otros parámetros que se miden para pozos petroleros, geotérmicos o en minería metálica (Keys, 1990).

Cada uno de estos parámetros se mide a través de un dispositivo conocido como sonda, la cual contiene diferentes sensores o electrodos que miden y registran a diferentes profundidades. (Keys, 1990)

Se tienen varios tipos de registros, pero sólo se describen los utilizados en el desarrollo de ésta investigación los cuales fueron:

1.6.1. Registros Resistivos

Se utiliza para medir la resistividad eléctrica de la formación geológica en la zona no invadida (zona no contaminada por los fluidos de perforación del pozo), las medidas de resistividad eléctrica se usan solas o en combinación con otros sensores. Normalmente la sonda de resistividad eléctrica contiene 3 o más electrodos que miden la resistividad eléctrica a diferente espaciamiento y se conocen como: resistividad corta (separación de electrodos de 8 a 16 pulgadas), resistividad media (separación de electrodos de 16 a 32 pulgadas) y resistividad larga también conocida como laterolog (separación de electrodos de 32 a 64 pulgadas) (Astier, 1971).

La resistividad eléctrica se define como:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} k \quad (1)$$

Donde:

ρ_a : Es la resistividad aparente de la formación

ΔV : Potencial eléctrico

I : Corriente eléctrica

k : Coeficiente geométrico del dispositivo

El valor de ρ obtenido sería la resistividad real del terreno, si éste fuera homogéneo, pero es habitual que la ρ obtenida sea una mezcla de las resistividades de diversos materiales. Por tanto, lo denominamos resistividad aparente (ρ_a).

1.6.2. Registros de Radiación Gamma Naturales

Todas las formaciones geológicas contienen un porcentaje de minerales radioactivos, el cual es lo suficientemente constante para poder ser considerado como característico.

Esta herramienta mide la radioactividad natural de las formaciones y es útil para detectar y evaluar depósitos de minerales radioactivos tales como potasio, torio y uranio (Astier, 1971).

La radiación se mide en función del número de partículas que llegan al sensor, así:

$$N = \frac{n}{1 - nt} \quad (2)$$

Donde:

N : Número de partículas

n : Velocidad media de las partículas

t : Tiempo de contacto de las partículas con el sensor

1.6.3. Registros de Potencial Espontáneo

El SP es un registro de los potenciales naturales terrestres, que se producen entre un electrodo móvil dentro del pozo (A) y un electrodo fijo en superficie (B). Las deflexiones de la curva del SP provienen de las corrientes eléctricas que fluyen en el lodo del pozo (Keys, 1990).

Como se genera el Potencial Espontaneo (SP)

- Potencial de electro filtración, por el lodo en un medio poroso.
- Potencial electroquímico: la existencia de metales del subsuelo
- Corrientes telúricas
- Potencial de membrana, en caso de arcillas o margas
- Por las sales disueltas

El potencial se mide de la siguiente manera:

$$\Delta V = R I \quad (3)$$

Donde:

R: Resistencia eléctrica del equipo

I: Corriente eléctrica

ΔV : Diferencia de potencial entre dos puntos.

1.6.4. Correlación de Registros Geofísicos

Una correlación de registros geofísicos es encontrar la correspondencia o relación de varios registros que miden diferentes parámetros. Para esto se define que parámetros se desean correlacionar, por ejemplo:

- El registro de resistividad mide la resistividad eléctrica aparente de las formaciones geológicas. Así mismo, el registro de potencial espontaneo miden el potencial eléctrico de las formaciones geológicas. En consecuencia, ambos registros tienen correspondencia para identificar aquellos estratos geológicos que son resistivos o conductores con aquellos que son de alto o bajo potencial eléctrico. Esta correspondencia también debe ser congruente con la descripción litológica del estrato perforado.
- También se puede hacer una correlación de registros geofísicos entre 2 o más pozos donde lo que se pretende es determinar si un estrato geológico tiene continuidad espacial ya sea en profundidad o en espesor.

1.7. Variación de los niveles estáticos en pozos de monitoreo en el área de investigación.

Debido a la disminución de las lluvias durante los últimos años; los acuíferos han sufrido una disminución en su recarga, por lo que es importante medir los cambios en los niveles estáticos para predecir el comportamiento de éstos, si ésta reducción continua por más años o se recupera el régimen de lluvia normal en el país. Lo

anterior se conoce como cambio climático y fenómenos como El Niño y La Niña, es muy poco lo que se puede hacer para disminuir los efectos del cambio climático, sin embargo, si se puede trabajar en la adaptación o mitigación de estos efectos (MARN, 2016).

Además de los efectos anteriores, existen actividades antropogénicas tales como:

La impermeabilización de los suelos: Es debida a obras civiles que impiden la infiltración del agua lluvia, alterando el ciclo hidrológico y la recarga de los acuíferos.

La sobreexplotación de un acuífero es esencialmente extraer del acuífero un volumen superior a su recarga natural. Los pozos se pueden secar si el nivel freático cae por debajo de su profundidad inicial, lo que ocurre ocasionalmente en años de sequía, y por las mismas razones se pueden secar los manantiales.

Cambios en el uso del suelo. Muchos de los suelos que eran cultivados con café ahora son cultivos de caña de azúcar, granos básicos o son utilizados para pastoreo, esto genera una reducción de la recarga acuífera e incrementa la escorrentía provocando erosión en los suelos y deficiencias en los nutrientes.

1.7.1. Cálculo de recarga potencial por el método de la variación del nivel freático.

Conocer la recarga potencial que un acuífero recibe, es un factor clave para dar protección y hacer un manejo sostenible de este. Para (Healy & Cook, 2002) la estimación de la recarga potencial es de vital importancia para gestionar adecuadamente un acuífero, siendo el método de la variación del nivel freático (VNF), uno de los más sencillos de aplicar, debido a la independencia del mecanismo de desplazamiento del agua subterránea. Dicho método es aplicable para acuíferos no confinados (acuíferos libres) y requiere conocimiento del almacenamiento específico y las variaciones temporales del nivel freático.

El nivel freático se define según (Hamad, 2009) cómo la superficie que separa la zona capilar de la zona saturada, pudiendo ser definida por el nivel del agua en pozos que se encuentran en acuíferos no confinados. Físicamente se refiere a la superficie en la cual la presión hidrostática es igual a la presión atmosférica.

La recarga no se produce de forma continua, en algunas épocas con mayor intensidad que otras; existen lugares donde la precipitación es casi inexistente o no es eficaz para producir recarga durante varios meses del año, con lo que se marcan claramente, estaciones en que se produce recarga y otras estaciones en las que no se produce. La recarga origina una elevación del nivel de agua y después, el agua aportada se extiende hacia los lugares de descarga, naturales o artificiales

del acuífero, dando origen a un descenso o recesión gradual del nivel piezométrico que se mantiene hasta el siguiente periodo de recarga. (Custodio & Llamas, 2001).

El cálculo de la recarga potencial es aplicable a acuíferos freáticos poco profundos, con respuesta rápida de los niveles freáticos a los fenómenos de recarga. Es uno de los métodos más utilizados en el mundo para estimar la entrada de agua a acuíferos libres. Requiere para su aplicación de la estimación previa del coeficiente de almacenamiento específico y mediciones temporales de nivel (Healy & Cook, 2002). Este puede ser simplificado de la siguiente manera:

$$R = \Delta S^{gw} + Q^{bf} + ET^{gw} + Q_{off}^{gw} - Q_{on}^{gw} \quad (4)$$

Donde:

Q_{off}^{gw} : Flujo entrante.

Q_{on}^{gw} : Flujo subterráneo saliente

ΔS^{gw} : Cambio en el almacenamiento

Q^{bf} : Flujo base

ET^{gw} : Evapotranspiración desde el acuífero.

$$R = \frac{S_y dh}{dt} = \frac{S_y \Delta h}{\Delta t} \quad (5)$$

Donde:

R : Es la recarga

S_y : Almacenamiento específico

h : Altura del nivel piezométrico

t : Es el tiempo.

Esta ecuación asume que toda el agua que alcanza el nivel freático llega inmediatamente al almacenamiento y que todos los otros componentes de la ecuación general de recarga son cero durante el tiempo de duración del evento, lo que hace que el tiempo sea crítico en el éxito del método. La valoración de la recarga se realiza estimando el valor de Δh , el cual obedece a la diferencia entre el pico más

alto del gráfico nivel-tiempo y un punto extrapolado desde la curva de descenso anterior, para cada lapso seleccionado (Healy & Cook, 2002).

Para el cálculo del almacenamiento específico S_y , Quiroz Londoño et al (2012) realiza este cálculo, graficando los ascensos del nivel freático respecto a las precipitaciones que lo generaron Fig. 1.5. Siendo el almacenamiento específico o rendimiento específico (S_y , el inverso de la pendiente de la recta que envuelve los puntos graficados).

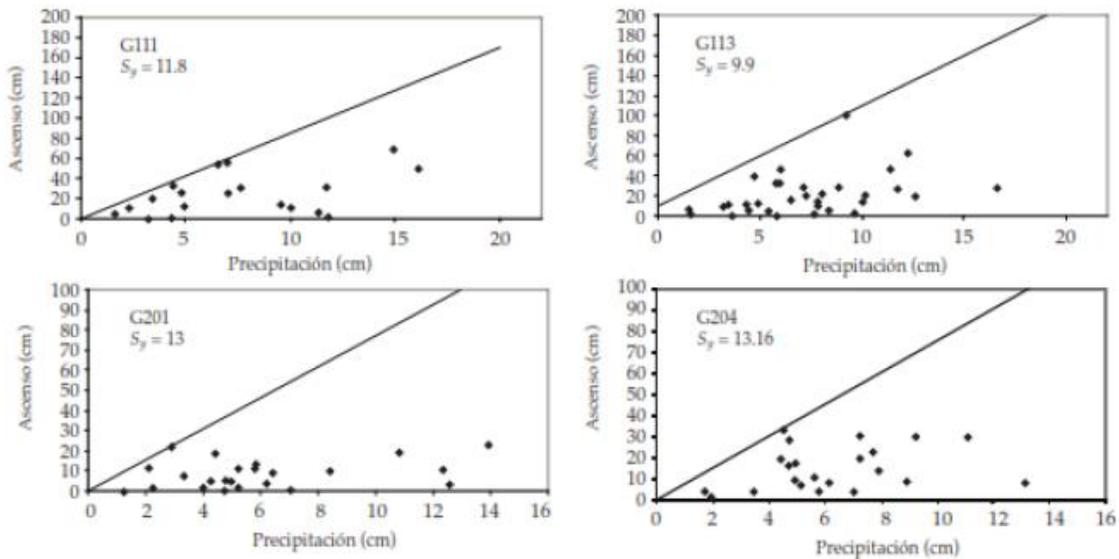


Figura 1. 5: Ascenso del nivel freático vs precipitaciones que los produjeron, valores de almacenamiento calculados (Quiroz-Londoño, Martínez & Massone, 2012).

El valor del almacenamiento específico no fue calculado mediante el método de la Fig 1.5, ya que no se contó con los informes mensuales de precipitación de lluvias de la zona.

También se puede obtener el valor del almacenamiento específico a partir de la textura del suelo, en el artículo de (Healy & Cook, 2002) presentan un resumen estadístico de los resultados de 17 estudios compilados por Johnson (1967) (ver Tabla 3.3). Donde se calculan los almacenamientos específicos para suelos de diferentes texturas, cabe mencionar que son valores promedio y que el valor utilizado en ésta investigación fue de 0.32 que es el valor máximo de coeficiente de almacenamiento específico para arenas medias. (Se tomó el valor máximo debido a que representaba de mejor manera los materiales geológicos que se encuentran en superficie).

1.7.2. Limitaciones del método VNF

Según (Healy & Cook, 2002) este método no se ve afectado por los mecanismos de transporte del agua en la zona no saturada, por lo que los resultados no se ven afectados por estos. Siendo el nivel del agua medido en un pozo, representativo de hasta varios metros cuadrados. Aunque el flujo en la zona no saturada no es un problema, Healy & Cook describe ciertas limitantes:

- El método se aplica mejor a acuíferos libres no muy profundos, en que la variación del nivel cambie de manera abrupta.
- Las razones de recarga pueden variar sustancialmente de un sitio a otro, debido a diferencias de elevación, geología, vegetación, pendiente entre otros factores, por lo que el pozo debe estar ubicado de manera que los niveles del agua monitoreados sean representativos de la cuenca como un todo.
- El método no puede representar una tasa de recarga constante. Por ejemplo, si la tasa de recarga fuera igual a la tasa de descarga que sale del acuífero libre, los niveles de agua no cambiarían, por lo que el método no sería aplicable.
- Otras limitantes están relacionadas con la causa de las fluctuaciones y el cálculo adecuado para el almacenamiento específico.

1.7.3. Cálculo de la recarga acuífera por el método de recarga acuífera subterránea (RAS).

La metodología RAS para el cálculo de la recarga acuífera subterránea, fue desarrollada en el marco del proyecto de Fortalecimiento de la Gestión Ambiental de El Salvador (FORGAES), en el año 2005.

El mapa de la recarga de agua subterránea de El Salvador, sirve para adoptar medidas para un mejor aprovechamiento del recurso hídrico, planificaciones futuras (desarrollo industrial y urbanístico) y zonas de recuperación de los recursos hídricos subterráneos, (Junker, 2005).

Este mapa de recarga acuífera se ha utilizado para realizar el cálculo de la recarga acuífera subterránea en la zona de investigación y poder realizar comparaciones con los resultados obtenidos con el método VNF, dichas comparaciones de presentan más adelante en éste documento.

1.7.4. Usos del suelo en el área de investigación.

Según el informe de zonificación y usos del suelo de la Subregión Metropolitana de San Salvador (SRMSS), los usos de suelo en la zona de interés se clasifican en 16 categorías. (MARN, Zonificación Ambiental y Usos de suelo de la subregión Metropolitana de San Salvador., 2012).

Dichas categorías se describen a continuación en la tabla 1.2:

Tabla 1. 2: Descripción de las categorías de uso de suelo 2011. Fuente. SIT – OPAMSS. Insumo utilizado: imagen de satélite WordView 2011-2012 adquirida para el proyecto y propiedad del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

Categoría	Descripción
1. Tegido Urbano continuo	Zonas urbanas que cuentan con infraestructuras y servicios de vialidad, alumbrado, abastecimiento de aguas, evacuación de agua lluvia y saneamiento con características suficientes para servir al conjunto de la zona.
2. Tegido urbano discontinuo	Zonas urbanas que cuentan con edificaciones, pero que no disponen de todas las infraestructuras y servicios necesarios. Ejemplos: asentamientos urbanos aislados, así como áreas aledañas a los cascos urbanos de los municipios periféricos
3. Institucional	Polígonos de instituciones gubernamentales
4. Parque recreativo	Polígonos de los principales parques recreativos urbanos
5. Zonas comerciales (grandes centros comerciales)	Grandes áreas donde se desarrollan actividades de tipo comercial. Ejemplo: La Gran Vía, Plaza Mundo, Multiplaza, Plaza Merliot, etc.
6. Zonas industriales y logísticas	Lugares donde se localizan zonas francas y maquilas, industrias de bodegaje o almacenaje. Ejemplo: Plan Industrial La Laguna, Jumex (en la zona de El Ángel, en Apopa), La Constancia, etc.
7. Vegetación herbácea	Zonas formadas principalmente por un estrato herbáceo gramínea o no, generalmente de baja productividad
8. Vegetación arbórea	Comprende el conjunto de las formaciones vegetales constituidas por árboles de diferentes estructuras boscosas.
9. Cultivos, pastos y granos básicos	Los cultivos y pastos son pequeñas parcelas de cultivos anuales diversificados, de pastos cultivados o anuales y de cultivos permanentes. Los cultivos incluidos en esta categoría son básicamente hortalizas. Los granos básicos, son superficies de cultivos anuales herbáceos los cuales presentan superficies de terreno de forma homogénea.
10. Caña de azúcar	Espacios ocupados por las plantaciones de caña de azúcar, cualquiera que sea la fase de desarrollo alcanzada.
11. Café	Asociación con especies arborescentes por diversas razones: sombra, aporte nutritivo, etc. Ejemplos de presencia de cafetales: Cerro Guazapa, Volcán de San Salvador, Cordillera del Bálsamo y otras.
12. Árboles frutales	Áreas generalmente plantadas en zonas de los valles, tierras bajas y colinas. Polígonos de más de una hectárea, con presencia de árboles frutales (principalmente naranjales)
13. Bosques de galería	Cinturones de vegetación a orillas de los ríos con un tipo de vegetación bastante intervenido.
14. Plantaciones de bosque mono específico	Bosque compuesto especialmente de individuos de la misma especie tales como: teca, pino, ciprés, eucaliptos entre otros. Porciones de bosque localizados al sur de la subregión, por ejemplo los municipios de Zaragoza, San José Villanueva y sector del Cerro de San Jacinto, entre otros.
15. Zonas de extracción de pétreos y áridos	Zonas específicas donde se realizan actividades de extracción de pétreos y áridos
16. Botaderos y rellenos sanitarios	Identificación de botaderos clausurados o activos. Ejemplo: Antiguo botadero de Mariona, Antiguo botadero de Soyapango, Relleno Sanitario MIDES.

En la figura 1.6. Se muestran las categorías de uso de suelo en el área de investigación y se puede notar que más de 50% del área total son zonas urbanas impermeabilizadas, las cuales impiden la infiltración del agua lluvia, interrumpiendo así el ciclo hidrológico.

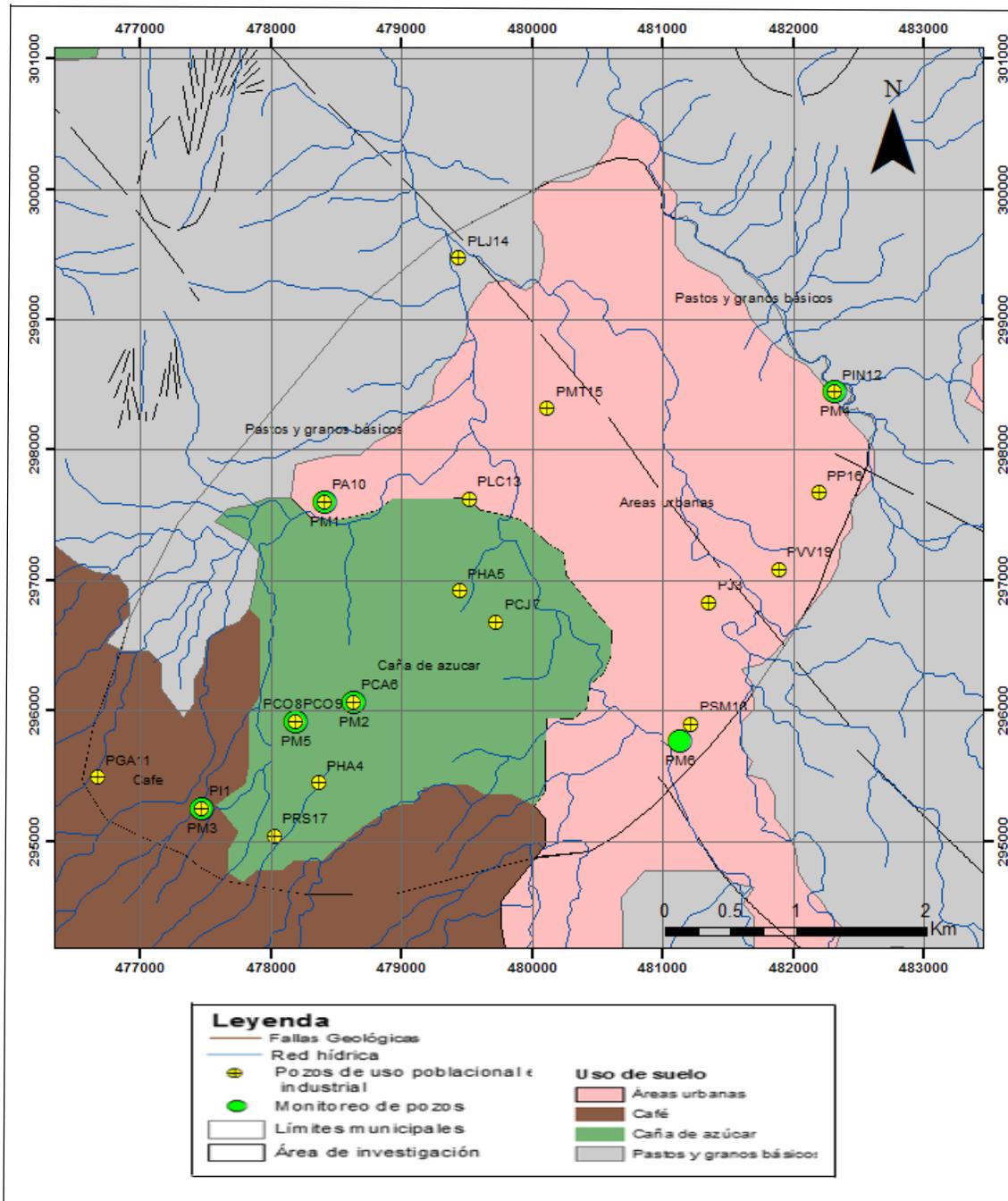


Figura 1. 6: Mapa sobre usos de suelo en el área de investigación. Fuente MARN, Mapa de Usos del Suelo de El Salvador, año 2012.

1.8. Hidráulica de pozos.

La Hidráulica. Es la rama de la física que estudia el comportamiento de los líquidos en función de sus propiedades específicas. Es decir, estudia las propiedades mecánicas de los líquidos dependiendo de las fuerzas a las que son sometidos. Aplicando estos principios tenemos que en la hidráulica de pozos el objetivo principal es describir los tipos de acuíferos mediante el análisis y cálculos de los parámetros como: transmisividad y coeficiente de almacenamiento, los cuales se obtienen por medio de las pruebas de bombeo que se describen a continuación.

Pruebas de bombeo para determinar los parámetros hidráulicos en el acuífero.

Las propiedades hidráulicas de las rocas y depósitos no consolidados determinan de manera importante la cantidad de agua que pueden almacenar, transmitir y ceder. Dichas propiedades dependen de diversos factores geológicos, tanto de índole genético como la granulometría y la composición mineralógica como posteriores a la génesis de las unidades geológicas, entre estos factores destacan la compactación, cementación, fracturamiento, erosión, intemperismo, entre otros. (Comisión Nacional del Agua , 2007).

Entre las principales características hidráulicas se tienen:

1.8.1. Porosidad.

La porosidad se define como el volumen de vacíos o poros que existen en un material por unidad de volumen, específicamente se establece como la relación que existe entre el volumen que ocupan dichos espacios vacíos y el volumen total que ocupa el material expresada en porcentaje. (Ecuación 6)

$$n(\%) = Vv/Vt \times 100 \quad (6)$$

Donde:

n : Porosidad (adimensional)

Vv : Volumen de espacios vacíos en el material (cm^3)

Vt : Volumen total del material (cm^3)

1.8.2. Transmisividad

La transmisividad es una propiedad que ha tenido relevancia práctica en la evaluación de los acuíferos. Ésta determina directamente el rendimiento del espesor acuífero que atraviesa el aprovechamiento hidráulico. A través de ella se pueden calcular la cantidad de agua que puede proporcionar un acuífero en una sección de interés determinada o estimar el rendimiento probable de una captación.

En general, la capacidad transmisora de un acuífero se representa por medio del coeficiente de transmisividad, su valor es el resultado de multiplicar una conductividad hidráulica promedio del acuífero por el espesor saturado con que cuenta (ecuación 5) de la siguiente forma:

$$T = kb \quad (7)$$

Donde:

T : Transmisividad del acuífero (m^2/s)

k : Conductividad hidráulica del acuífero (m/s)

b : Espesor saturado del acuífero (m)

1.8.3. Coeficiente de Almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento es un concepto que determina la capacidad que tiene un acuífero, para almacenar o ceder agua, misma que depende de manera directa, tanto de las características físicas del agua, como de las condiciones petrofísicas e hidráulicas del acuífero, así como de las presiones a las que se encuentra sometida el agua (presión intersticial o de poro) y las partículas granulares (presión intergranular o efectiva), que en general se consideran constantes, salvo que sean modificadas de manera artificial.

El coeficiente de almacenamiento (S) se define como la cantidad de agua que libera (o toma) una columna del acuífero, de sección horizontal unitaria y altura igual a su espesor saturado, cuando la carga hidráulica desciende (o asciende).

Por lo anterior S , es un coeficiente adimensional el cual se expresa de la forma siguiente:

$$S = S_s b \quad (8)$$

Donde:

S : Coeficiente promedio del acuífero (adimensional)

S_s : Coeficiente de almacenamiento específico del acuífero (m^{-1})

b : Espesor saturado del acuífero confinado (m)

1.8.4. Conductividad hidráulica

Se conoce como conductividad hidráulica (K) a la cantidad de agua, que bajo condiciones físicas específicas, circula a través de una sección de área unitaria normal al sentido de flujo, bajo un gradiente hidráulico unitario.

La conductividad hidráulica es una propiedad que depende de las características del fluido y de la permeabilidad del medio poroso a través del cual circula y de la fuerza de gravedad (g). De tal forma, que algunas propiedades del fluido como peso específico, viscosidad dinámica y temperatura, influyen en el valor de K , al igual que el tamaño mediano de los espacios abiertos (d), estratificación, empacamiento, disposición de los granos, distribución de tamaños, considerados a través del factor de forma (C) y la porosidad. Así por ejemplo, en lo que respecta a variaciones en las propiedades físicas del agua resulta que el agua salada circula con mayor velocidad que la dulce, por ser más densa y el agua caliente fluye más rápido que la fría, por ser menos viscosa. Es importante considerar estos factores, sobre todo al relacionarlos con problemas de contaminación, principalmente en la migración de hidrocarburos pesados y ligeros. (Custodio & Llamas, 2001).

La conductividad hidráulica se expresa de la siguiente forma:

$$K = k\rho g/\mu \quad (9)$$

Donde:

K : Conductividad hidráulica (m/s)

k : Permeabilidad intrínseca (darcys)

ρ : Densidad del agua (kg/m^3)

μ : Viscosidad dinámica del agua (cP)

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

La conductividad hidráulica es uno de los principales parámetros que se obtienen del análisis de datos de pruebas de bombeo.

1.8.5. Análisis de las pruebas de bombeo.

Una prueba de bombeo consiste en bombear un pozo que esté perforado en el acuífero que se desea estudiar, durante un cierto tiempo, a un determinado caudal y medir la evolución del nivel piezométrico debida al bombeo, tanto en el mismo pozo de bombeo como en piezómetros y pozos cercanos (pozos de observación). (Comisión Nacional del Agua , 2007)

Una prueba de bombeo tiene dos objetivos principales.

1. Determinar las características hidráulicas de los acuíferos.
2. Proporcionar los datos necesarios para determinar la capacidad específica o la relación caudal-abatimiento.

El primer objetivo éste tipo de pruebas estudian al acuífero mismo y al pozo, más no a la bomba, son llamadas también pruebas de acuífero. Cuando se planifican y llevan a cabo correctamente estas pruebas pueden proporcionar información básica para la solución de problemas locales y aún regionales sobre el flujo del agua subterránea. (Comisión Nacional del Agua , 2007).

En el segundo objetivo, se trata de determinar la selección correcta del equipo de bombeo. Dicha definición deberá basarse además de los resultados de esta prueba de bombeo (aforo) en las características físico-químicas de las aguas extraídas. (Comisión Nacional del Agua , 2007).

A partir del Comportamiento de los abatimientos de los niveles dinámicos, la distancia entre los pozos de observación, el pozo bombeado y el caudal de bombeo, se puede obtener información sobre las características hidráulicas del acuífero, como son: su conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y transmisividad.

La parte más importante de una prueba de bombeo es medir el abatimiento (o recuperación, según de la etapa que se trate) de niveles piezométricos en los pozos de observación y en el de bombeo durante toda la prueba. Como el abatimiento y la recuperación de los niveles freáticos son mayores durante las primeras dos horas, las lecturas se deben realizar a intervalos cortos, estas se van aumentando conforme se prolonga el bombeo.

No es conveniente fijar una duración para todas las pruebas de bombeo, esta debe fijarse de acuerdo a los objetivos perseguidos, al análisis de la información recopilada, a la distancia a la que se encuentran los pozos de observación y a los datos obtenidos durante la prueba. Adicionalmente, el tiempo de bombeo depende del tipo de acuífero, grado de exactitud deseada para evaluar sus características hidráulicas y condiciones propias del pozo de extracción, es deseable que el bombeo se prolongue hasta alcanzar condiciones de flujo permanente.

1.8.6. Método de Jacob (Cooper y Jacob) para estimar los parámetros hidrogeológicos de transmisividad y coeficiente de almacenamiento mediante las pruebas de bombeo las cuales se analizaron través de una hoja de cálculo desarrollada en Excel.

Son necesarios 2 sondeos abiertos en el mismo acuífero. En uno se bombea un caudal constante, en el otro se miden los descensos.

Las medidas en campo son:

- Distancia (r) entre los dos sondeos
- Caudal (Q) constante bombeado
- Tiempo (t) y descensos (s) en el sondeo de observación

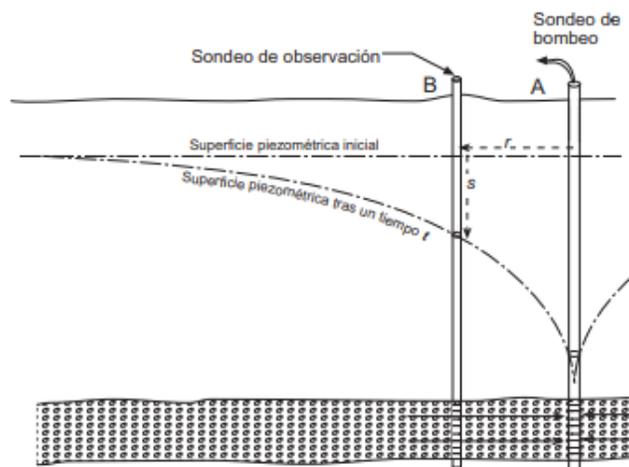


Figura 1. 7: Esquema de prueba de bombeo.

El método conocido como de "Jacob" (Cooper y Jacob, 1946) se basa en la fórmula de Theis, sin embargo, las condiciones para su aplicación son aún más restringidas que en el método de Theis.

La ecuación 10 representa la expresión de Theis para flujo transitorio:

$$s = \left(\frac{Q}{4\pi T}\right) \int_u^\infty e^{-y} \frac{dy}{y} = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (10)$$

Dónde: $u = r^2 S / 4Tt$ es una variable, por lo tanto $S = 4Ttu / r^2$.

Donde:

s : Abatimiento en el piezómetro (m)

r : Distancia del piezómetro al pozo de bombeo (m)

Q : Caudal constante de descarga en el pozo de bombeo ($m^3/día$)

S : Coeficiente de almacenamiento del acuífero (adimensional)

T : Transmisividad del acuífero ($m^2/día$)

t : Tiempo de bombeo (días)

$W(u)$: Función de pozo de Theis = $-0.5772 - \ln u + u - (u^2/4) + (u^3/18) - \dots + (-1)^n (u^n / n \cdot n!)$

Al expandir la ecuación 10 del método de Theis obtenemos:

$$s = \left(\frac{Q}{4\pi T}\right) (-0.5772 - \ln u + u - (u^2/4) + (u^3/18) - \dots + (-1)^n (u^n / n \cdot n!)) \quad (11)$$

Para:

$$u = r^2 S / 4Tt \quad (12)$$

De la fórmula 12, se puede concluir que u decrece conforme el tiempo de bombeo se incrementa y la distancia r al pozo de bombeo disminuye. De acuerdo a esto, para valores grandes de t y valores pequeños de r , los términos posteriores a $\ln u$ en la ecuación 11, se consideran pequeños. Por lo que para valores de $u < 0.01$, el abatimiento puede expresarse como:

$$s = \left(\frac{Q}{4\pi T}\right) (-0.5772 - \ln(\frac{r^2 S}{4Tt})) \quad (13)$$

Al considerar logaritmos decimales en la ecuación 13, resulta lo siguiente:

$$s = \left(2.30 \frac{Q}{4\pi T}\right) (\log(2.25Tt/r^2S)) \quad (14)$$

Al realizar la gráfica de los abatimientos en función del logaritmo del tiempo, se obtiene una línea recta. Esta recta se prolonga hasta interceptar al eje donde $s = 0$, de ésta forma el punto de intersección tiene coordenadas $s = 0$ y $t = t_0$, sustituyendo estos valores en la ecuación 14, se tiene lo siguiente:

$$0 = \left(2.30 \frac{Q}{4\pi T}\right) (\log(2.25Tt_0/r^2S)) \quad (15)$$

Y como, $2.30 Q/4\pi T \neq 0$, entonces:

$$2.25Tt_0/(r^2S) = 1 \text{ ó } S = 2.25Tt_0/r^2 \quad (16)$$

Por otra parte, considerando la diferencia de abatimientos por ciclo logarítmico del tiempo, entonces se tiene:

$$T = 2.30 Q/(4\pi\Delta s) \quad (17)$$

Análogamente se puede demostrar que para un tiempo fijo t , la gráfica de s vs. r En papel semilogarítmico forma una línea recta y las siguientes ecuaciones son derivadas de ella:

Transmisividad

$$T = 2.30 Q/(2\pi\Delta s) \quad (18)$$

Donde Q es el caudal en $m^3/día$, Δs son los descensos en metros y 2.30 es una constante adimensional.

Coeficiente de Almacenamiento

$$S = 2.25Tt/r_0^2 \quad (19)$$

Donde T es la transmisividad en $m^2/día$, t es el tiempo en minutos, r_0 es la distancia en metros y 2.25 es una constante adimensional.

Además de éste método de estimación de los parámetros hidrogeológicos a través del análisis de las pruebas de bombeo para lo cual se utilizó el software SSNE el cual se describe a continuación.

1.8.7. Estimación de parámetros hidrogeológicos, transmisividad y coeficiente de almacenamiento (T, S) a partir de las pruebas de bombeo en régimen variable, ésta estimación se realizó a través del software SSNE.

El ensayo por pruebas de bombeo es uno de los más útiles medios para determinar las propiedades hidráulicas de acuíferos y capas confinantes. Se pueden obtener resultados fidedignos que, en general, son representativos de una superficie mayor que los obtenidos por medio de observaciones

En el trabajo sobre “Estimación de los Parámetros Hidrogeológicos (S, T) a partir de Ensayos de Bombeo en Régimen Variable Resolviendo un Sistema No-Lineal de Ecuaciones (SNE)” de (Lui, Goyes, & Gélvez, 2014). Se busca implementar un

nuevo método para la estimación de parámetros (T y S) para ensayos de bombeo en régimen variable sobre acuíferos confinados usando un algoritmo (Levenberg-Marquard) que estima valores en un sistema de ecuaciones no lineales, se pueden analizar grandes volúmenes y en intervalos deseados.

El método propuesto consiste en tomar los parámetros hidrogeológicos como parte de las variables que deben ser encontradas para que el sistema de ecuaciones no lineales se cumpla.

Se hace un ajuste a la función $W(u(t))$ tal que no dependa del tiempo de los parámetros hidrogeológicos (S, T).

$$u_i(S, T) = \frac{Sr^2}{4Tt_i} = \frac{1}{\tau} \frac{r^2}{4t_i} \quad (20a)$$

Para cada instante de tiempo t_i deben existir los parámetros S, T tales que resuelvan el sistema de ecuaciones.

$$s_i - \frac{Q}{4\pi T} W(u_i, \tau) \approx 0 \quad (20b)$$

Entonces para resolver la ecuación (20b), se debe resolver un sistema con 2 incógnitas y enésimas ecuaciones, las cuales dependen del número de datos que se tomen en campo. Con esto se eliminan todas las restricciones de los métodos clásicos para el análisis de ensayos de bombeo en régimen variable.

La forma matemática más simple de resolver este tipo de sistema de ecuaciones no lineales (en el caso del flujo en régimen variable debido a la función de pozo) es aplicar el algoritmo Levenberg–Marquardt (Marquardt, 1963; Levenberg, 1944; More, 1977).

$$\varepsilon_i(\tau) = \sum_i \left(s_i - \frac{Q}{4\pi T} W(u_i, \tau) \right)^2 \quad (21)$$

Donde la función $\varepsilon_i(\tau)$ debe ser minimizada.

El Algoritmo de Levenberg-Marguard.

(Lui, Goyes, & Gélvez, 2014), desarrollaron el software (SSNE) para el análisis de las pruebas de bombeo y determinar así la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento del área de investigación.

El algoritmo de Levenberg–Marquardt (LMA por sus siglas en inglés) usado para resolver problemas que implican sistemas de ecuaciones no lineales. Estos

problemas de minimización surgen especialmente en el ajuste de curvas. (Lui, Goyes, & Gélvez, 2014).

El LMA interpola entre el algoritmo y Gauss-Newton (GNA) y el método de Gradiente Descendente, por esto que el LMA es más robusto que el GNA, lo cual significa que en muchos casos encuentra una solución así, se inicie en un punto muy lejano del mínimo final. El método de Levenberg-Marquard usa una búsqueda direccional que sea solución al sistema de ecuaciones:

$$\left(J(x_k)^T J(x_k) + \lambda_k I \right) d_k = -J(x_k)^T F(x_k) \quad (22)$$

O también, opcional las ecuaciones:

$$\left(J(x_k)^T J(x_k) + \lambda_k \text{diag} \left(J(x_k)^T J(x_k) \right) \right) d_k = -J(x_k)^T F(x_k) \quad (23)$$

Donde el escalar λ_k controla la dirección y magnitud de d_k cuando λ_k es cero, d_k es idéntica a la usada en el método Gauss-Newton. Para una revisión matemática más completa se recomienda la descripción realizada en Marquardt (1963).

Para su aplicación se deben satisfacer las siguientes condiciones:

- El flujo del agua hacia el pozo es en régimen variable, es decir, ni las diferencias del descenso del nivel de agua en los piezómetros son despreciables con el tiempo, ni el gradiente es constante con el tiempo.
- La extracción de agua del almacenamiento produce inmediatamente descenso en la carga hidráulica.
- El diámetro del pozo de bombeo es muy pequeño, es decir, se puede despreciar el almacenamiento en el pozo.

2. METODOLOGÍA

En este apartado se describen los procedimientos utilizados, para la recopilación de información y recolección de datos de campo, procesamiento e interpretación de datos. Así mismo se describe brevemente el equipo y software utilizados durante la investigación.

De manera esquemática se presenta el desarrollo metodológico seguido para la realización del estudio.

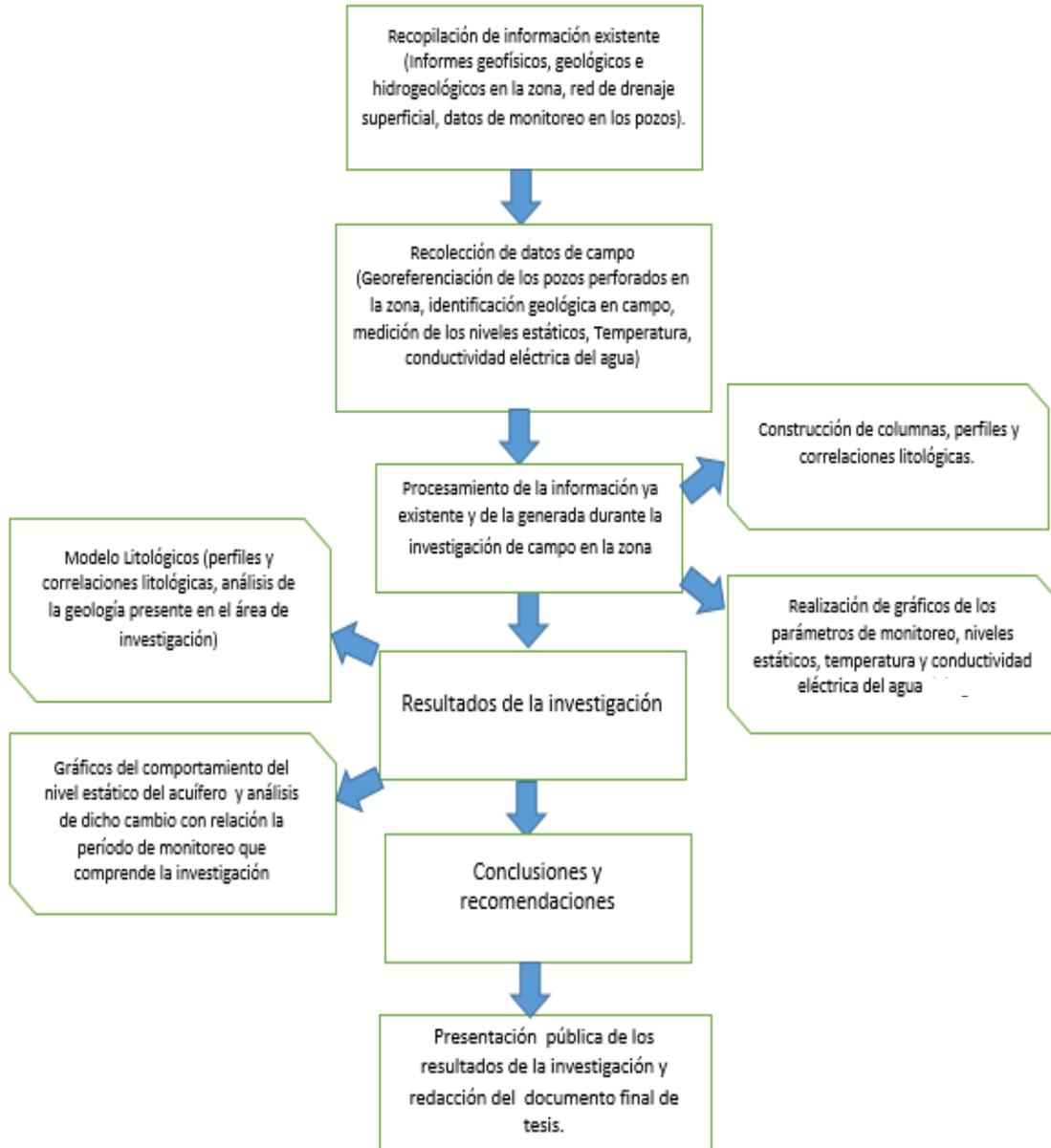


Figura 2. 1: Esquema metodológico de actividades según los objetivos propuestos.

Las actividades se detallan a continuación:

2.1. Recopilación de la información pre-existente.

Es la etapa inicial para realizar la investigación, se debe recopilar la mayor cantidad de datos de los pozos ubicados dentro de la zona de estudio, entre éstos los datos de monitoreo del nivel estático, temperatura y conductividad eléctrica del agua en los pozos. Así también, la descripción de las columnas litológicas de pozos existentes en la zona, registros geofísicos, usos del suelo, mapa de recarga acuífera

(RAS) del proyecto de Fortalecimiento de la Gestión Ambiental de El Salvador (FORGAES), geología de la zona e inventario de fuentes de agua y parámetros hidrogeológicos.

Se realizaron las respectivas solicitudes a la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) de los informes de pozos en la zona, tanto de los pozos perforados con el propósito de la extracción de agua potable para industria y población en general así como también los informes de los pozos de monitoreo en los cuales se desarrolla la medición continua de parámetros físicos (nivel estático, temperatura y conductividad eléctrica del agua).

2.2. Recolección de datos de campo.

Se realizó un reconocimiento geológico de la zona de estudio, identificación y georreferenciación de los pozos perforados, con el objetivo de crear un inventario de pozos tanto de monitoreo como de los de uso poblacional y comercial, Además se realizó la toma de datos en pozos de monitoreo: nivel estático, temperatura y conductividad eléctrica del agua en los pozos.

2.3. Procesamiento de la información tanto litológica como de monitoreo en los pozos del área de estudio.

Para el procesamiento de los datos litológicos se utilizó el software Strater 5 en éste se construyeron las columnas litológicas de los pozos, y hubo casos en los que ya se contaba con una descripción de las columnas litológicas en formato pdf o fotocopias, las cuales se digitalizaron en Excel 2013 para luego utilizarlas en el desarrollo de los perfiles de correlación litológicos.

Realización de correlaciones litológicas y de registros geofísicos.

Se desarrollaron 4 perfiles de correlación litológica y de registros geofísicos. El tipo de correlación que se desarrolló es local, se realizó en secciones estratigráficas distantes, pero dentro de una misma cuenca, se basó en el estudio de los cambios litológicos bruscos y en la presencia de algunos niveles de litologías especiales detectables a simple vista.

Los registros geofísicos que se utilizaron en el desarrollo de la investigación fueron tres: Registros resistivos, Registros de radiación gamma natural y registros de potencial espontaneo. Esta información se proporcionó en formato pdf, por lo cual hubo que digitalizarlos en Excel 2013 para trabajar en las correlaciones.

El proceso de correlación de registros entre pozos se inicia con la selección de un estrato geológico base o de referencia el cual se distingue por ser el más representativo de la zona de interés, puede ser ubicado y proyectado a través de todos los puntos de observación.

Una vez seleccionado el estrato base se eligieron en el inventario de campo, los pozos más representativos y con la información más detallada, esto para una mejor interpretación de la estratigrafía del área y con ellos se orientó la línea de corte o dirección en la cual se hizo la correlación. Esta línea es la representación de un plano vertical (sección), donde se proyectaron las columnas litológicas de los pozos. Luego, en la sección se colocaron con su distancia a escala las curvas o registros elegidos, y se relacionan a partir de la línea de referencia o estrato base. Estas secciones destacan las diferencias en distancia vertical y espesor para las formaciones por encima y por debajo del estrato base o de referencia utilizado.

En cada uno de los perfiles de correlación litológica y geofísica también se ubicaron los miembros geológicos que afloran en superficie y se homogenizaron 3 de los 4 perfiles de correlación con la finalidad de proponer un modelo litológico de la zona.

Luego se procedió al procesamiento de los datos de monitoreo, en esta parte se revisaron las medidas del nivel estático así como de otras variables físicas en los pozos (temperatura y conductividad eléctrica del agua), se contó con un registro de datos para algunos pozos desde el año 2015 y otros más recientes. Se tienen mediciones de los parámetros de nivel estático, temperatura y conductividad eléctrica del agua cada hora éstos se promediaron diariamente y se presentan en gráficos de dispersión con líneas suavizadas desarrollados en Excel 2013, para un mejor análisis. Se identificaron cuáles son los períodos con mayores cambios en los niveles estáticos y cuáles podrían ser los factores que ocasionan esos cambios.

Para clasificar un acuífero es elemental conocer sus parámetros hidrogeológicos como son su transmisividad y coeficiente de almacenamiento, el cálculo de dichos parámetros hidrogeológicos se llevó a cabo en dos herramientas computacionales. El primero es el software SSNE se utiliza en ensayos de bombeo en régimen variable es un código ejecutable desarrollado en MATLAB y permite el cálculo de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento a partir del tiempo y los descensos del nivel freático. La segunda herramienta fue una hoja electrónica desarrollada en Excel de uso libre descargable en el sitio: <https://civilgeeks.com/2016/09/02/hoja-excel-la-evaluacion-pozos-bombeo-aguas-subterranas/>

Se proporcionó los datos de las pruebas de bombeo de los pozos perforados en el área de investigación las cuales se digitalizaron en Excel 2013 para luego realizar el procesamiento en los softwares antes descritos.

Por último se realizó el cálculo de la recarga acuífera a partir de dos métodos: El Método de Variación de Nivel Freático (VNF) y El Método de Recarga Acuífera Subterránea (RAS) del proyecto FORGAES.

Para el cálculo de la recarga por el Método de Variación de Nivel Freático (VNF) se utilizaron 2 de los pozos de monitoreo los cuales fueron el Pozo COBEA y El Pozo Plaza Integración por ser los que presentaban homogeneidad y un comportamiento periódico en sus datos de monitoreo, el coeficiente de almacenamiento utilizado fue de 0.32 tomado de la tabla de (Johnson, 1967) asociado a arenas medias, éste valor fue utilizado debido a que los materiales que afloran en superficie son del miembro S4 el cual está constituido por una secuencia volcánica de piroclástitas ácidas (lapilli, pómez).

En El Método de Recarga Acuífera subterránea (RAS) se utilizó el mapa de recarga acuífera realizado en el año 2005 en el marco del proyecto Fortalecimiento de la Gestión Ambiental de El Salvador (FORGAES).

2.4. Interpretación de resultados.

A partir de los perfiles de correlación y la construcción de un modelo litológico se determinó qué tan homogénea o heterogénea es la distribución de las diferentes capas de materiales litológicos dispuestos en el área de estudio así como también el análisis de la recarga temporal del acuífero con los balances hídricos, Además se determinó el comportamiento temporal del acuífero con los datos de monitoreo y se estimaron los parámetros hidrogeológicos (Trasnmisividad y coeficiente de almacenamiento) del acuífero a través del análisis de las pruebas de bombeo.

2.5. Equipo y software utilizados en el desarrollo de la investigación

Equipo:

Diver

Es un dispositivo que tiene integrado uno o más sensores que miden parámetros físicos del agua, el cual es programable para que lo haga de forma automática según el tiempo que más convenga para los objetivos de la investigación. Normalmente se deja fijo a una profundidad determinada dentro del pozo procurando que nunca quede fuera del nivel agua, los que se utilizaran en esta investigación miden los parámetros de: Profundidad del nivel freático (registra la presión total la cual se le resta la presión atmosférica medida en el sitio dando como resultado la columna de agua que se encuentra por arriba de la profundidad a la que esta fijo el Diver), temperatura y conductividad eléctrica del agua. Los datos se extraen del Diver una vez al mes a través de un computador y luego son graficados a través de un software como Excel.



Figura 2. 2: Equipo utilizada para medición de los parámetros hidrogeológicos (nivel estático, temperatura y conductividad eléctrica del agua) (SNF7304)

Sondas multiparámetro

Es una sonda integrada de varios sensores que mide diferentes parámetros físicos del agua, con capacidad de medir hasta una profundidad de 300 metros, los parámetros que mide son los siguientes: conductividad eléctrica, temperatura, densidad, salinidad, total de sólidos disueltos (TDS), profundidad del agua y columna de agua.



Figura 2. 3: Sonda multiparámetro empleada en la medición de los parámetros hidrogeológicos (nivel estático, temperatura y conductividad eléctrica del agua)

Sonda de Nivel

Es una herramienta económicamente muy accesible la cual permite la medición de niveles en pozos se introduce en el pozo y se toman las lecturas de nivel freático.



Figura 2. 4: Sonda que mide el nivel del agua en los pozos.

Software:

SSNE.

Es un código desarrollado en MATLAB el cual permite a través de datos de entrada de tiempos y descensos en el nivel freático calcular valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento. Usa herramientas matemáticas para realizar el ajuste teniendo en cuenta la función de pozo de forma completa y esto permite el ingreso de grandes volúmenes de datos y en cualquier intervalo, no contempla restricciones de tipo físico.

QGis 2.18.10

Es un software SIG de uso libre, que permite presentar información geográfica, se pueden manejar formatos ráster y vectoriales a través de las bibliotecas GDAL y OGR, así como bases de datos. Algunas de sus características son: Soporte para la extensión espacial de PostgreSQL, PostGIS; Manejo de archivos vectoriales Shapefile, ArcInfo coverages, Mapinfo, GRASS GIS, etc.; Soporte para un importante número de tipos de archivos raster (GRASS GIS, GeoTIFF, TIFF, JPG, etc.). QGIS además permite la integración de plugins desarrollados tanto en C++ como Python, que ayudan a facilitar el análisis y presentación de geodatos (información georreferenciada). Durante esta investigación se utilizó en la elaboración de mapas para la presentación de resultados y el análisis espacial, tal es el caso de la delimitación del área de estudio.

Strater 2005.

Es un software especializado en la realización de columnas litológicas y correlaciones de registros geofísicos, permite presentar modelos del subsuelo para obtener una mejor comprensión de los datos y tomar decisiones informadas en todo momento.

Programas de Office:

Word 2013 es un programa informático orientado al procesamiento de textos. Fue creado por la empresa Microsoft, y viene integrado predeterminadamente en el paquete ofimático denominado Microsoft Office.

Excel 2013 se utiliza como hoja de cálculo, dentro de esta, se pueden realizar operaciones matemáticas y estadísticas, además permite presentar la información de manera gráfica. Permite exportar las tablas a extensiones .csv, txt, .xls, etc.

Power Point 2013 es un programa de presentación desarrollado por la empresa Microsoft para sistemas operativos Windows, macOS y últimamente para

Android y iOS. Viene integrado en el paquete ofimático llamado Microsoft Office como un elemento más, especializado para el desarrollo de presentaciones en distintos campos de la enseñanza, negocios, etc.

3. RESULTADOS.

En ésta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de la información de bases de datos, tanto litológica, geofísica e hidrogeológica y de monitoreo de pozos que ha sido brindada por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), así como también la información generada a partir de las mediciones hechas en campo durante el desarrollo de esta investigación.

3.1. Modelo Litológico del Área de Investigación

Los perfiles de correlación litológica y geofísica mostrados en la Fig. 3.1. Se distribuyeron de la siguiente forma en el área de estudio: el perfil A posee una longitud de 5.8 km con una orientación de SO-NE, el perfil B tiene una longitud de 3.2 km con una orientación de NO-SE, el perfil C con una longitud de 3.8 km tiene una orientación de SO-NE Por último el perfil D posee una longitud de 2.9 km con una orientación de SO-NE.

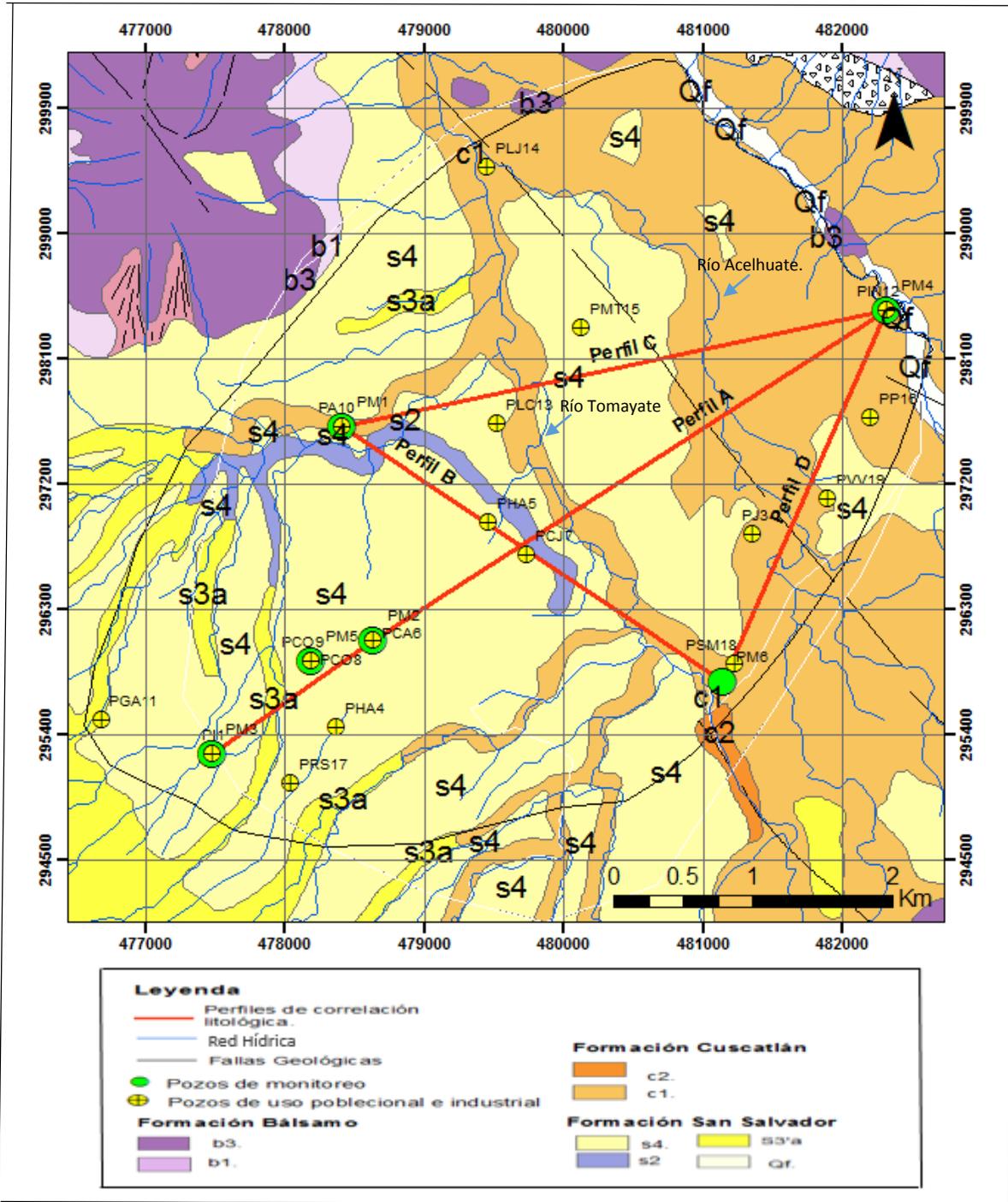
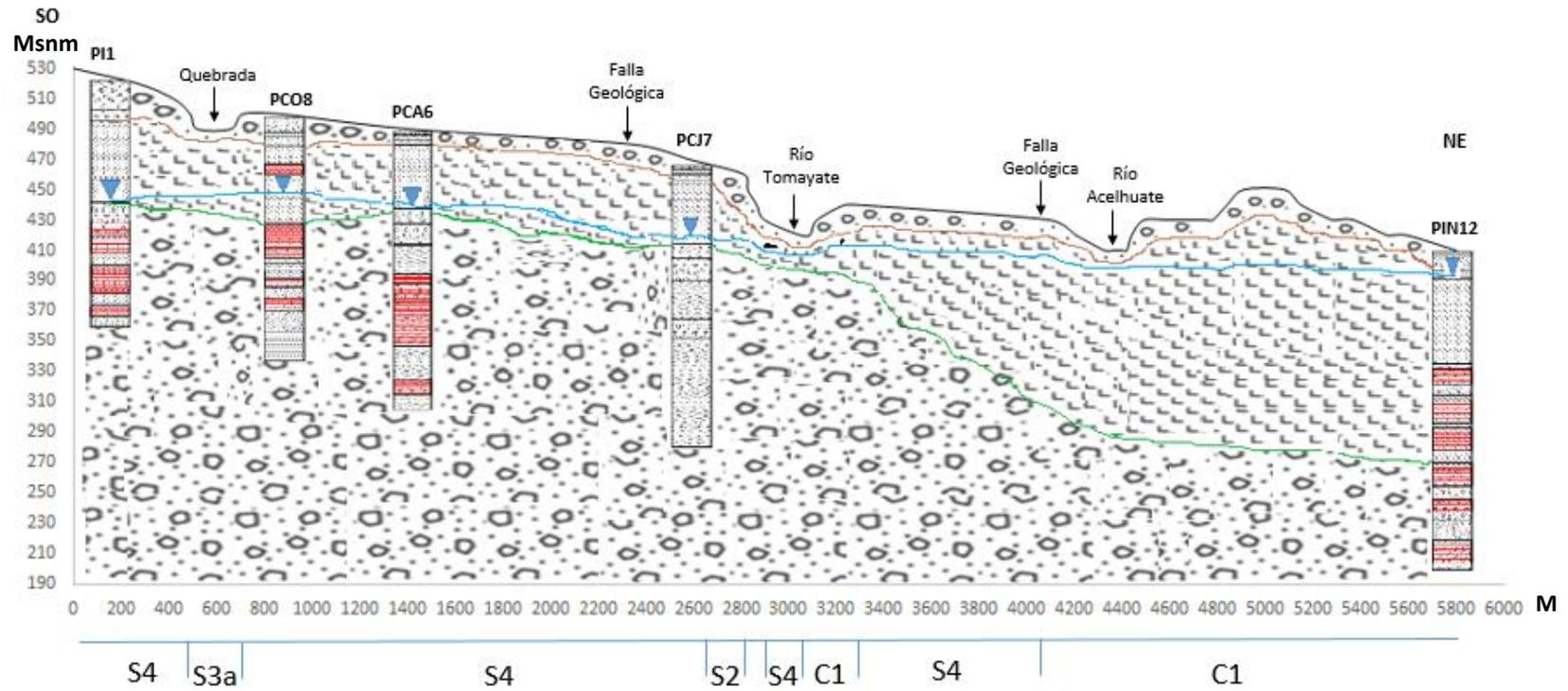


Figura 3. 1: Mapa de ubicación de los perfiles de correlación litológica y geofísica dentro del área de investigación.

Perfil A de correlación litológica y geofísica



Leyenda

-  Piroclásticos y sedimento aluvial
-  Lavas basálticas
-  Rejilla.
-  Nivel freático

Caracterización litológica, geofísica e hidrogeológica del Perfil A.



El primer estrato está constituido por piroclásticos y sedimento aluvial de color gris intermedio con resistividades aparentes de $40 \Omega.m$ a $100 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de $160 mv$ a $187 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a $25 cps$. Tiene una transmisividad asociada de $14.50 m^2/dia$ y un coeficiente de almacenamiento de 0.01 .

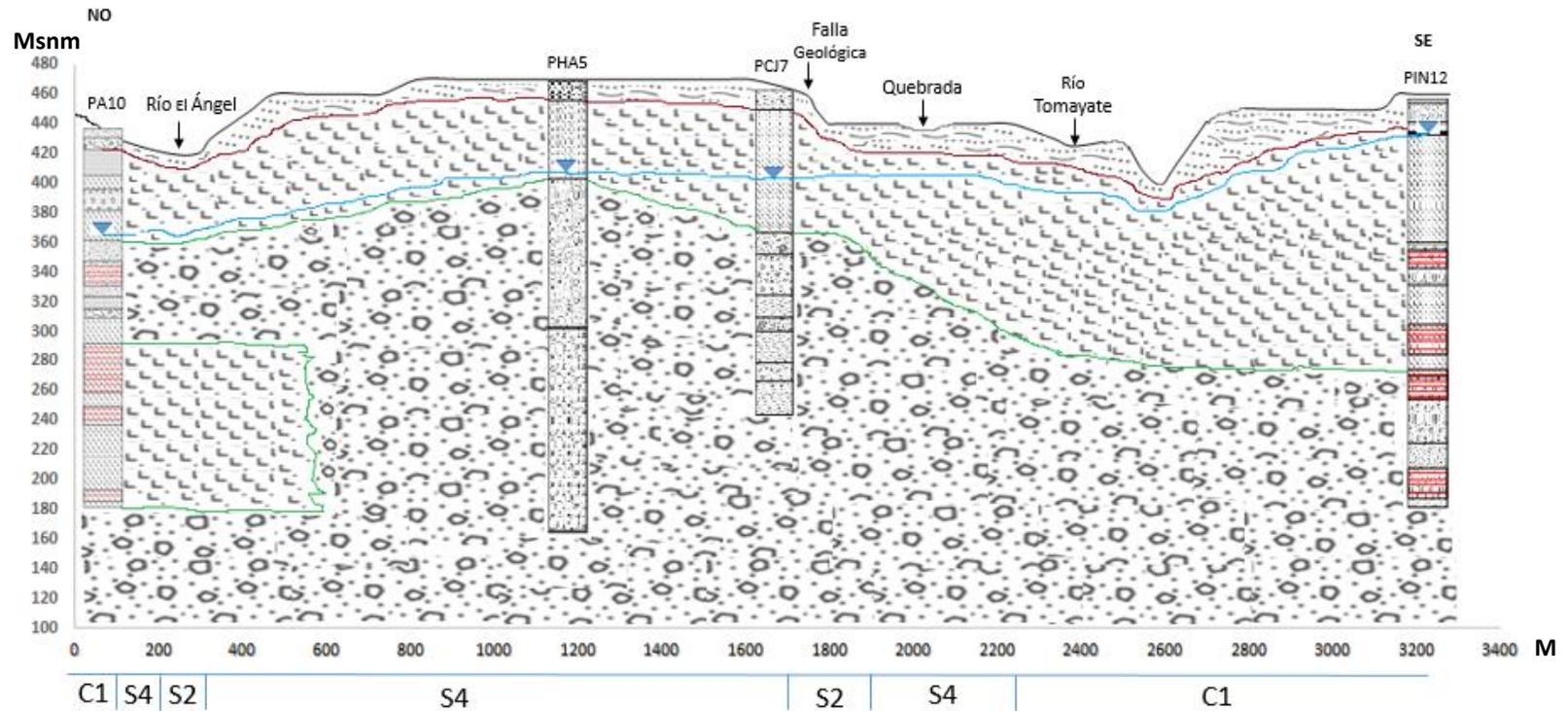


El segundo estrato identificado lo conforman flujos de lavas basálticas color gris oscuro con alto grado de fracturas, resistividades aparentes de $30 \Omega.m$ a $260 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de $172.40 mv$ a $186.40 mv$ y radiación gamma natural con valores entre $10 cps$ y $20 cps$. Su transmisividad inferida es de $6557.76 m^2/dia$ con un coeficiente de almacenamiento de 4.40×10^{-5} .



Ubicación de rejilla en cada uno de los pozos, en las partes con mayor potencial acuífero de las formaciones atravesadas durante la perforación.

Perfil B, correlación litológica y geofísica



Leyenda

- | | | | |
|--|-------------------|--|-----------------------------------|
| | Sedimento aluvial | | Piroclásticos y sedimento aluvial |
| | Rejilla. | | Lavas basálticas |
| | Nivel freático | | |

Caracterización litológica, geofísica e hidrogeológica del Perfil B.



El estrato superior está conformado por sedimento aluvial de color café claro, resistividades aparentes de $30 \Omega.m$ a $100 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de $40 mv$ a $120 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a $20 cps$. La transmisividad de éste estrato es prácticamente nula y no se tiene información de su coeficiente de almacenamiento.



El estrato medio identificado lo constituyen lavas andesitas muy fracturadas de color gris, resistividades aparentes de $30 \Omega.m$ a $260 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de $100 mv$ a $186 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a $20 cps$. Con una transmisividad asociada de $9541.54 m^2/dia$ y un coeficiente de almacenamiento de 3.37×10^{-05}

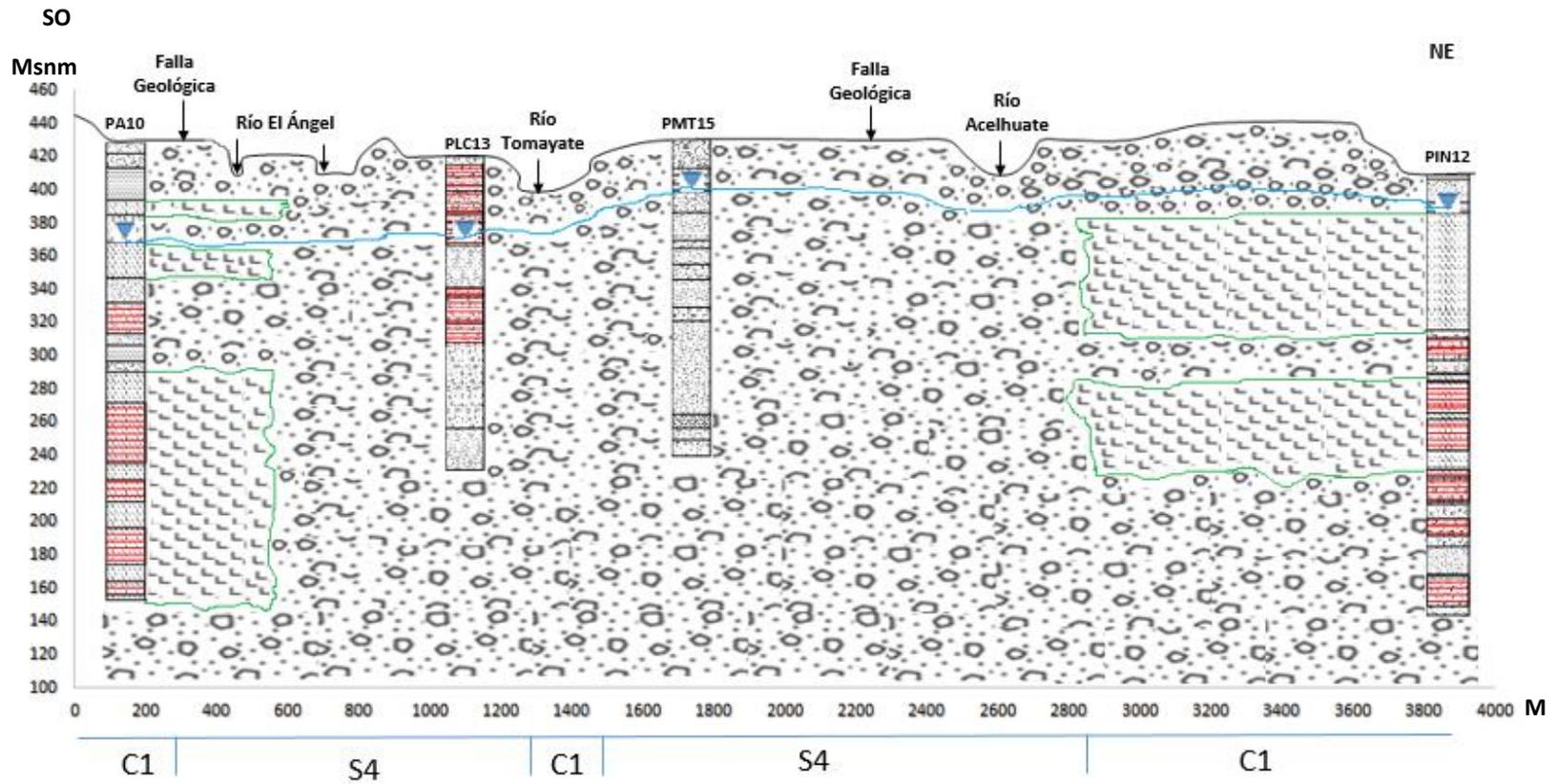


El último estrato es de materiales piroclásticos poco consolidados y sedimento multicromo, resistividades aparentes de $10 \Omega.m$ a $80 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de $40 mv$ a $100 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a $20 cps$. Tiene una transmisividad inferida de $14.52 m^2/dia$ con un coeficiente de almacenamiento 0.0001 .



Ubicación de rejilla en cada uno de los pozos, en las partes con mayor potencial acuífero de las formaciones atravesadas durante la perforación.

Perfil C, correlación litológica y geofísica.



Leyenda

-  Piroclásticos y sedimento aluvial
-  Lavas basálticas
-  Rejilla.
-  Nivel freático

Caracterización litológica, geofísica e hidrogeológica del Perfil C.



El primer estrato lo conforman materiales piroclásticos y sedimentos re TRABAJADOS color blanco amarillento, resistividades aparentes de $85 \Omega \cdot m$ a $160 \Omega \cdot m$, con un potencial espontaneo de $178 mv$ a $270 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a $20 cps$. La transmisividad asociada a éste estrato es de $179.04 m^2/dia$ y su coeficiente de almacenamiento es 0.10 .

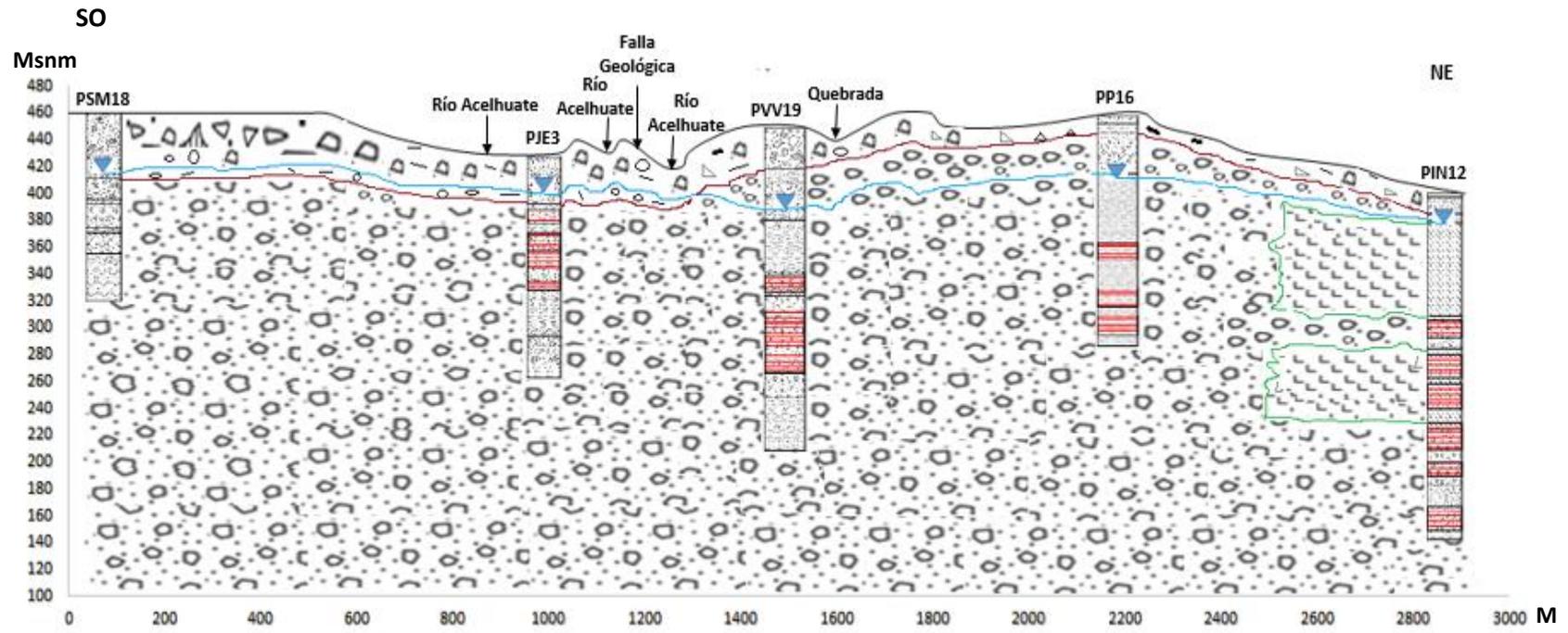


Estrato de lava basáltica color gris oscuro, resistividades aparentes de $30 \Omega \cdot m$ a $260 \Omega \cdot m$, con un potencial espontaneo de $120 mv$ a $186 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a $20 cps$. El valor de Transmisividad inferida es de $9541.54 m^2/dia$ con un coeficiente de almacenamiento de 4.40×10^{-5} .



Ubicación de rejilla en cada uno de los pozos, en las partes con mayor potencial acuífero de las formaciones atravesadas durante la perforación.

Perfil D, correlación litológica y geofísica



Leyenda

- | | | | |
|---|-----------------------------------|---|----------------|
|  | Toba aglomerada |  | Rejilla. |
|  | Piroclásticos y sedimento aluvial |  | Nivel freático |
|  | Lavas basálticas | | |

Caracterización litológica, geofísica e hidrogeológica del Perfil D.



El primer estrato está constituido por tobas aglomeradas de color gris oscuro, resistividades aparentes de $50 \Omega.m$ a $100 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de $160 mv$ a $187 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a $25 cps$. No se tiene información sobre su valor de transmisividad asociada ni de su coeficiente de almacenamiento.



El segundo estrato identificado lo conforman piroclásticos y sedimentos color blanco amarillento, resistividades aparentes de $40 \Omega.m$ a $60 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de $100 mv$ a $150 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a $25 cps$. Tiene una transmisividad asociada de $27.4 m^2/dia$ y un coeficiente de almacenamiento de 0.1 .



El tercer y último estrato identificado es de lavas basálticas color gris oscuro altamente fracturada con resistividad aparente de $30 \Omega.m$ a $260 \Omega.m$, un potencial espontaneo de $173 mv$ a $186 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a $20 cps$. Su transmisividad inferida es de $6557.76 m^2/dia$ con un coeficiente de almacenamiento asociado de 4.40×10^{-5} .



Ubicación de rejilla en cada uno de los pozos, en las partes con mayor potencial acuífero de las formaciones atravesadas durante la perforación.

3.2. Discusión de los resultados obtenidos en los perfiles de correlación litológica y geofísica.

Al homogenizar la información litológica y geofísica y representarla en perfiles 2D se pueden identificar tres estratos geológicos, la parte superior se constituye de sedimentos aluviales, cenizas y piroclásticos, se extiende desde los 530 msnm hasta 490 msnm, con un espesor de 60 msnm aproximadamente, aunque no se extiende de forma homogénea en toda el área de correlación, tiene resistividades aparentes de $10 \Omega.m$ a $100 \Omega.m$, con un potencial espontáneo de $160 mv$ a $187 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a $25 cps$. Por su textura se le asocia una porosidad alta y permeabilidad media y cumple la función de zona no saturada, La transmisividad media del acuífero para ésta capa es de $14.52 m^2/dia$ con un valor de coeficiente de almacenamiento específico promedio de 0.32 considerándose en ésta zona un acuífero libre.

La segunda capa o estrato geológico está constituida por flujos de lavas basálticas y andesíticas altamente fracturada, además de piroclásticos poco consolidados, ésta capa posee resistividades aparentes de $30 \Omega.m$ a $260 \Omega.m$, con un potencial espontáneo de $172.40 mv$ a $186.40 mv$ y radiación gamma naturales con un rango de $10 cps$ a $20 cps$. Es la capa identificada con mayor potencial acuífero, se extiende desde 490 msnm hasta los 290 msnm, con un espesor de 200 msnm, de igual forma no se extiende homogéneamente en toda el área de correlación, en éste estrato se desarrolla el acuífero principal y de mayor producción. Su transmisividad asociada es de $9541.54 m^2/dia$ con un coeficiente de almacenamiento de 4.40×10^{-5} . Los pozos que han interceptado las lavas fracturadas son los de mayor producción y de mayor transmisividad.

El tercer estrato geológico identificado va desde 290 msnm hasta 180 msnm, con un espesor de 110 msnm (su espesor es variable), está constituido por piroclásticos y sedimentos retrabajados color blanco amarillento además de tobas aglomeradas color gris oscuro con resistividades aparentes de $50 \Omega.m$ a $100 \Omega.m$ y un potencial espontáneo de $100 mv$ a $150 mv$ con radiación gamma naturales con un rango de $10 cps$ a $20 cps$. La transmisividad asociada a éste estrato es de $179.04 m^2/dia$ y su coeficiente de almacenamiento es 0.010.

Al realizar el análisis de los registros geofísicos se tiene que en la zona no existen capas con importante contenido de arcilla que confinen el acuífero ya que los valores de los registros geofísicos muestran rangos de radiación gamma natural de $10 cps$ a $25 cps$ y de igual forma el registro de resistividad y potencial espontáneo no miden valores que podrían asociarse y ser representativos para materiales arcillosos, Según (Francisco, 1987).

La clasificación de los acuíferos que hace Custodio y Llamas, en 1983. Con respecto a la transmisividad, muestra que el sistema acuífero de la zona de estudio se clasifica de pobre a excelente según los valores de transmisividad obtenidos en el acuífero.

Revisando los perfiles de correlación litológica y geofísica en el área de estudio se puede inferir que los ríos en la zona aportan en alguna medida al acuífero en su recarga, esto debido a que el nivel freático se encuentra a una altura por debajo del nivel del fondo de los ríos es por ésta razón que es necesario desarrollar mecanismos para que las aguas superficiales reciban una menor contaminación o que no se continúen contaminando, ya que podrían representar un peligro para las aguas subterráneas ya que las corrientes de agua superficiales aportan al acuífero y podrían contaminarlo.

3.3. Comportamiento temporal de los parámetros medidos en el acuífero (nivel estático, temperatura y conductividad eléctrica del agua).

En éste apartado se presentan los gráficos de los parámetros medidos durante el monitoreo de pozos, se utilizaron 6 pozos de monitoreo de los cuales nada más se seleccionaron 4, debido a que presentan un comportamiento periódico y estable en sus valores, por ésta razón son los más representativos para el estudio.

A continuación se detallan los resultados para cada uno de los 4 pozos seleccionados:

3.3.1. Pozo de monitoreo CDD El Ángel (PM2)

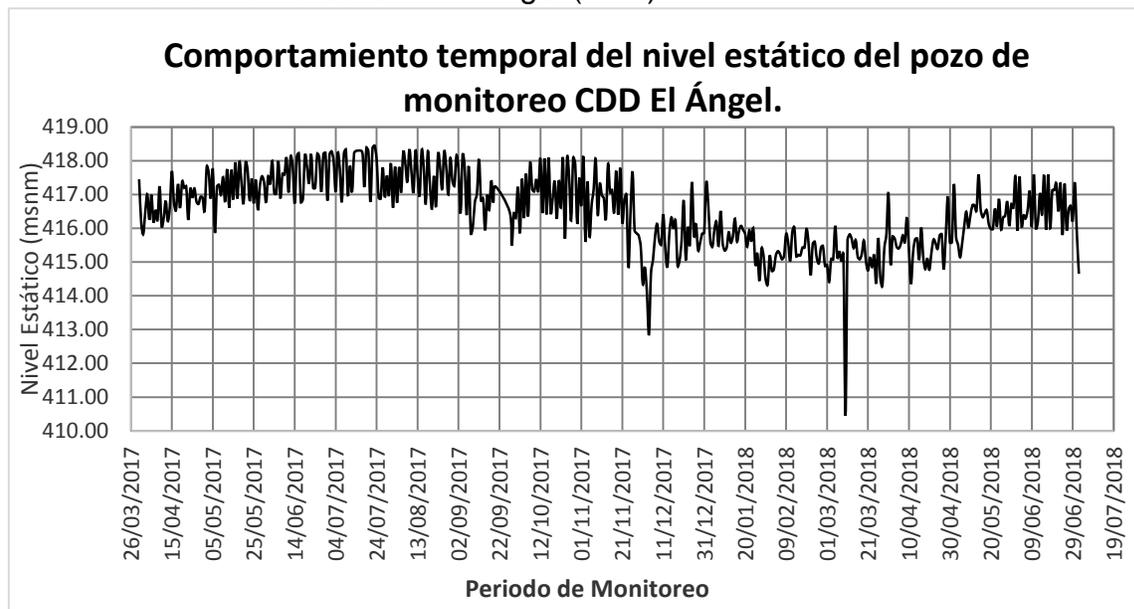


Figura 3. 2: Monitoreo de nivel estático pozo CDD El Ángel.

La Fig. 3.2. Presenta la variación del nivel estático para un periodo de monitoreo desde marzo de 2017 hasta junio de 2018, éste oscila entre un máximo de 418.45 msnm a un mínimo de 414.13 msnm, es decir, la diferencia es de 4.32 m en dicho período; los valores menores se obtuvieron en época seca y los valores mayores en época lluviosa, en el grafico también se muestra que la recuperación del nivel freático en junio de 2017 a junio de 2018 tiene una diferencia de 0.52 metros.

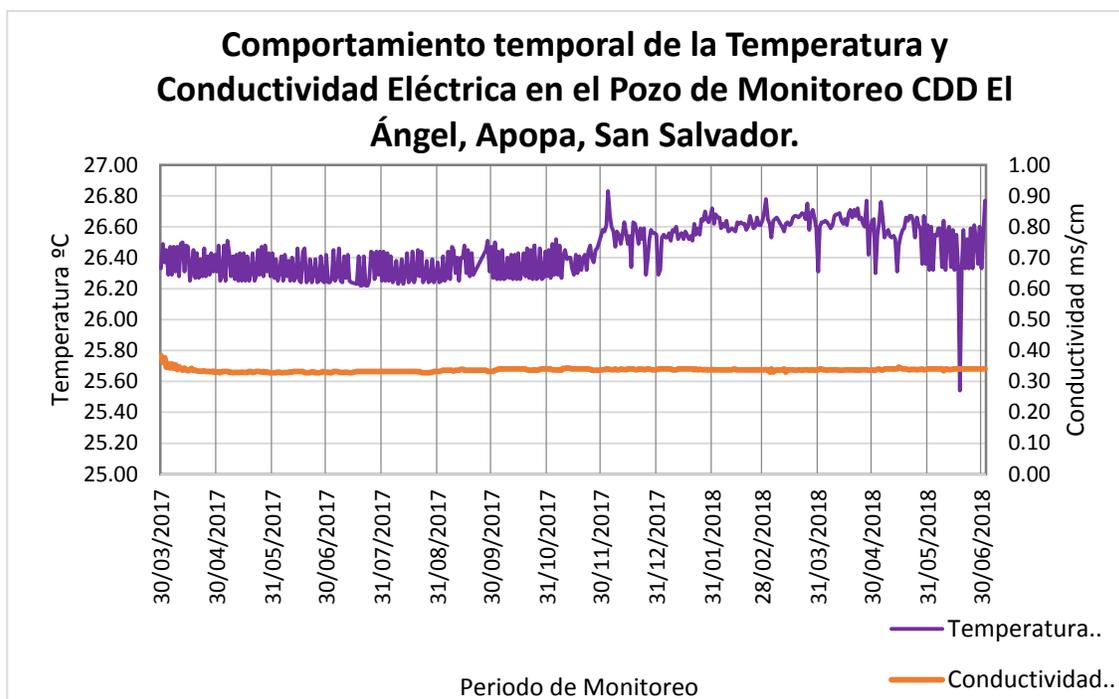


Figura 3. 3: Monitoreo de Temperatura y Conductividad eléctrica del agua, pozo CDD de El ángel

La Fig. 3.3, muestra el monitoreo de temperatura y conductividad eléctrica del agua tienen valores entre 0.32 ms/cm a 0.38 ms/cm para la conductividad la variación es mínima 0.06 ms/cm , además se aprecia en el gráfico que la conductividad de junio de 2017 a junio de 2018 tiene una diferencia de 0.01 ms/cm mientras que la temperatura varía en un rango de 26.22 °C a 26.78 °C ha tenido una variación de 0.56 °C en el periodo de monitoreo, se observa además que de junio de 2017 a junio de 2018 la temperatura tiene una diferencia de 0.35 °C.

3.3.2. Pozo de monitoreo Plaza Integración (PM3).

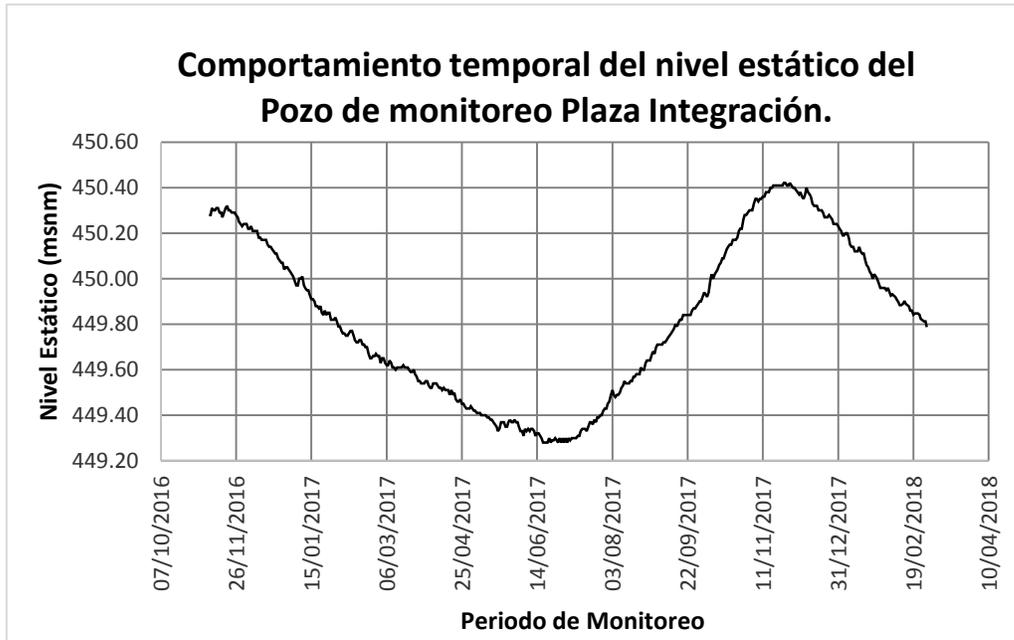


Figura 3. 4: Monitoreo de nivel estático pozo Plaza Integración

En el gráfico de la Fig. 3.4, se presenta la variación del nivel estático para un periodo de monitoreo de noviembre de 2016 hasta febrero de 2018, éste oscila entre un máximo de 450.42 msnm a un mínimo de 449.28 msnm, es decir, la variación es de 1.14 m en el periodo de registro; los valores menores se registraron en el período seco y los valores mayores en época lluviosa, de noviembre de 2016 a noviembre de 2017 existe una diferencia en el nivel freático de 0.01 metros.

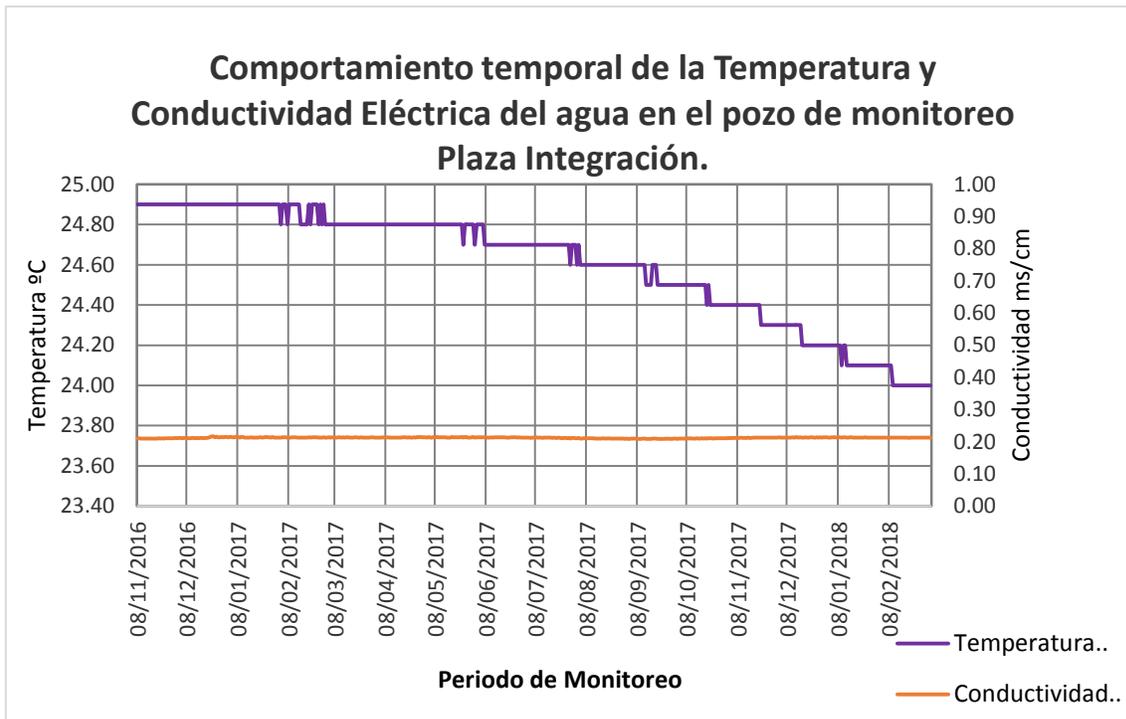


Figura 3. 5: Monitoreo de Temperatura y Conductividad eléctrica del agua, pozo Plaza Integración.

En la Fig. 3.5, se muestra el monitoreo de temperatura y conductividad eléctrica del agua, los valores varían entre 0.20 *ms/cm* a 0.21 *ms/cm* para la conductividad eléctrica el cambio es mínimo de 0.01 *ms/cm*, mientras que la temperatura varía en un rango de 24 °C a 24.90 °C ha tenido una variación de 0.9 °C en periodo de registro y se observa que de noviembre de 2016 a noviembre de 2017 ha tenido una diferencia de 0.5 °C.

3.3.3. Pozo de monitoreo INSINCA (PM4)

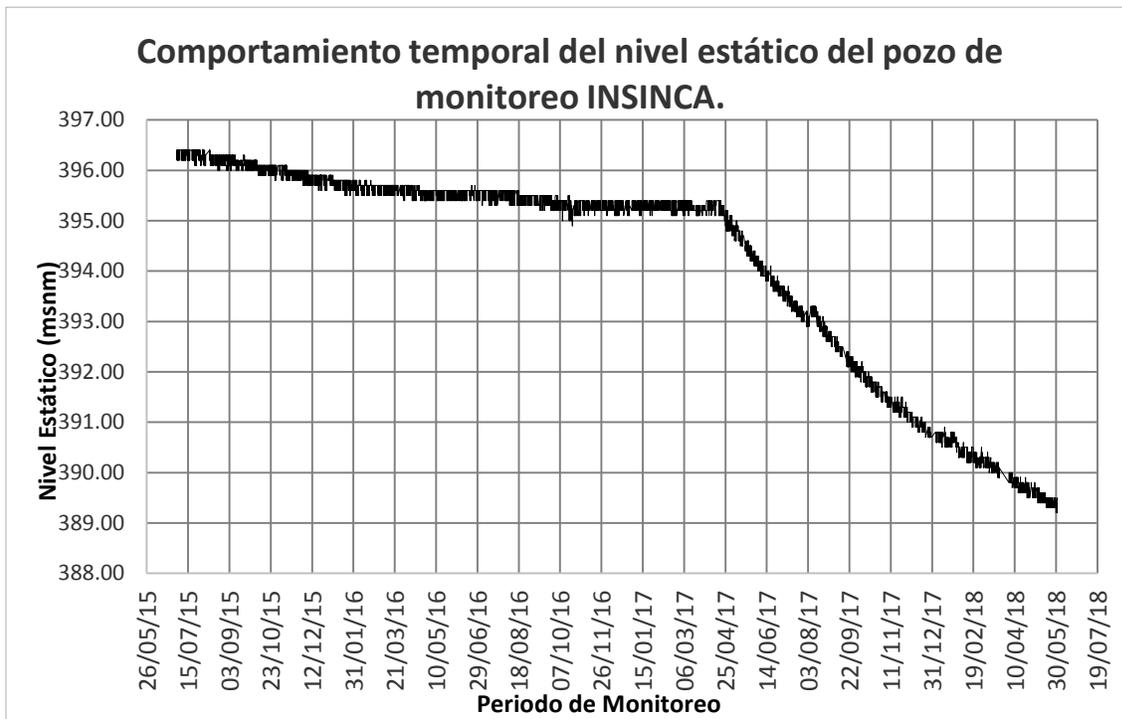


Figura 3. 6: Monitoreo de nivel estático pozo INSINCA.

En el gráfico de la Fig. 3.6, se presenta la variación del nivel estático para el periodo de registro que va de julio de 2015 hasta mayo de 2018, éste oscila entre un máximo de 396.4 msnm a un mínimo de 389.35 msnm, es decir, la diferencia es de 7.05 m para el periodo de registro; los valores menores se registraron en época seca y los valores mayores en el periodo lluvioso.

La figura también refleja que los descensos sufridos a partir del mes de abril del 2017 coinciden con el inicio de explotación de un nuevo pozo por parte de ANDA, que está localizado a menos de 200 metros del pozo de monitoreo.

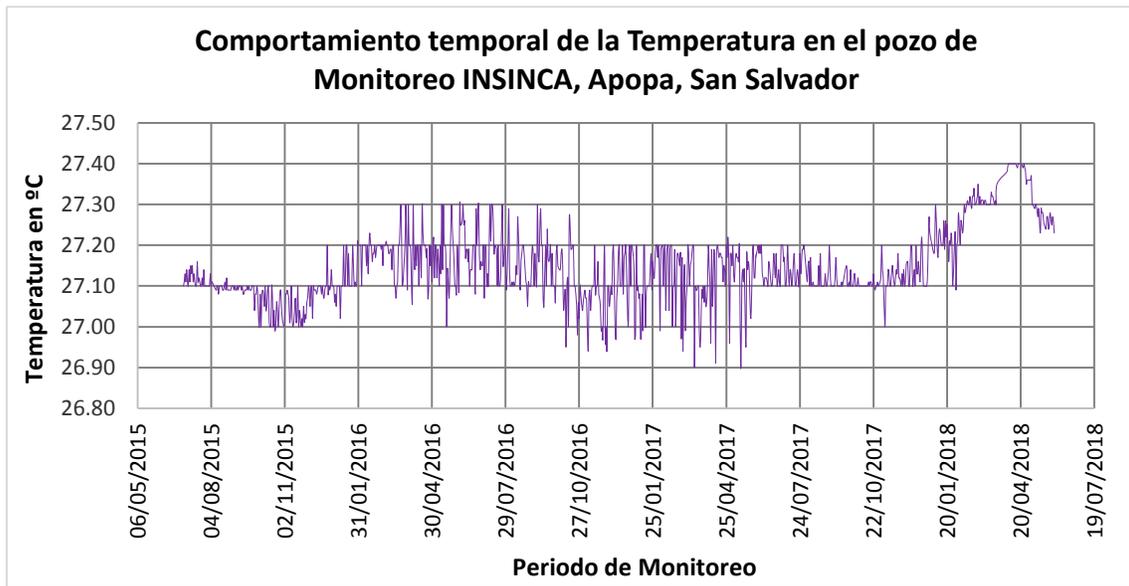


Figura 3. 7: Monitoreo de Temperatura del agua, pozo INSINCA.

En la Fig. 3.7, se muestra el monitoreo de la temperatura del agua ésta varía en un rango de 26.9 °C a 27.4 °C, ha tenido una variación de 0.5 °C en el período de registro.

3.3.4. Pozo de monitoreo COBEA (PM5)

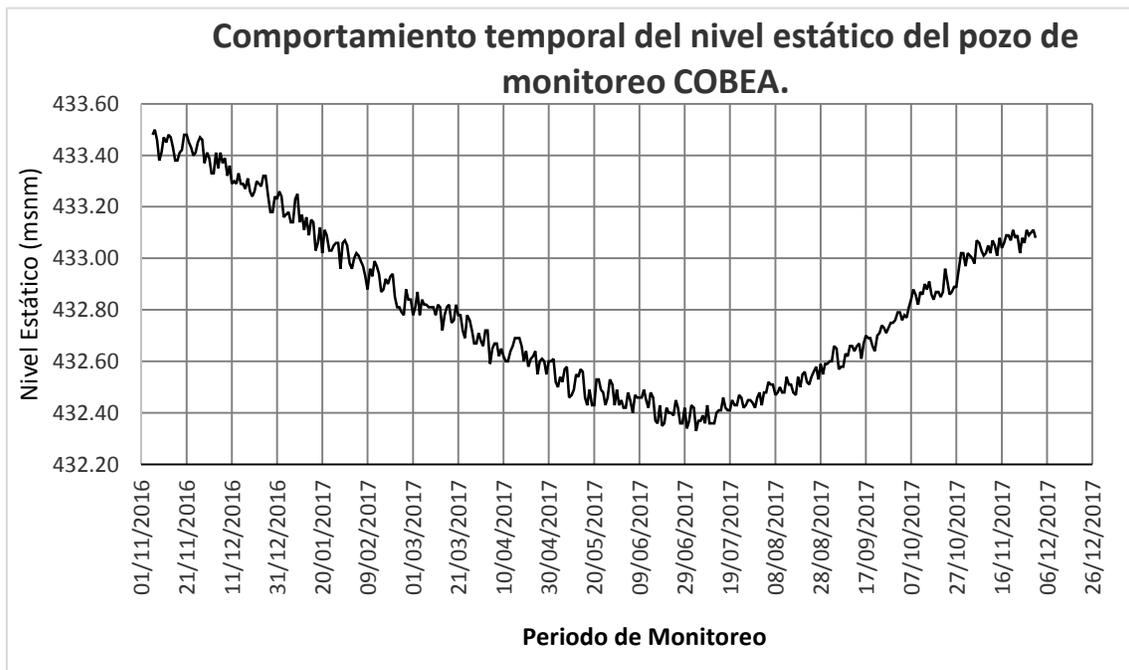


Figura 3. 8: Monitoreo de nivel estático pozo COBEA.

La Fig. 3.8, presenta la variación del nivel estático para el periodo de registro desde el noviembre de 2016 hasta el diciembre de 2017, éste oscila entre un máximo de 433.5 msnm a un mínimo de 432.33 msnm, es decir, la variación es de 1.17 m en el periodo de registro, en el gráfico se observa además que de noviembre de 2016 a noviembre de 2017 hay una diferencia de 0.34 metros en los valores de nivel freático para el periodo que comprende la investigación.

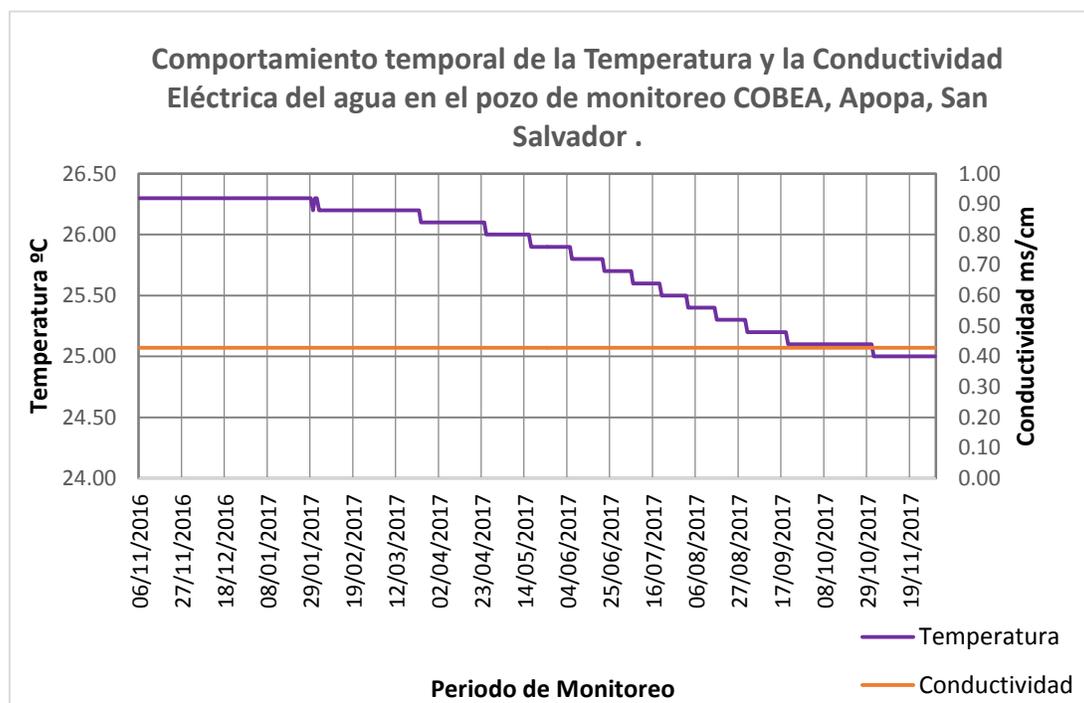


Figura 3. 9: Monitoreo de Temperatura y Conductividad eléctrica del agua, pozo COBEA.

En la Fig. 3.9, se muestra el monitoreo de temperatura y conductividad eléctrica del agua los valores varían entre 0.42 ms/cm a 0.45 ms/cm para la conductividad la variación es mínima 0.03 ms/cm , mientras que la temperatura varía en un rango de 25 °C a 26.30 °C ha tenido una variación de 1.3 °C en el periodo de registro.

Tabla 3. 1: Resumen de la variación entre los valores máximos y mínimos medidos de los parámetros en el periodo de registro de los pozos de monitoreo.

ID	Nombre del Pozo	Variación del Nivel Estático (m)	Variación de la Temperatura del Agua (°C)	Variación de la Conductividad Eléctrica del Agua (ms/cm)
PM2	CDD El Ángel	4.32	0.56	0.06
PM3	Plaza Integración	1.14	0.9	0.01
PM4	INSINCA 7	7.05	0.5	No hay dato
PM5	COBEA 1	1.7	1.3	0.03

La variación temporal de los niveles estáticos, temperatura y conductividad eléctrica del agua medida en los pozos de monitoreo se presenta en la tabla 3.1.

Apartir de la tabla anterior se obtiene que el desenso menor en los pozos de monitoreo es de 1.14 metros y el mayor es de 4.32 metros, siendo el desenso medio de 2.38 metros sin tomar en cuenta el pozo INSICA ya que se tomó como un caso particular. Ésta variación de niveles se asocia a: Bajas precipitaciones, impermeabilización del suelo y explotación del acuífero. Es importante aclarar que dichas variaciones se midieron entre los valores máximos y mínimos, no son datos de reducción del nivel freático en la zona si no de como varía el nivel freático en el tiempo de registro que comprende la investigación.

3.4. Impermeabilización del suelo en el área de investigación.

Con el paso del tiempo el área de investigación ha sido objeto de cambios tales como la impermeabilización y usos del suelo. A continuación se muestra una secuencia de imágenes tomadas de Google Earth a partir del año 1970 hasta el año 2018 donde se evidencian los cambios y como se ha modificado el uso del suelo con el paso de los años, ocasionando una impermeabilización bastante considerable en la zona de estudio.

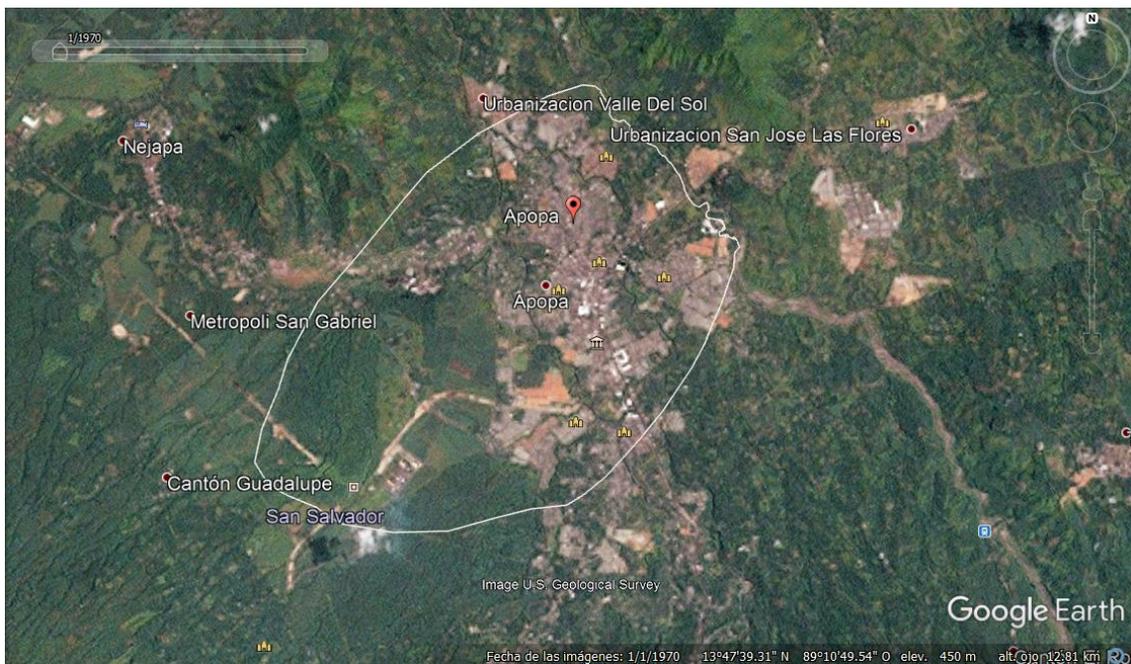


Figura 3. 10: Área de investigación año 1970.

En la Fig 3.10, Se observa que para el año 1970 había poca densidad poblacional en el área de estudio, menos del 50% del suelo estaba impermeabilizado y se aprecia mucha vegetación en la zona.

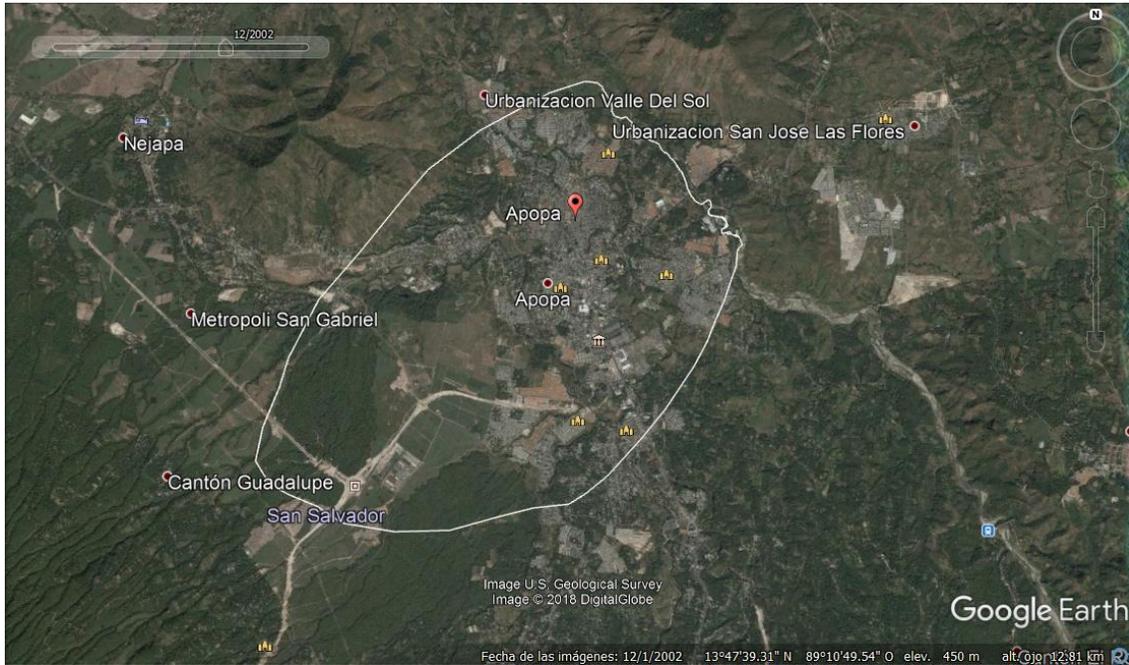


Figura 3. 11: Área de investigación año 2002.

En la Fig 3.11, Se muestra que para el año 2002 había mayor densidad poblacional en el área de estudio que en la figura anterior, más del 50% del suelo está impermeabilizado, se observa poca vegetación y nuevas calles en la zona.

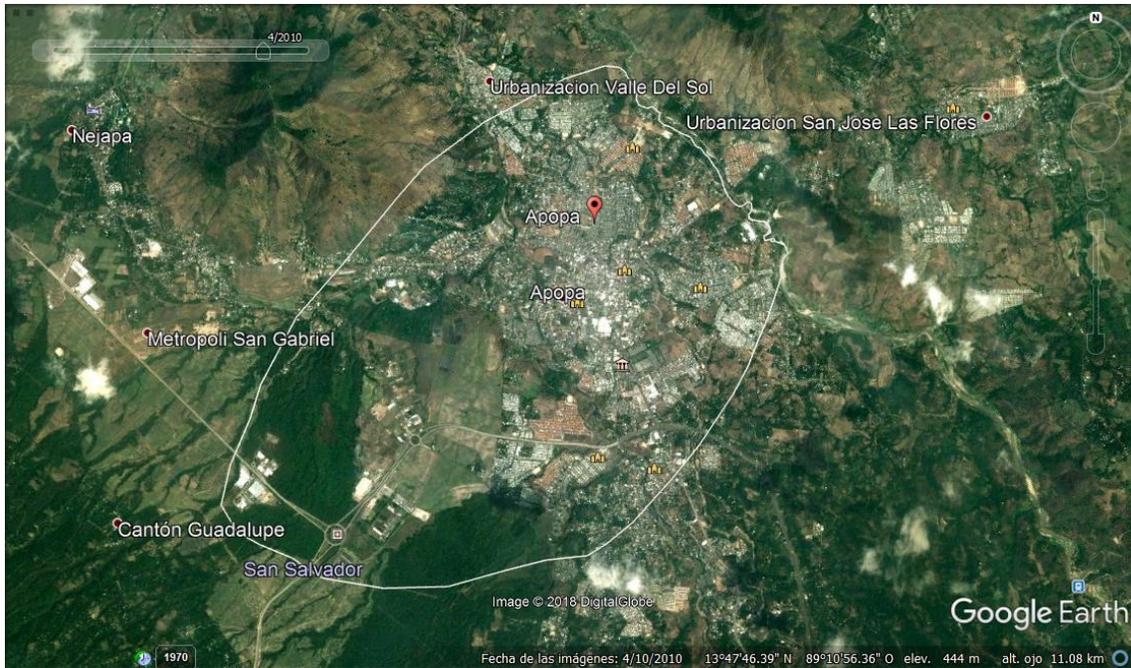


Figura 3. 12: Área de investigación año 2010.

La Fig 3.12, Se observa que la densidad poblacional para el año 2010 en el área de estudio está en aumento, más del 60% del suelo está impermeabilizado, se aprecia muy poca vegetación, nuevas calles e industrias en la zona estudio.

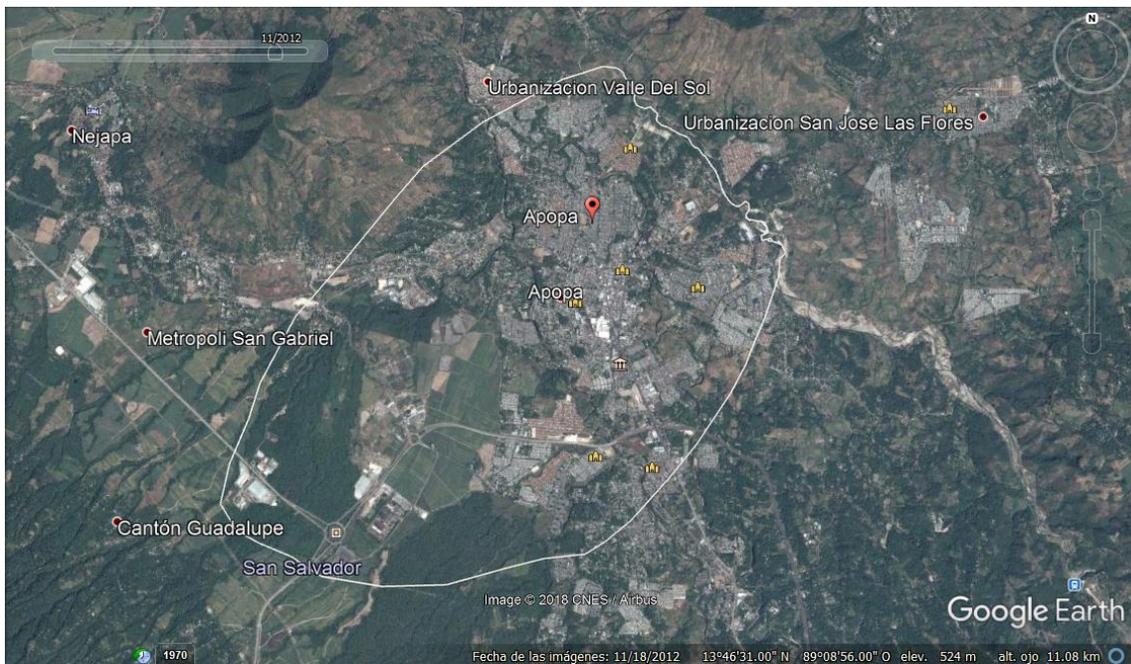


Figura 3. 13: Área de investigación año 2012.

En la Fig 3.13, se muestra que la densidad poblacional para el año 2012 en el área de estudio ha ido en aumento, más del 65% del suelo está impermeabilizado, se aprecia muy poca vegetación y nuevas industrias en el área de investigación.

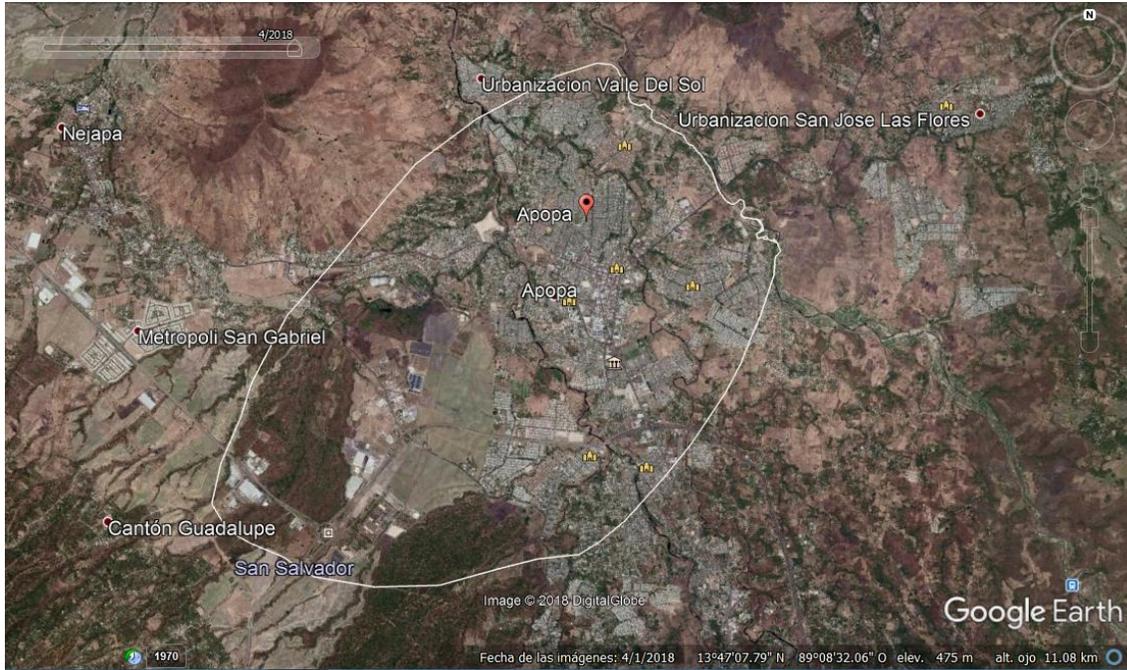


Figura 3. 14: Área de investigación año 2018.

La Fig 3.14, presenta que la densidad poblacional para el año 2018 en el área de estudio aumentó, más del 75% del suelo está impermeabilizado, la vegetación presente en el área es escasa y existen más zonas de construcción de viviendas e industrias.

Desde el año 1970 hasta el año 2018 podemos observar los cambios en el uso del suelo con el tiempo, llegando a tener hasta un 75% del total del área impermeabilizada, ya sea por industrias, carreteras, centros comerciales, viviendas etc. Está ocasionando efectos negativos en el desarrollo del ciclo hidrológico, debido a que la infiltración se ve reducida minimizándose la recarga acuífera y aumentando la escorrentía superficial; además la retención es menor debido a que la zona de área boscosa es mínima. Todos estos aspectos están influyendo negativamente en la recarga acuífera.

3.5. Régimen de precipitaciones anuales en El Salvador

A continuación en la Fig. 3.15, se presentan las precipitaciones anuales desde el año 2012 hasta el 2017.

Año	Precipitación (mm/año)
2017	1323
2016	1367
2015	1505
2014	1782
2013	1467
2012	1197

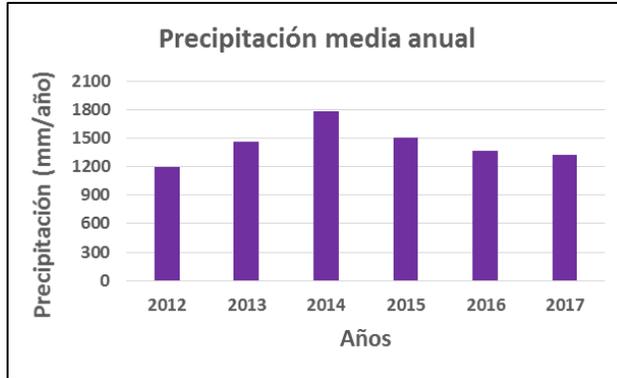


Figura 3. 15: Resumen de lluvias para el municipio de Apopa, Según El MARN.

Según el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), los promedios de lluvias anuales han cambiado en los últimos años en el municipio de Apopa, esto genera diferencias en la recarga hídrica, pues al ser los años más secos y la demanda de agua igual o mayor, los niveles freáticos de los acuíferos podrían tender a disminuir.

3.6. Cálculo de la Recarga potencial a través de la variación del nivel freático (VNF).

La Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANANDA) proporcionó la información de la variación del nivel freático en pozos de monitoreo, de los cuales se han seleccionado solamente 2 para el cálculo de la recarga potencial del acuífero, esto se debe a que dichos pozos poseen las mejores condiciones para la aplicación del método, en el período que comprende el análisis.

Los pozos utilizados para el desarrollo del trabajo fueron COBEA y Plaza Integración los cuales se muestran en la Fig 3.16.

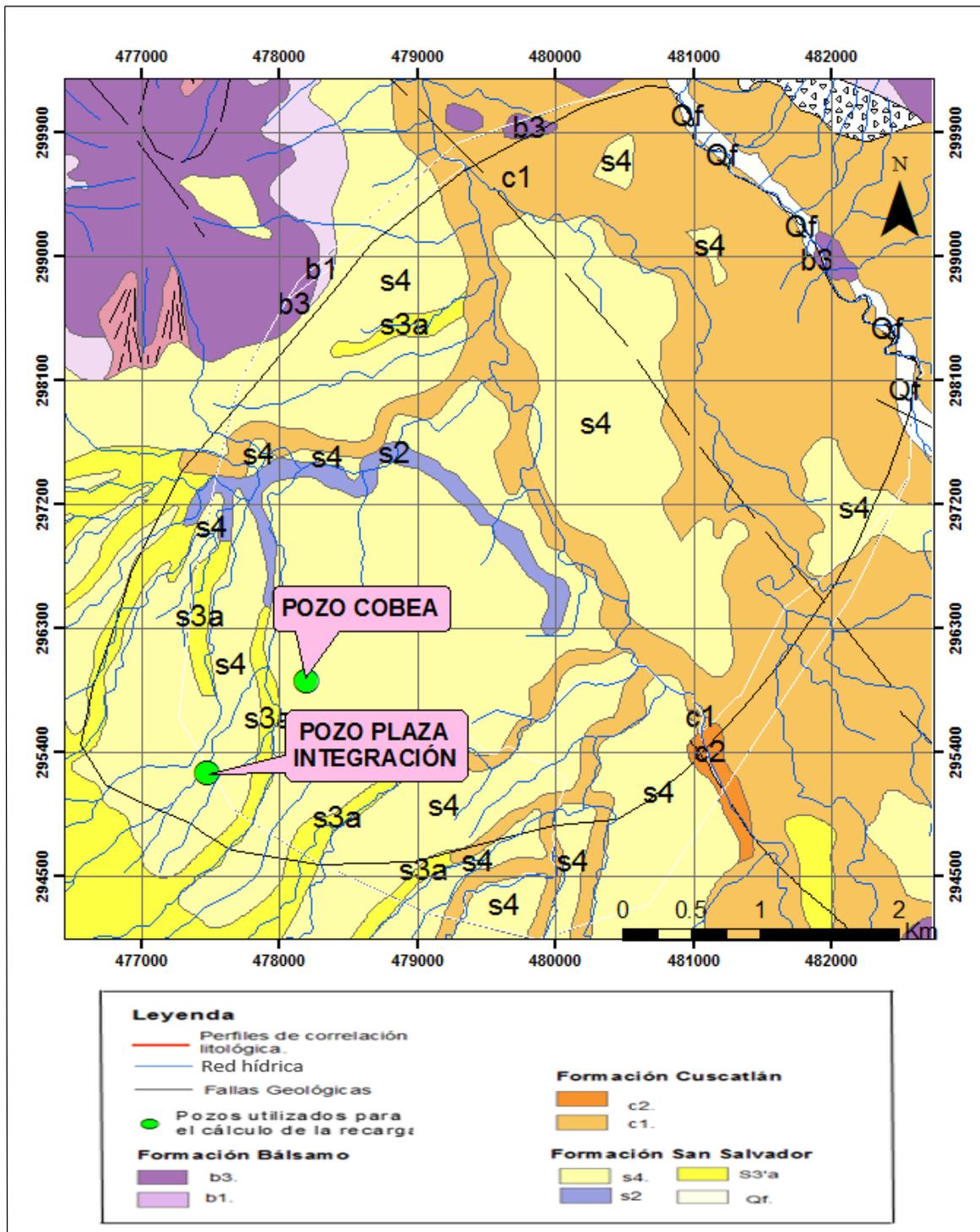


Figura 3. 16: Mapa de ubicación de los pozos de monitoreo utilizados para el cálculo de la recarga acuífera.

Criterios para la selección de los pozos:

- Presentan un comportamiento periódico
- Tienen un registro de datos mayor a un año
- Homogeneidad en los datos (no hay datos anómalos)
- Están ubicados en el mismo miembro geológico
- La variación del nivel freático es similar

Para el cálculo de la recarga con el método (VNF) es muy importante conocer el almacenamiento específico. Los autores (Healy & Cook, 2002) citan Meinzer (1923) quien definió el almacenamiento específico (S_y) como la proporción del volumen de agua que, después de ser saturada, producirá por efecto de gravedad, respecto a su propio volumen. Normalmente se define de la siguiente manera:

$$S_y = \varphi - S_r \quad (12)$$

Donde:

φ : Se refiere a la porosidad

S_r : Es la retención específica (volumen de agua retenido por una roca, por unidad de volumen de roca).

En su artículo (Healy & Cook, 2002) presentan un resumen estadístico de los resultados de 17 estudios compilados por Johnson (1967) (ver Tabla 3.2). Basados en esto se asignará un valor de almacenamiento específico para el cálculo de la recarga por el método de la variación del nivel freático.

Tabla 3. 2: Resumen de almacenamiento específico (specific yield) por textura para 17 estudios (Johnson, 1967).

Textura	Sy promedio	Coefficiente de variación %	Sy mínimo	Sy máximo	Numero de mediciones
Arcillas	0.02	59	0.0	0.05	15
Limos	0.08	60	0.03	0.19	16
Arcillas y arenas	0.07	44	0.03	0.12	12
Arenas finas	0.21	32	0.10	0.28	17
Arenas medianas	0.26	18	0.15	0.32	17
Arenas gruesas	0.27	18	0.20	0.35	17
Arena gravosa	0.25	21	0.20	0.35	15
Gravas finas	0.25	18	0.21	0.35	17
Gravas medias	0.23	14	0.13	0.26	14
Gravas gruesas	0.22	20	0.12	0.26	13

El dato del almacenamiento específico es necesario para la estimación de la recarga por el método de la variación del nivel freático. Existen diversas maneras de calcularlo, sin embargo, para este caso se utilizaron valores de la Tabla 3.4, asumiendo que el acuífero, está compuesto por materiales con textura de arenas

medias (S_y , máximo de 0.32), basados en los perfiles de correlación de la zona, ambos pozos están ubicados en el mismo miembro geológico S4 secuencia de piroclastos, lapilli, pómez y ceniza proveniente de la caldera volcánica de Ilopango.

A) Pozo COBEA

Con base a los datos de la variación del nivel freático, este pozo posee una profundidad del nivel freático promedio de 53.34 metros, y se ubica a una elevación aproximada de 495 msnm, por lo que se puede decir que el nivel freático promedio se encuentra en los 441.66 m.

En la Fig. 3.17 se muestra el gráfico de la serie de datos de la variación del nivel freático en el pozo COBEA.

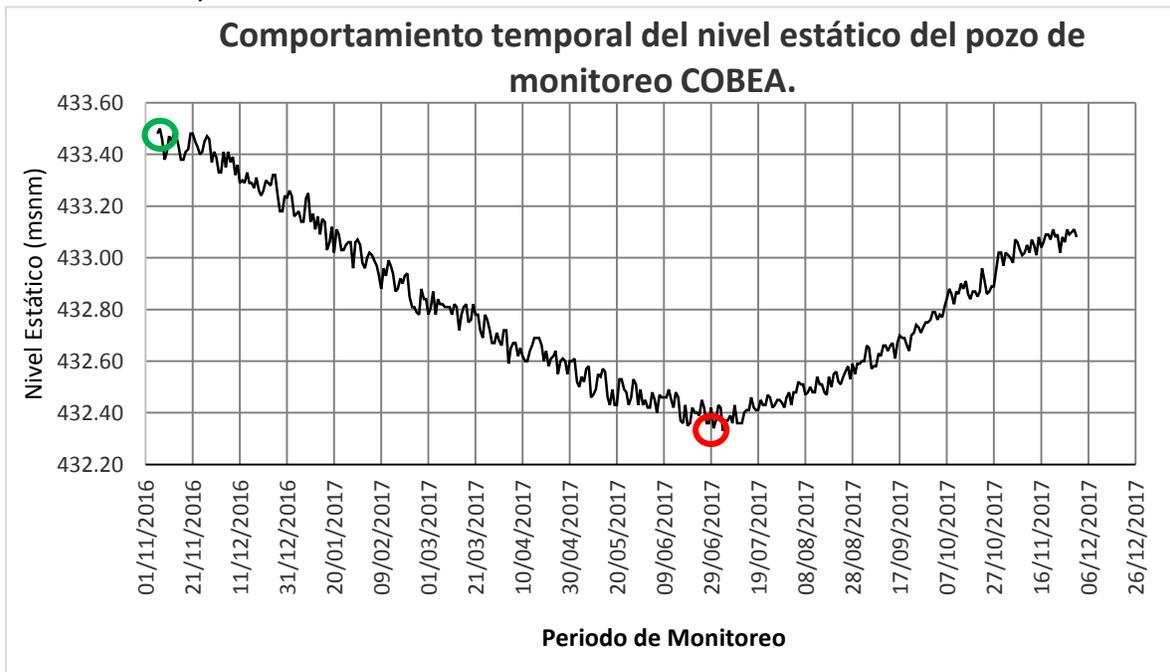


Figura 3. 17: Monitoreo de nivel estático pozo COBEA, valor mínimo círculo rojo, valor máximo círculo verde.

La Variación del Nivel Freático (VNF) se comporta de manera repetitiva anualmente, oscilando entre un máximo y mínimo de nivel freático. Debido a que la serie de VNF posee discontinuidades en ciertos periodos de tiempos; para el cálculo de la recarga, se utilizó el periodo que comprende de noviembre de 2016 (inicio del monitoreo) a noviembre de 2017, se asumió que en este periodo se da la recarga anual, por lo que en la ecuación del cálculo de la recarga se tomó un Δt de un año.

El nivel freático mínimo en el periodo de tiempo seleccionado es de 432.33 m mientras que el máximo es de 433.50 m, por lo que el cálculo de la recarga queda de la siguiente manera:

$$R = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} = 0.32 \frac{(433.50 \text{ m} - 432.33 \text{ m})}{1 \text{ año}} = 0.3744 \text{ m/año}$$

B) Pozo Plaza Integración

De igual manera con base a los datos de la variación del nivel freático, este pozo posee una profundidad del nivel freático promedio de 75.89 metros, y se ubica a una elevación aproximada de 525 msnm, por lo que se puede decir que el nivel freático promedio se encuentra en los 449.11 m.

En la Fig. 3.18, se muestra el grafico de la serie de datos de la variación del nivel freático en el pozo Plaza Integración.

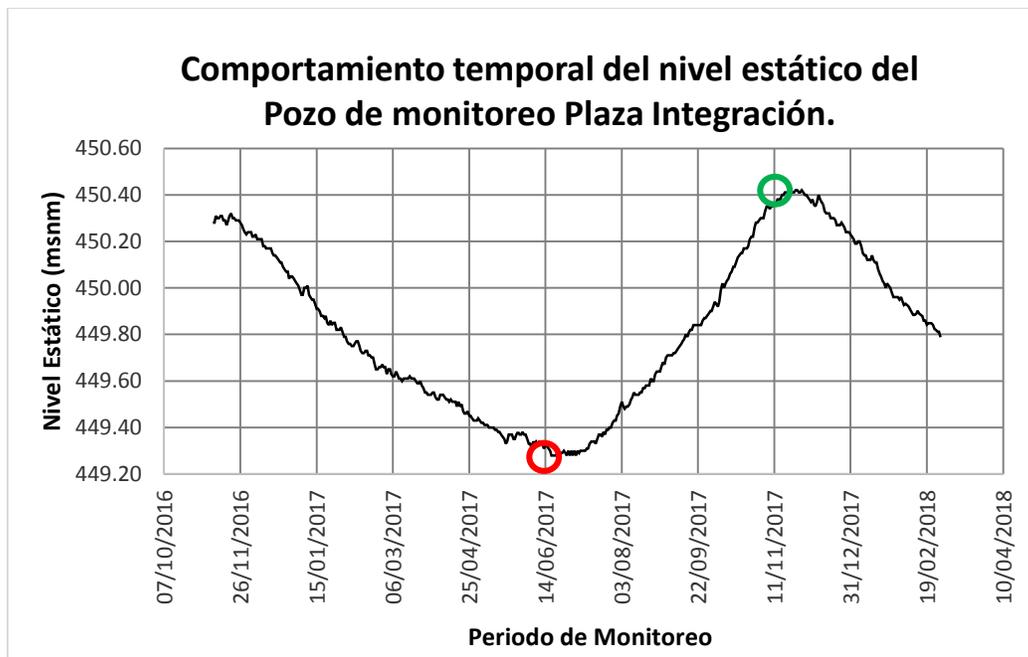


Figura 3. 18: Monitoreo de nivel estático pozo Plaza Integración, valor mínimo círculo rojo, valor máximo círculo verde.

La Variación del Nivel Freático (VNF) se comporta de manera repetitiva anualmente, oscilando entre un máximo y mínimo de nivel freático. Debido a que la serie de VNF posee discontinuidades en ciertos periodos de tiempos; para el cálculo de la recarga, se utilizó nada más el periodo que comprende de noviembre de 2016 (inicio del monitoreo de nivel) a noviembre de 2017, se asumirá que en este periodo se da

la recarga anual, por lo que en la ecuación del cálculo de la recarga se tomará un Δt de un año.

El nivel freático mínimo en el periodo de tiempo seleccionado es de 449.28 m mientras que el máximo es de 450.42 m, por lo cual el cálculo de la recarga fue el siguiente:

$$R = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} = 0.32 \frac{(450.42 \text{ m} - 449.28 \text{ m})}{1 \text{ año}} = 0.3648 \text{ m/año}$$

Resultados de la recarga potencial

La siguiente tabla 3.3, muestra los valores de recarga acuífera promedio calculados para los pozos de monitoreo en el periodo de registro seleccionado. Seleccionado.

Tabla 3. 3: Resultados de la estimación de la recarga por el método de la Variación del Nivel Freático (VNF)

Pozo	Recarga (m/año)
COBEA	0.3744
Plaza Integración	0.3648
Valor Medio	0.3696

Para el cálculo volumétrico de la recarga anual, se multiplicó el área de la zona de interés en metros cuadrados (aproximadamente 22 millones de metros cuadrados), por el valor medio estimado de la recarga en los pozos, dando como resultado la recarga anual, en metros cúbicos por año.

Cálculo de recarga volumétrica media de los pozos de Plaza Integración y COBEA:

$$R = 21,960,000 \text{ m}^2 \times 0.3696 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 8,116,416 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

≈8.11 millones de metros cúbicos al año

Cabe destacar que este cálculo se realizó utilizando un almacenamiento específico de tabla, que corresponde a arenas medias, con un valor de 0.32.

3.7. Recarga Acuífera Subterránea (RAS-FORGAES).

El método RAS es un método científico, teórico para elaborar el mapa de recarga de agua subterránea que puede servir como una herramienta para apoyar a tomar

decisiones en la protección y el manejo sostenible del recurso hídrico. (Junker, 2005).

Con base en datos y mapas básicos se llega a determinar con pocos parámetros y cálculos un mapa de la recarga de agua subterránea, con valores cuantitativos, los cuales se expresan en (*mm/año*); para estimar el volumen de agua que infiltra y que llegará a recargar a los acuíferos. Distinguir las zonas de mayor recarga acuífera ayuda a identificar las zonas más vulnerables a la contaminación hídrica o áreas críticas de la recarga para protegerlas.

Metodología de la Recarga Acuífera Subterránea (RAS).

Criterios básicos:

Se entiende la recarga acuífera como la infiltración del agua superficial que pasa la zona no-saturada del subsuelo y llega a la zona saturada de agua subterránea y forma parte del agua del acuífero. (Junker, 2005).

La recarga de agua subterránea, calculada con éste método simplificado, proporciona un valor teórico y aproximado, sin tomar en consideración procesos complejos como por ejemplo de flujos laterales y circulantes en la zona no-saturada. Tampoco se tomó en cuenta actividades antropogénicas como extracciones por pozos, bombeos o drenajes superficiales, diques y presas artificiales, debido a que éste método solo estima la recarga acuífera mediante la cantidad de agua lluvia que cae en un área determinada.

Generalmente la recarga de agua subterránea (acuífera) depende de varios criterios, los más importantes son los siguientes:

- Precipitación (*)
- Evaporación/Transpiración (*)
- Geología, Sistemas de fallas
- Subsuelo, Textura del sustrato
- Vegetación (*)
- Uso de suelo (*)
- Topografía, Pendientes/Escurrimiento (*)
- Profundidad hacia el acuífero

Los parámetros que considera el método RAS son los que se marcan con (*), Para el cálculo de la recarga acuífera en el área de investigación se utilizó el mapa de recarga acuífera por el método RAS el cual se muestra en la Fig 3.19.

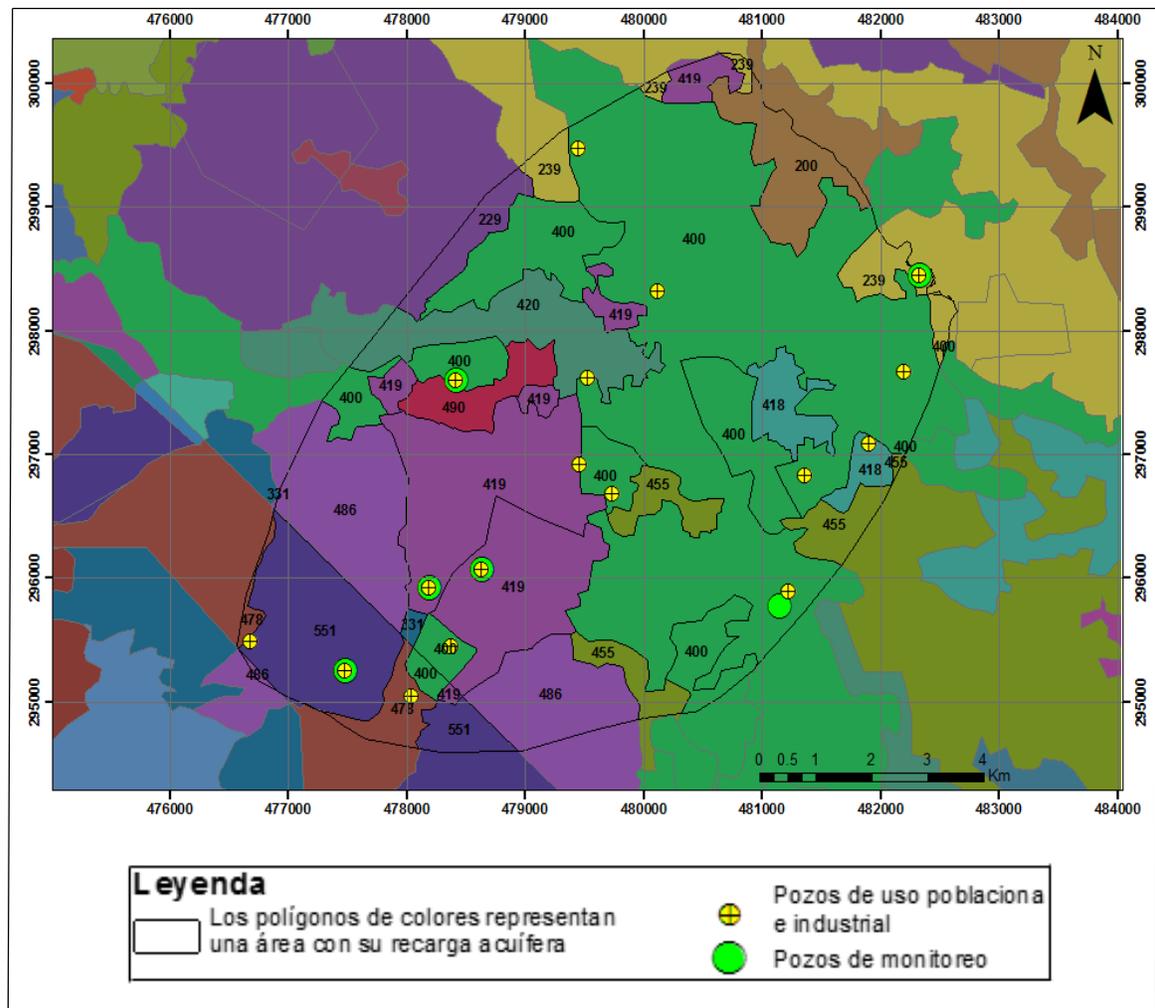


Figura 3. 19: Mapa de recarga acuífera método RAS. FORGAES-MARN, Año 2005.

De acuerdo a la Fig. 3.19, muestra que 37 polígonos están dentro de la zona de interés, para cada uno de ellos se calculó el área y su recarga respectiva por el método RAS. La recarga máxima es de 490 mm/año y la mínima en de 200 mm./año.

Tabla 3. 4: Muestra los datos para el análisis de la recarga por el método RAS.

Nº	Área (m ²)	Recarga (m/año)	Área x Recarga (m ³ /año)
0	575196.097	0.239	137471.867
1	683856.513	0.200	136771.303
2	7584030.582	0.400	3033612.233
3	167379.744	0.419	70132.113
4	769232.117	0.400	307692.847
5	197454.406	0.400	78981.762
6	119447.681	0.419	50048.578
7	1046345.847	0.420	439465.256
8	259720.767	0.400	103888.307
9	416162.104	0.490	203919.431
10	2859.589	0.400	1143.836
11	369013.494	0.418	154247.640
12	592543.039	0.400	237017.216
13	102057.006	0.419	42761.885
14	66367.671	0.419	27808.054
15	1674502.481	0.419	701616.539
16	250645.225	0.400	100258.090
17	807.773	0.400	323.109
18	171160.719	0.418	71545.180
19	291853.642	0.455	132793.407
20	253445.009	0.455	115317.479
21	344879.884	0.400	137951.954
22	241720.847	0.455	109982.985
23	1222184.596	0.486	593981.713
24	21017.741	0.419	8806.433
25	1202603.676	0.419	503890.940
26	39248.044	0.331	12991.103
27	76505.266	0.400	30602.106
28	150976.375	0.400	60390.550
29	836217.987	0.486	406401.942
30	42.891	0.331	14.197
31	1324408.849	0.551	729749.276
32	13646.668	0.486	6632.281
33	271756.256	0.478	129899.490
34	241504.141	0.551	133068.782
35	69159.824	0.478	33058.396
36	316159.702	0.229	72400.572
Total			9116638.852

Los resultados de la recarga se muestran en la tabla 3.4, en la zona de investigación la recarga acuífera calculada fue de **9.11 millones de metros cúbicos** al año.

Comparación de los métodos VNF y RAS.

Con el método VNF se obtuvo una recarga de 8.11 millones de metros cúbicos al año y con el método RAS un valor de 9.11 metros cúbicos al año, con una diferencia de 1 millón de metros cúbicos al año, esto debido, a que el método RAS se refiere a la recarga potencial de agua subterránea (acuífera) sin considerar las explotaciones a través de los pozos, mientras que el método VNF toma en cuenta la fluctuación del nivel freático y se ve influenciado por la extracción de agua en el acuífero.

El millón de metros cúbicos de diferencia entre los métodos podría ser un indicador de la explotación del acuífero, sin embargo, como ambos métodos tienen errores en sus cálculos, por lo tanto no se puede afirmar que esa cantidad es la extraída del acuífero, también hay que considerar que el método RAS-FORGAES sobreestima los valores de recarga acuífera en las zonas urbanas.

3.8. Cálculos de Transmisividad y coeficiente de almacenamiento para el acuífero en el área de estudio

Para el cálculo de estos parámetros se utilizaron dos herramientas computacionales, el software SSNE que fue desarrollado en MATLAB, los datos que se ingresan al programa son: tiempos (minutos) y descensos del nivel freático (m), estos datos se pueden trasladar desde Excel o formato .txt.

El segundo fue una hoja de cálculo en Excel desarrollada para el modelado de Jacob.

A continuación en la Fig 3.20 se muestran los datos y el resultado del procesamiento de la prueba de bombeo del pozo CDD El Ángel:

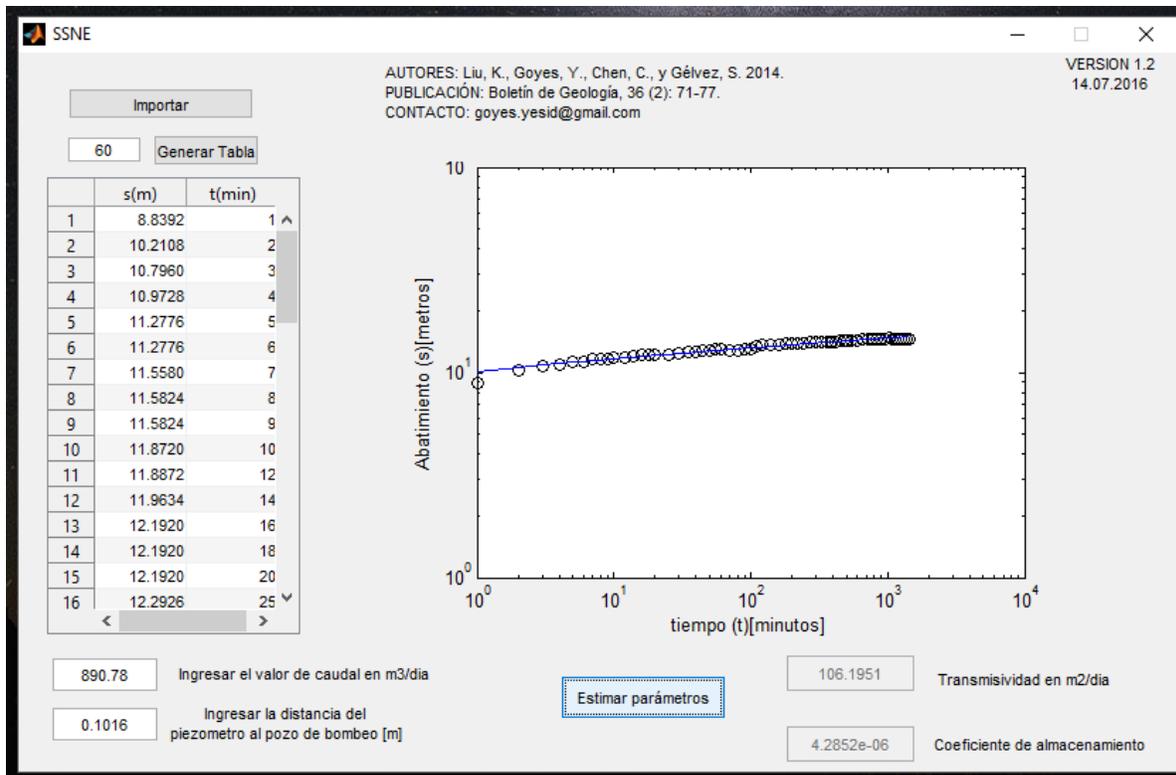


Figura 3. 20: Visualización del software SSNE, para análisis de prueba de bombeo pozo CDD El Ángel.

En la Fig. 3.20, se muestran los resultados para la prueba de bombeo del pozo CDD El Ángel donde se observa que la información de ingreso al programa es: tiempo (min), descenso del nivel freático (m), caudal ($m^3/día$) y distancia del piezómetro al pozo de bombeo (m), además el ajuste de la curva es muy bueno por lo que la confiabilidad de los resultados es alta.

El software SSNE, se utilizó en la investigación para los cálculos de los parámetros hidrogeológicos de transmicividad y coeficiente de almacenamiento de los pozos que contaban con datos de pruebas de bombeo en el área de investigación.

Algunos de los pozos no presentaron un buen ajuste en sus curvas de modelación con el software anteriormente mencionado, es por esta razón que se utilizó otro programa para el cálculo de dichos parámetros hidrogeológicos, el cual se basa en una hoja de cálculo en Excel. Se detalla a continuación el cálculo de dos pruebas de bombeo de los pozos El Ángel e INSINCA.

Prueba de bombeo Pozo El Ángel:

Los datos de entrada a la hoja de cálculo son: el caudal ($m^3/día$), la distancia del piezómetro (m), los tiempos (min) y descensos del nivel durante la prueba (m).

Datos de entrada:

Tabla 3. 5: Datos de entrada a la hoja de cálculo de Excel.

DATOS

POZO DE BOMBEO		
Caudal de Bombeo (Q)	5,529.60	m ³ /d
Distancia de Piezometro	0.1524	m

En la tabla 3.5, se muestran los datos de entrada a la hoja de cálculo de Excel, los datos de caudal deben ingresarse en ($m^3/día$) y la distancia del piezómetro al pozo de monitoreo es en (m).

Tabla 3. 6: Muestra los datos de entrada requeridos en el programa (tiempo y descensos)

Tiempo (min)	Descensos (m)	90	6.79704	480	6.7818	2040	6.833616
1	5.4864	95	6.79704	510	6.7818	2100	6.833616
2	5.7912	100	6.79704	540	6.7818	2160	6.833616
3	6.2484	105	6.79704	570	6.7818	2220	6.858
4	6.4008	110	6.79704	600	6.7818	2280	6.858
5	6.46176	115	6.79704	630	6.7818	2340	6.858
6	6.49224	120	6.79704	660	6.7818	2400	6.858
7	6.52272	135	6.79704	720	6.7818	2460	6.858
8	6.58368	150	6.7818	780	6.833616	2520	6.858
9	6.61416	165	6.7818	840	6.833616	2580	6.858
10	6.64464	180	6.7818	900	6.833616	2640	6.858
12	6.7056	195	6.7818	960	6.833616	2700	6.858
14	6.73608	210	6.7818	1020	6.833616	2760	6.858
16	6.73608	225	6.7818	1080	6.833616	2820	6.858
18	6.76656	240	6.7818	1140	6.833616	2880	6.858
20	6.76656	255	6.7818	1200	6.833616		
25	6.76656	270	6.7818	1260	6.833616		
30	6.76656	285	6.7818	1320	6.833616		
35	6.76656	300	6.7818	1380	6.833616		
40	6.76656	315	6.7818	1440	6.833616		
45	6.76656	330	6.7818	1500	6.833616		
50	6.76656	345	6.7818	1560	6.833616		
55	6.79704	360	6.7818	1620	6.833616		
60	6.79704	375	6.7818	1680	6.833616		
65	6.79704	390	6.7818	1920	6.833616		
70	6.79704	420	6.7818	1980	6.833616		
75	6.79704	450	6.7818				
80	6.79704						
85	6.79704						

En la Tabla 3.6, se detalla los datos requeridos de la prueba de bombeo realizada, la información utilizada por el programa es el tiempo en minutos, los descensos del nivel freático en metros, el caudal al que se realiza la prueba de bombeo en metros cúbicos por día y por último la distancia del piezómetro al pozo de monitoreo en metros.

Resultados obtenidos:

Las estimaciones de los cálculos realizados por la hoja de cálculo para la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento. Para el pozo de El Ángel la transmisividad fue de $6,638.518 \text{ m}^2/\text{día}$ y el coeficiente de almacenamiento tuvo un valor extremadamente pequeño de 4.35×10^{-5} .

$$\begin{aligned} \text{Radio (m)} &= 0.1524 \\ \text{Descenso (m)} &= 6.27 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Radio (m)} &= 1.524 \\ \text{Descenso (m)} &= 6.42 \end{aligned}$$

$$m = \frac{S_2 - S_1}{\log S_2 - \log S_1} \quad m \text{ (m/m)} = 0.15 \quad \text{OJO}$$

B CALCULO DE T $m = 0.183 \frac{Q}{T}$

$$T = 0.183 \frac{Q}{m} \quad T \text{ (m}^2/\text{d)} = 6638.518 \quad \text{OJO}$$

B CALCULO DE S

$$\begin{aligned} r &= 0.1524 \quad \text{m} \\ t_0 &= 0.0 \quad \text{min} \\ t_0 &= 0.00000 \quad \text{Dias} \end{aligned}$$

$$s = 2.25 \frac{Txt_0}{r^2} \quad S = 0.000000$$

El valor de coeficiente de almacenamiento es sumamente bajo lo que indica que el acuífero está confinado en éste sector del área de investigación.

ACUIFERO CONFINADO

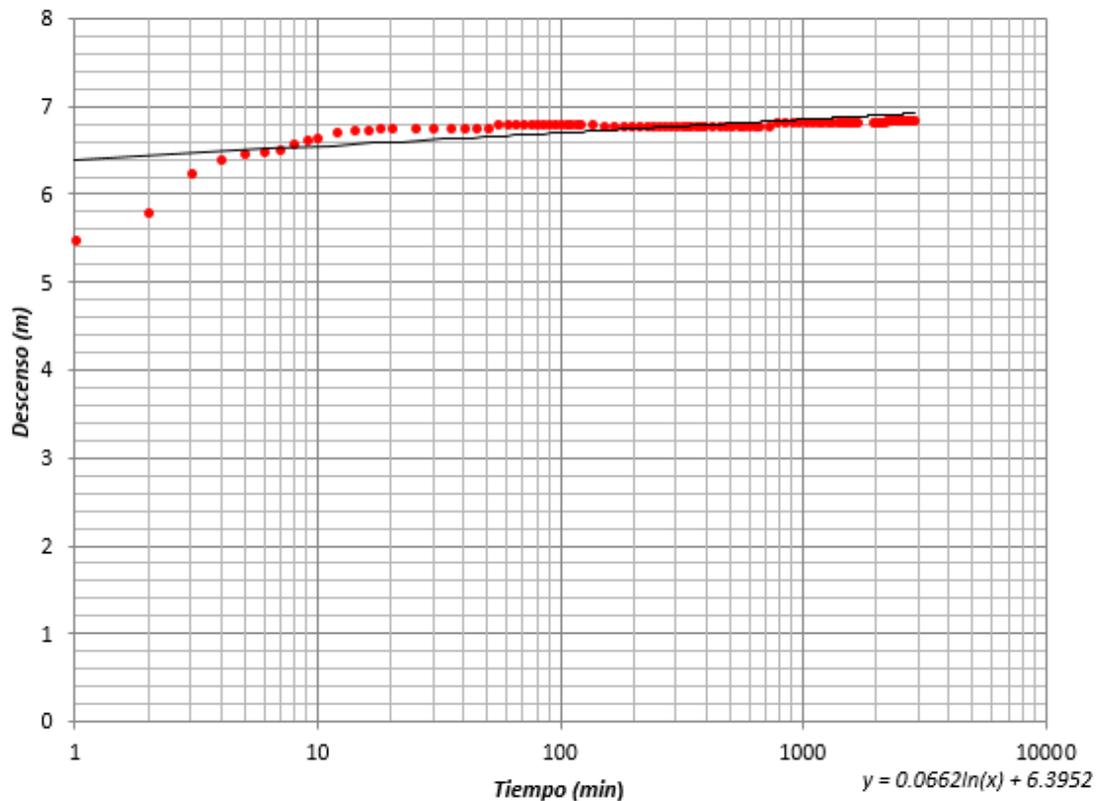


Figura 3. 21: Muestra la curva del comportamiento de la prueba de bombeo pozo El Ángel.

La Fig. 3.21, presenta el gráfico de tiempo versus los descensos de la prueba de bombeo del pozo El Ángel. La curva no logra ajustarse bien en los primeros 30 minutos pero luego se mejoró considerablemente el ajuste logrando un buen cálculo para los parámetros hidrogeológicos de transmisividad y coeficiente de almacenamiento.

Análisis prueba de bombeo Pozo INSINCA

Datos de entrada:

Tabla 3. 7: Datos de entrada a la hoja de cálculo de Excel.

DATOS

POZO DE BOMBEO		
Caudal de Bombeo (Q)	5996.21	m ³ /d
Distancia de Piezometro	0.1524	m

En la tabla 3.7, se muestran los datos de entrada a la hoja de cálculo de Excel, los datos de caudal deben ingresarse en (m^3/dia) y la distancia del piezómetro al pozo de bombeo (m).

Tabla 3. 8: Muestra los datos de entrada requeridos en el programa (tiempo y descensos).

(min)	Descensos (m)				
1	4.0843	100	4.2062	1320	4.3952
2	4.0843	110	4.2062	1380	4.3952
3	4.0843	120	4.2062	1440	4.3952
4	4.0843	130	4.2062	1500	4.3952
5	4.1758	140	4.2062	1560	4.3952
6	4.2062	150	4.2062	1620	4.3952
7	4.2062	160	4.2428	1680	4.3952
8	4.2062	170	4.2428	1740	4.3952
9	4.2062	180	4.2428	1800	4.3952
10	4.2062	200	4.2428	1860	4.3952
12	4.2062	220	4.2428	1920	4.3952
14	4.2062	240	4.2672	1980	4.3952
16	4.2062	280	4.2672	2040	4.4714
18	4.2062	300	4.2672	2100	4.4714
20	4.2062	360	4.2672	2160	4.4714
25	4.2062	420	4.2672	2220	4.4714
30	4.2062	480	4.2672	2280	4.4714
35	4.2062	540	4.2672	2340	4.4714
40	4.2062	600	4.2946	2400	4.4714
45	4.2062	660	4.2946	2460	4.4714
50	4.2062	720	4.2946	2520	4.4714
55	4.2062	780	4.2946	2580	4.4714
60	4.2062	840	4.2946	2640	4.4714
65	4.2062	900	4.3190	2700	4.4714
70	4.2062	960	4.3434	2760	4.4714
75	4.2062	1020	4.3952	2820	4.4714
80	4.2062	1080	4.3952	2880	4.4714
85	4.2062	1140	4.3952		
90	4.2062	1200	4.3952		

En la Tabla 3.8, se presentan los datos requeridos de la prueba de bombeo realizada, la información utilizada por el programa es el tiempo en minutos, los

descensos del nivel freático en metros, el caudal al que se realiza la prueba de bombeo en metros cúbicos por día y por último la distancia del piezómetro al pozo de monitoreo en metros

Resultados obtenidos:

Las estimaciones de los cálculos realizados en la hoja de cálculo para la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento. Para el pozo de INSINCA la transmisividad fue de $9805.640 \text{ m}^2/\text{día}$ y el coeficiente de almacenamiento tuvo un valor extremadamente pequeño 4.40×10^{-18} .

$$\begin{aligned} \text{Radio (m)} &= 0.1524 \\ \text{Descenso (m)} &= 3.94 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Radio (m)} &= 1.524 \\ \text{Descenso (m)} &= 4.05 \end{aligned}$$

$$m = \frac{S_2 - S_1}{\log S_2 - \log S_1} \quad m \text{ (m/m)} = 0.11 \quad \text{OJO}$$

B CALCULO DE T $m = 0.183 \frac{Q}{T}$

$$T = 0.183 \frac{Q}{m} \quad T \text{ (m}^2/\text{d)} = 9805.640 \quad \text{OJO}$$

B CALCULO DE S

$$\begin{aligned} r &= 0.1524 \text{ m} \\ t_0 &= 0.0 \text{ min} \\ t_0 &= 0.00000 \text{ Dias} \end{aligned}$$

$$s = 2.25 \frac{Txt_0}{r^2} \quad S = 0.000000$$

El valor de coeficiente de almacenamiento es sumamente bajo lo que indica que el acuífero está confinado en éste sector del área de investigación.

ACUIFERO CONFINADO

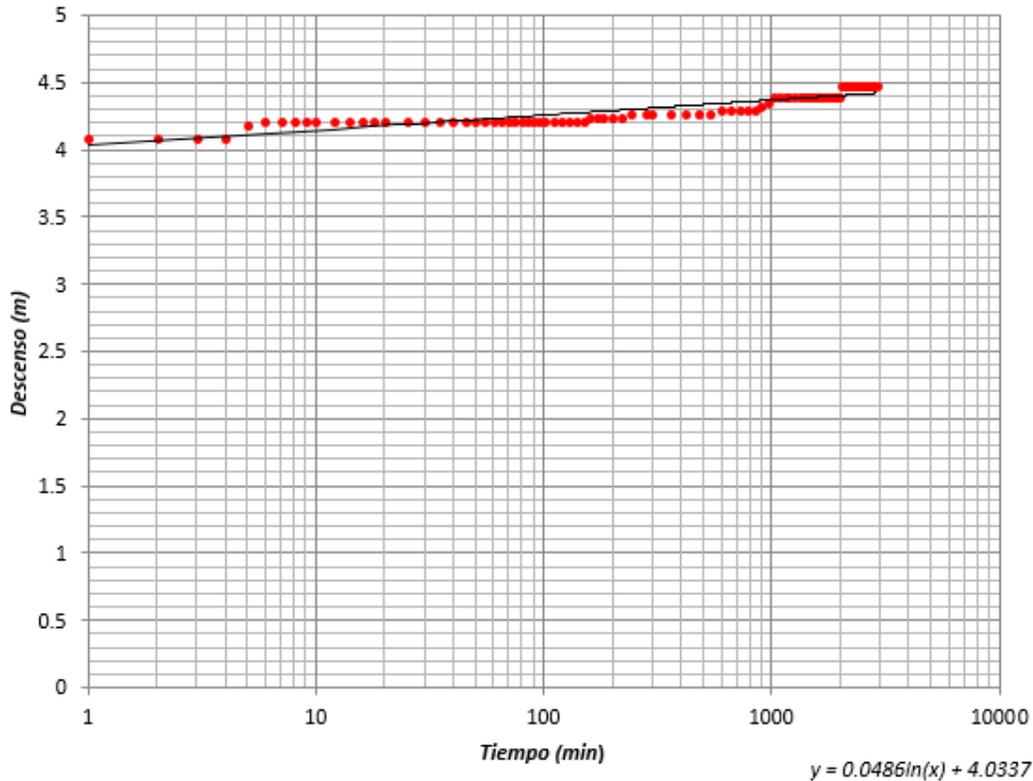


Figura 3. 22: Muestra la curva del comportamiento de la prueba de bombeo pozo INSINCA.

En la Fig. 3.22, se observa el gráfico de tiempo versus los descensos de la prueba de bombeo del pozo INSINCA. La curva logra ajustarse bastante bien desde los primeros datos medidos logrando un cálculo confiable de los parámetros hidrogeológicos de transmisividad y coeficiente de almacenamiento.

3.9. Análisis de la explotación del acuífero a través de pozos y manantiales.

En total se tienen 21 pozos perforados y en explotación, además de 5 manantiales captados, cuyo caudal total extraído en un año es de 14.34 millones de metros cúbicos, mientras que el promedio de la recarga por el método VNF y RAS es de 8.61 millones de metros cúbicos al año aproximadamente, lo que genera 5.73 millones de metros cúbicos de diferencia deduciendo que la extracción es mayor que la recarga acuífera. Sin embargo hay que aclarar que la investigación se ha realizado en un área pequeña que solo tiene 22 kilómetros cuadrados y no se han tomado en cuenta los aportes laterales de recarga acuífera en la zona; de igual forma es importante desarrollar mecanismos para la sostenibilidad del recurso hídrico en el área de investigación, ya que de continuar la extracción actual pueden generar problemas de cobertura de agua potable y otros usos en la zona.

Esta situación se daría por la profundización de los niveles freáticos y por el subsecuente mayor consumo de energía para extraer el agua, cambio en los equipos de bombeo, profundización de los pozos, etc.

3.10. Análisis del efecto de la explotación del acuífero en el corto y mediano plazo, por medio del comportamiento temporal del nivel estático medido en los pozos de monitoreo.

El sistema acuífero en la zona de investigación se ha clasificado en dos partes según sus parámetros hidrogeológicos (transmisividad y coeficiente de almacenamiento), una como acuífero pobre y la otra como un acuífero excelente, muy permeable, su rango de transmisividad varía entre $14.52 \text{ m}^2/\text{día}$ a $9541.54 \text{ m}^2/\text{día}$ con un coeficiente de almacenamiento menor a 0.1; el mayor potencial acuífero se encuentra alojado en un estrato constituido por lavas basálticas – Andesíticas con alto grado de fracturamiento que permite la facilidad del movimiento del flujo de agua subterráneo.

Según el comportamiento temporal de los niveles estáticos medidos en los pozos de monitoreo éstos varían de 1 a 4.32 metros, para el periodo de registro analizado desde el 2015 hasta el 2017, los niveles tienden a recuperarse en época lluviosa y disminuyen en época seca, dicha disminución es debida a la impermeabilización de los suelos, la reducción de lluvias en los últimos años y la extracción de agua en el acuífero.

La recarga acuífera calculada (8.61 millones de metros cúbicos al año) es menor que la extracción de los pozos de explotación (14.34 millones de metros cúbicos al año), de continuar igual la explotación en el acuífero podría haber problemas de desabastecimiento en el corto y mediano plazo, sin embargo en el área se desarrollaran nuevos proyectos habitacionales por lo tanto la población será mayor y por ende la demanda de agua potable aumentará, esto ocasionará que el problema tienda a ser más grave y afecte en un futuro cercano a la población de la zona.

Es necesario implementar medidas de protección de la subcuenca en el área para mejorar la recarga de agua subterránea implementando medidas que favorezcan el manejo integral del recurso hídrico tales como: recarga artificial de acuíferos, reforestación de las zonas altas para disminuir la sobreexplotación del acuífero, etc.

4. CONCLUSIONES

- a) Según el perfil de correlación A, el material existente en profundidad puede agruparse en 2 grandes capas. La primera se constituye de piroclásticos y sedimentos aluviales de color gris intermedio con resistividades aparentes de $40 \Omega.m$ a $100 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de $160 mv$ a $187 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a $25 cps$, tiene una transmisividad asociada de $14.50 m^2/dia$ y un coeficiente de almacenamiento de 0.01. La segunda se constituye de lavas basálticas color gris oscuro con alto grado de fracturas, resistividades aparentes de $30 \Omega.m$ a $260 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de $172.40 mv$ a $186.40 mv$ y radiación gamma naturales tiene un rango de $10 cps$ a $20 cps$. Su transmisividad inferida es de $6557.76 m^2/dia$ con un coeficiente de almacenamiento de 4.40×10^{-5} .
- b) Según el perfil de correlación B, el material existente en profundidad puede agruparse en 3 grandes capas. La primera se constituye de sedimento aluvial de color café claro, resistividades aparentes de $30 \Omega.m$ a $100 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de $40 mv$ a $120 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a $20 cps$, La transmisividad de éste estrato es prácticamente nula y no se tiene información de su coeficiente de almacenamiento. La segunda se conforma de piroclásticos y sedimentos multicromo, resistividades aparentes de $10 \Omega.m$ a $80 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de $40 mv$ a $100 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a $20 cps$, con una transmisividad asociada de $9541.54 m^2/dia$ y un coeficiente de almacenamiento de 3.37×10^{-05} Y por último un estrato de lava color gris, resistividades aparentes de $30 \Omega.m$ a $260 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de $100 mv$ a $186 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a $20 cps$, tiene una transmisividad inferida de $14.52 m^2/dia$ con un coeficiente de almacenamiento 0.0001.
- c) Según el perfil de correlación C, el material existente en profundidad puede agruparse en 2 grandes capas. La primera se constituye de piroclásticos y sedimentos re TRABAJADOS color blanco amarillento, resistividades aparentes de $85 \Omega.m$ a $160 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de $178 mv$ a $270 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a $20 cps$, la transmisividad asociada a éste estrato es de $179.04 m^2/dia$ y su coeficiente de almacenamiento es 0.10. La segunda es lava basáltica color gris oscuro, resistividades aparentes de $30 \Omega.m$ a $260 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de $120 mv$ a $186 mv$ y radiación gamma natural en un rango de $10 cps$ a 20

cps, el valor de Transmisividad inferida es de $9541.54 \text{ m}^2/\text{dia}$ con un coeficiente de almacenamiento de 4.40×10^{-5} .

- d) Según el perfil de correlación D, el material existente en profundidad puede agruparse en 3 grandes capas. La primera es una toba aglomerada color gris oscuro, resistividades aparentes de $50 \Omega.m$ a $100 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de 160 mv . La segunda se conforma de piroclásticos y sedimentos color blanco amarillento, resistividades aparentes de $40 \Omega.m$ a $60 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de 160 mv . Y por último un estrato de lava basáltica color gris oscuro, resistividades aparentes de $30 \Omega.m$ a $260 \Omega.m$, con un potencial espontaneo de 173 mv a 186 mv , Su transmisividad inferida es de $6557.76 \text{ m}^2/\text{dia}$ con un coeficiente de almacenamiento asociado de 4.40×10^{-5} .
- e) De los registros geofísicos se concluye que en la zona no existen capas con importante contenido de arcilla que confinen el acuífero ya que los valores de los registros geofísicos muestran rangos de radiación gamma natural de 10 cps a 25 cps, de igual forma los registros de resistividad y potencial espontaneo no miden valores que sean representativos para materiales arcillosos.
- f) Los datos analizados muestran que las variaciones del nivel estático se dividen entre las épocas seca y lluviosa, ya que los valores tienden a descender en los meses de época seca, mientras que aumentan en los meses de lluvia. Las variaciones de los niveles se encuentran en un rango de 1 a 4.32 metros entre los valores máximos y mínimos medidos durante el periodo de monitoreo desde el 2015 hasta el 2017.
- g) Particularmente es importante mencionar el caso del pozo de monitoreo INSINCA, Su variación en el nivel estático ha sido de 7 metros entre sus valores de registro máximos y mínimos, su nivel de recuperación ha disminuido en el año 2017 esto debido a que cerca del pozo se han perforado nuevos para extracción del agua subterránea y esto ocasionó que el nivel no se recupere como en los años anteriores de registro.
- h) Las variaciones de la temperatura y conductividad eléctrica del agua no han sido muy grandes durante el período analizado para el estudio, el cambio en la temperatura ha tenido un rango de 0.5 a 1.3 °C, mientras que la conductividad eléctrica ha variado en un rango de 0.01 a 0.09 *ms/cm*.

- i) El área de investigación ha sufrido muchos cambios en el uso del suelo con el paso del tiempo el 75% del total del área está impermeabilizado (Industrias, áreas urbanas, carreteras, etc.) esto aunado a una disminución en las lluvias de los últimos años ocasionan cambios negativos en el desarrollo del ciclo hidrológico, la recarga acuífera se ve disminuida, de igual forma el nivel freático tiende a profundizarse en la zona.

- j) Según los resultados la recarga acuífera calculada durante el estudio es de aproximadamente 8.61 millones de metros cúbicos al año (no se han tomado en cuenta los aportes laterales en el cálculo de la recarga acuífera), mientras que la extracción es de aproximadamente 14.34 millones de metros cúbicos al año, existen 5.73 millones de metros cúbicos de diferencia por lo que se estima una extracción mayor a la recarga acuífera de la zona; por lo tanto es importante crear acciones para la sostenibilidad del acuífero en el área de investigación ya que si la extracción es mayor a la recarga pueden haber problemas de desabastecimiento del agua potable en la zona estudiada.

- k) Existe un riesgo inminente de contaminación hacia el acuífero, debido a que el nivel freático está a poca profundidad y los ríos están por encima de éste, los ríos en la zona tienen altos índices de contaminación y debido al aporte que tienen en la recarga acuífera podrían contaminar y ser perjudiciales para las aguas subterráneas.

5. RECOMENDACIONES

- a) Ampliar la red de monitoreo permanente de los parámetros físicos (niveles estáticos, conductividad eléctrica y temperatura del agua en el acuíferos) además instalar más equipos de monitoreo en otras zonas, con el fin de realizar evaluaciones periódicas sobre el comportamiento de los parámetros mencionados anteriormente, con la finalidad de cubrir un área mayor y tener datos para realizar comparaciones de la evaluación de niveles estáticos.
- b) Incorporar en los planes de desarrollo (industrial, agrícola y urbano) de la zona de investigación los resultados obtenidos sobre la reducción en los niveles estáticos ya que ésta información debe ser tomada en cuenta para realizar un manejo adecuado y sostenible del recurso hídrico de la zona.
- c) Hacer un uso eficiente del agua subterránea y superficial que actualmente se extrae del acuífero en la zona; desarrollar plantas de tratamiento de las aguas residuales para evitar la contaminación del recurso hídrico.
- d) Desarrollar sistemas de riego más eficientes para los cultivos de la zona y aprovechar el agua lluvia en época de invierno.
- e) Realizar acciones de protección de las zonas altas de la cuenca, ya que por sus materiales geológicos y cobertura vegetal representan las áreas de mayor recarga acuífera.
- f) Hacer más eficiente los sistemas de captación, potabilización y distribución del agua por parte de las instituciones y empresas encargadas del suministro, con la finalidad de preservar la calidad y cantidad de agua suministrada a las poblaciones actuales y futuras, a las industrias y los comercios.
- g) Realizar periódicamente evaluaciones sobre la calidad del agua en la zona de investigación.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alvarado, C. A. (2007). *Modelo Conceptual y Vulnerabilidad Intrínseca del Acuífero Quezaltepeque-Nejapa*. San Salvador: Universidad de El Salvador.

ANDA. (2015). *Boletín Estadístico 2015 -Nº37*. San Salvador: ANDA.

ANDA. (2016). *Boletín Estadístico 2016-Nº 38*. San Salvador: ANDA.

ANDA. (2016). *Construcción de pozo Nº 1 de producción sector de INSINCA, municipio de Apopa*. San Salvador: ANDA.

ANDA. (2016). *Perforación de pozo Nº 1, sector El Ángel, municipio de Apopa* . San Salvador: ANDA.

Astier, J. L. (1971). *Geofísica Aplicada a la Hidrogeología* . Masson , 12.

Baxter. (1994). *Léxico Estratigráfico de El Salvador* . San Salvador: CEL.

Comisión Nacional del Agua . (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento/Pruebas de Bombeo*. Tlalpan, México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Hidrología Subterránea* . Barcelona: Ediciones Omega, S.A.

Dirección General de Estadísticas y Censos. (2007). *Censo Poblacional* . San Salvador: El Salvador.

Estrada, R. E. (2018). *Caracterización Hidrogeológica del Acuífero Poroso en la Zona del Distrito de Riego de Zapotitán* . San Salvador: Universidad de El Salvador.

Excel Alzate & Branch, J. (2006). *Correlación de registros entre pozos con redes neuronales utilizando múltiples curvas o variables registradas*. *Boletín de Ciencias de la Tierra* , 19.

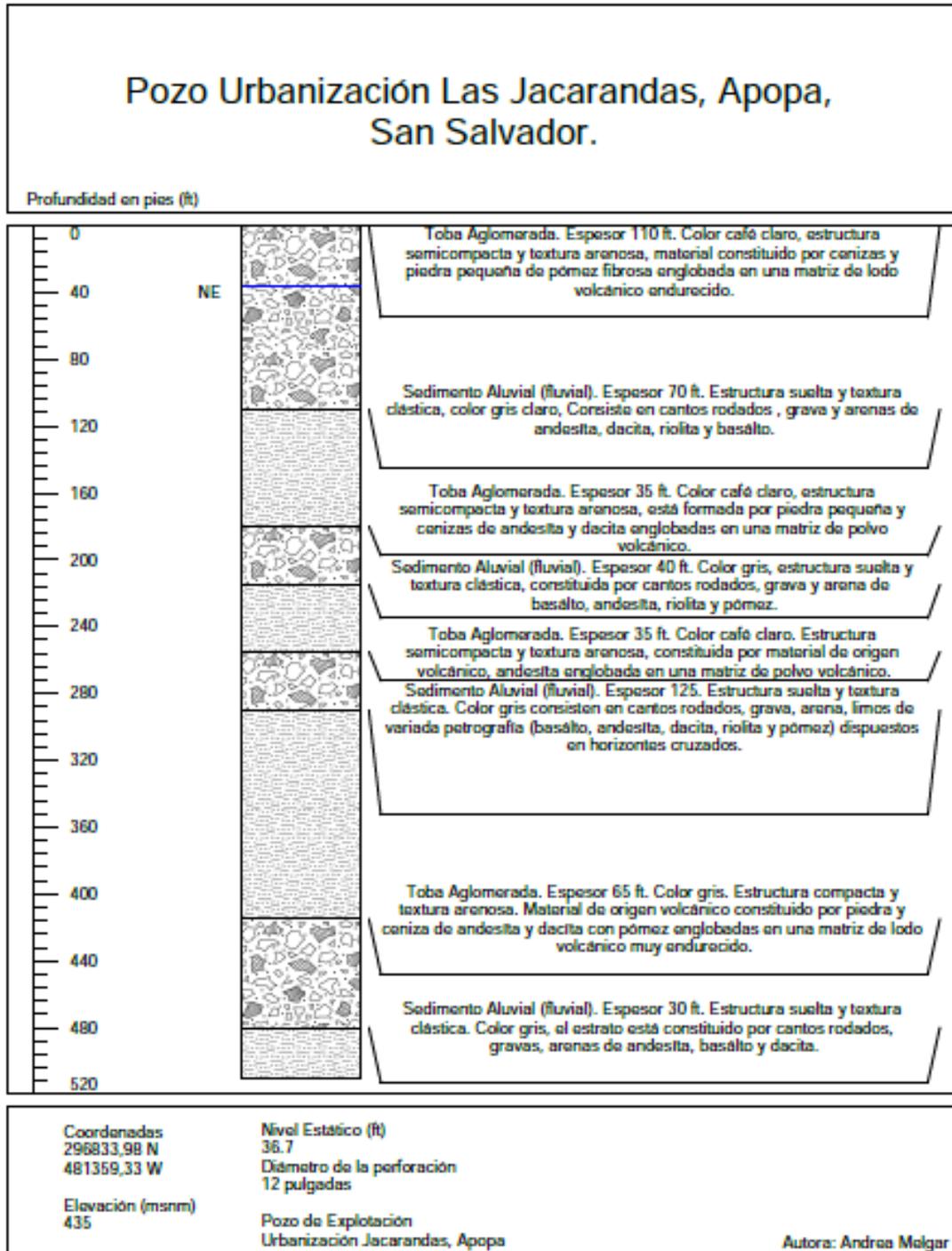
Fitts, C. R. (2014). *Groundwater Science/ Second Edition* . Ámsterdam : ELSEVIER.

Francisco, A. A. (1987). *Introducción a los Registros Geofísicos de Pozos*. México: UNAM.

- Gil, M. S. (2006). Hidrogeofísica de la cuenca del río San Antonio, El Salvador: Aplicación al modelo conceptual y vulnerabilidad intrínseca. *Revista Geológica de América Central*, 10.
- Hamad, S. (2009). Geoestatistical analysis of groundwater levels in the south Al Jabal Al Akhdar area using GIS. *GIS Ostrava*.
- Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 91-109.
- Junker, M. (2005). *Método RAS para determinar la recarga de agua subterránea*. San Salvador: OPAMSS.
- Keys, W. S. (1990). Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. En W. S. Keys, *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey* (págs. 1-149). United States: Cience for a Chainging World.
- Lui, K., Goyes, Y., & Gélvez, S. (2014). Estimación de los parámetros hidrogeológicos (S, T) a partir de ensayos de bombeo en régimen variable resolviendo un sistema no-lineal de ecuaciones (SNE). *Boletín de Geología*, 2-8.
- MARN. (2012). *Zonificación Ambiental y Usos de suelo de la subregión Metropolitana de San Salvador*. San Salvador, El Salvador: MARN.
- MARN. (2015). *Informe de calidad de agua de los ríos de El Salvador*. San Salvador: MARN.
- MARN. (2016). Monitoreo de niveles piezométricos del agua subterránea año 2016. *Gerencia de Hidrología. Dirección General del Observatorio Ambiental*, 34-41.
- MARN. (2017). *Informe de calidad de agua de los ríos de El Salvador*. San Salvador: MARN.
- MARN. (2017). *Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de El Salvador, con énfasis en zonas prioritarias*. San Salvador, El Salvador : MARN.

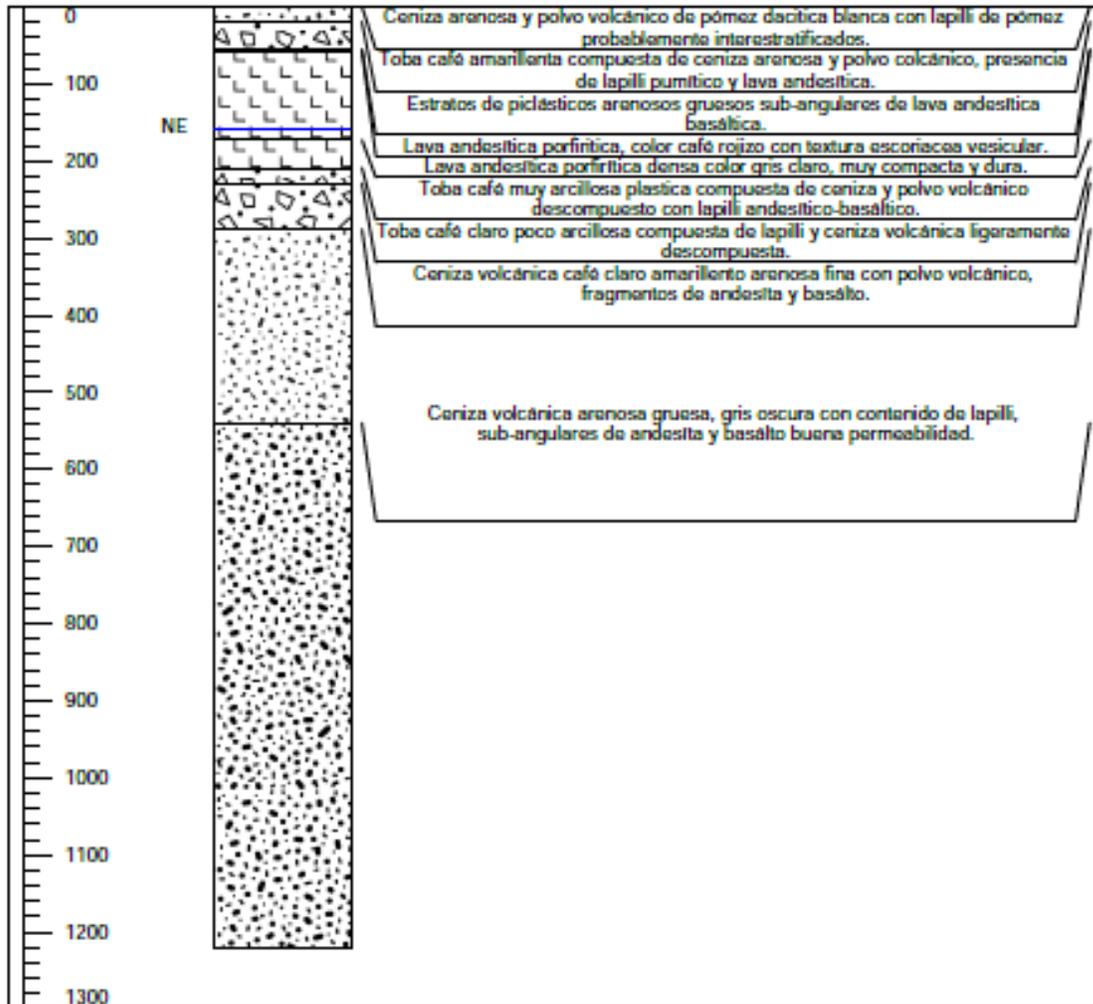
7. ANEXOS

Anexo I. Litología.



Pozo 2 La Hacienda, Apopa, San Salvador.

Profundidad en pies (ft)



Coordenadas
295449,46 N
478373,24 W

Elevación (msnm)
501,78

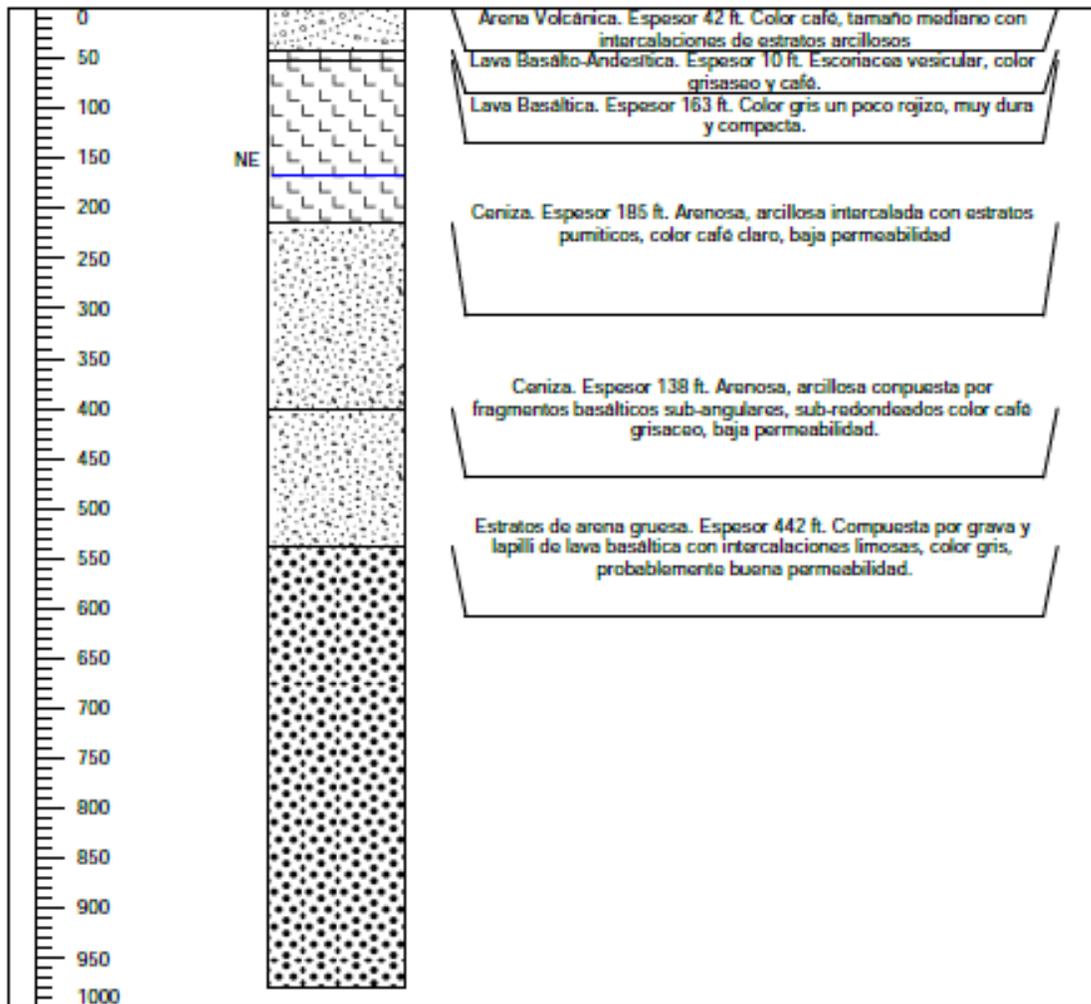
Nivel Estático (ft)
160
Diámetro de la perforación
17 pulgadas

Pozo de Explotación
Apopa, San Salvador

Autora: Andrea Melgar

Pozo 3 La Hacienda, Apopa, San Salvador.

Profundidad en pies (ft)



Coordenadas
296923,61 N
479455,74 W

Elevación (msnm)
478,74

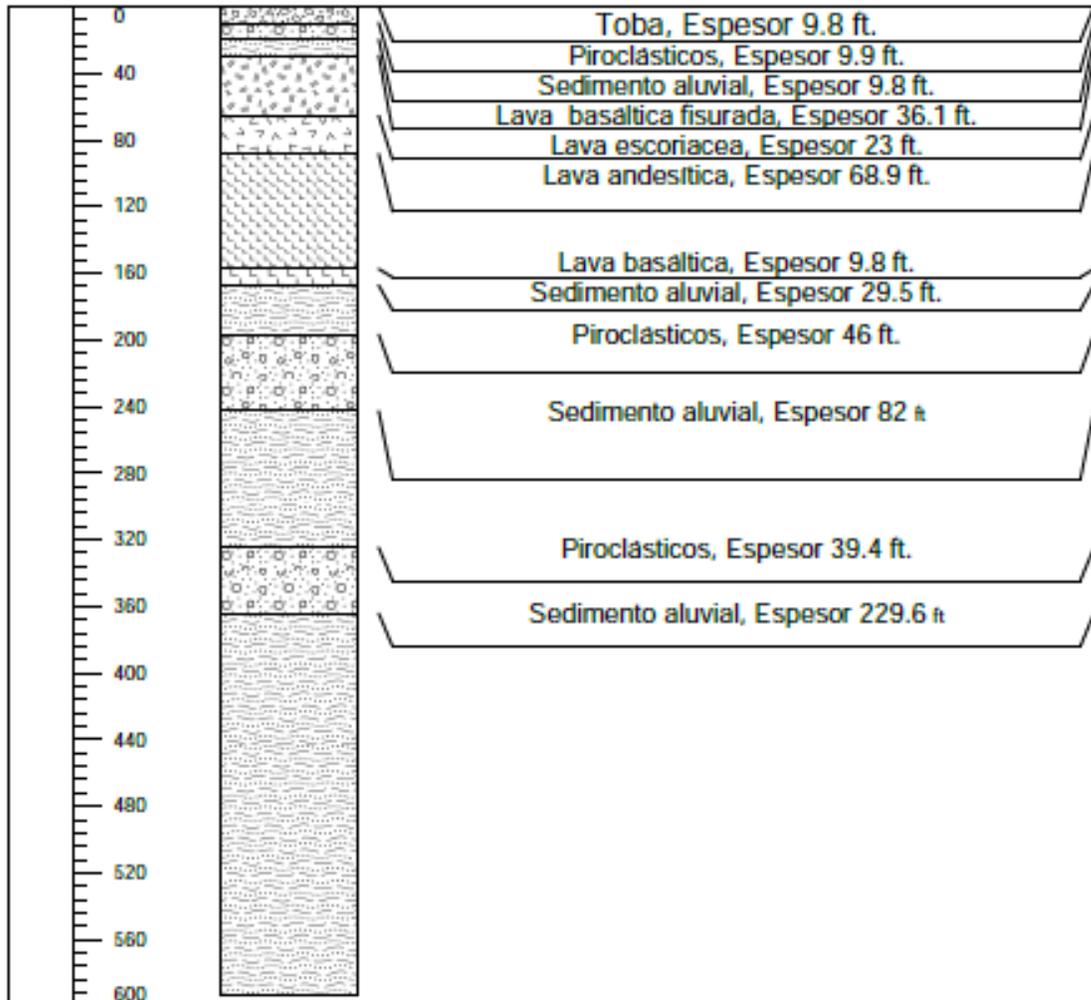
Nivel Estático (ft)
160
Diámetro de la perforación
17 pulgadas

Pozo de Explotación
Apopa, San Salvador

Autora: Andrea Molgar

POZO BODEGAS HILCASA, Apopa, San Salvador CDD EL ÁNGEL

Profundidad en pies (ft)



Coordenadas
296070 N
478636 W

Elevación (metros)
480

Nivel Estático (ft)
204

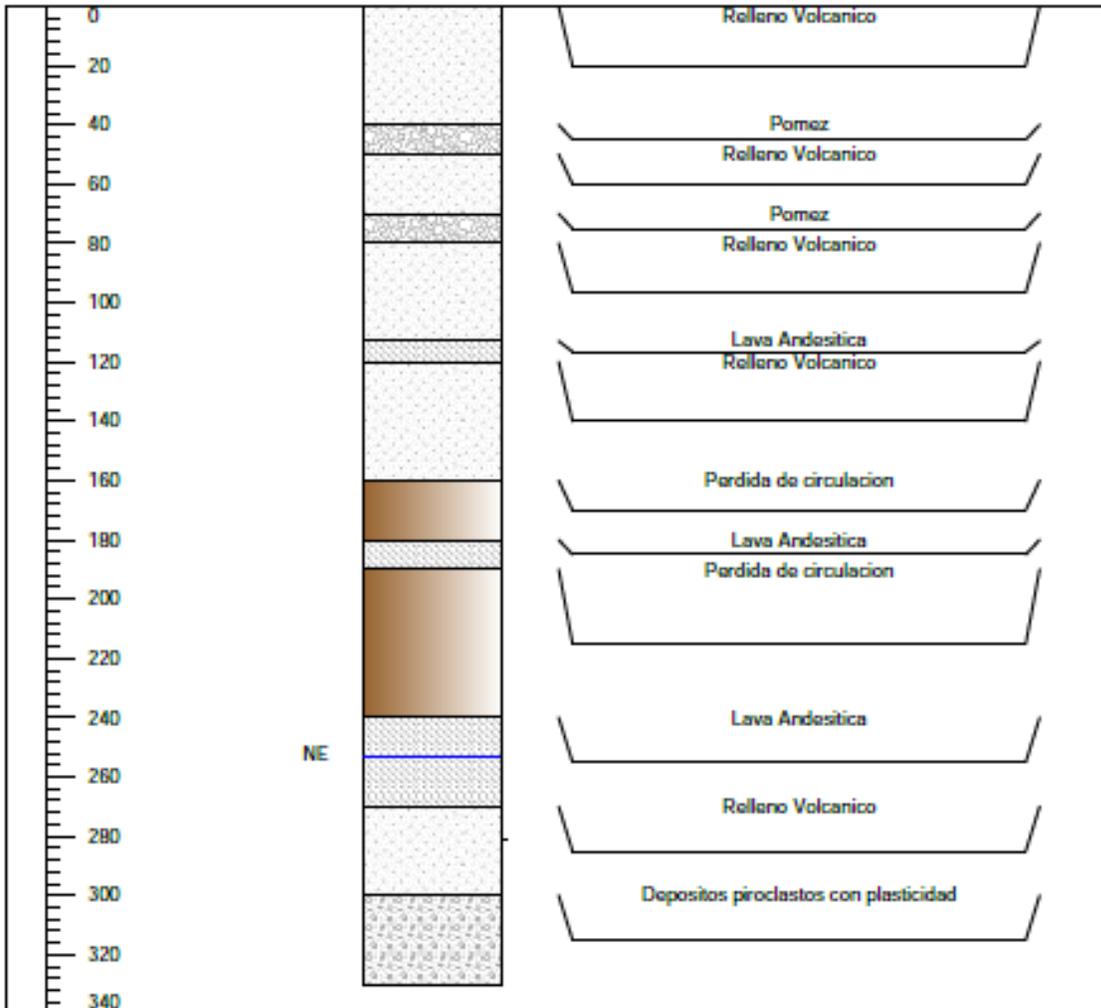
Diámetro de la perforación
8 pulgadas

Pozo de Monitoreo
Municipio: Apopa

Autora: Andrea Molgar

Pozo Plaza Integración, redondel Constitución, Nejapa, San Salvador.

Profundidad en pies (ft)



Coordenadas
295256 N
477474 W

Elevación (msnm)
525

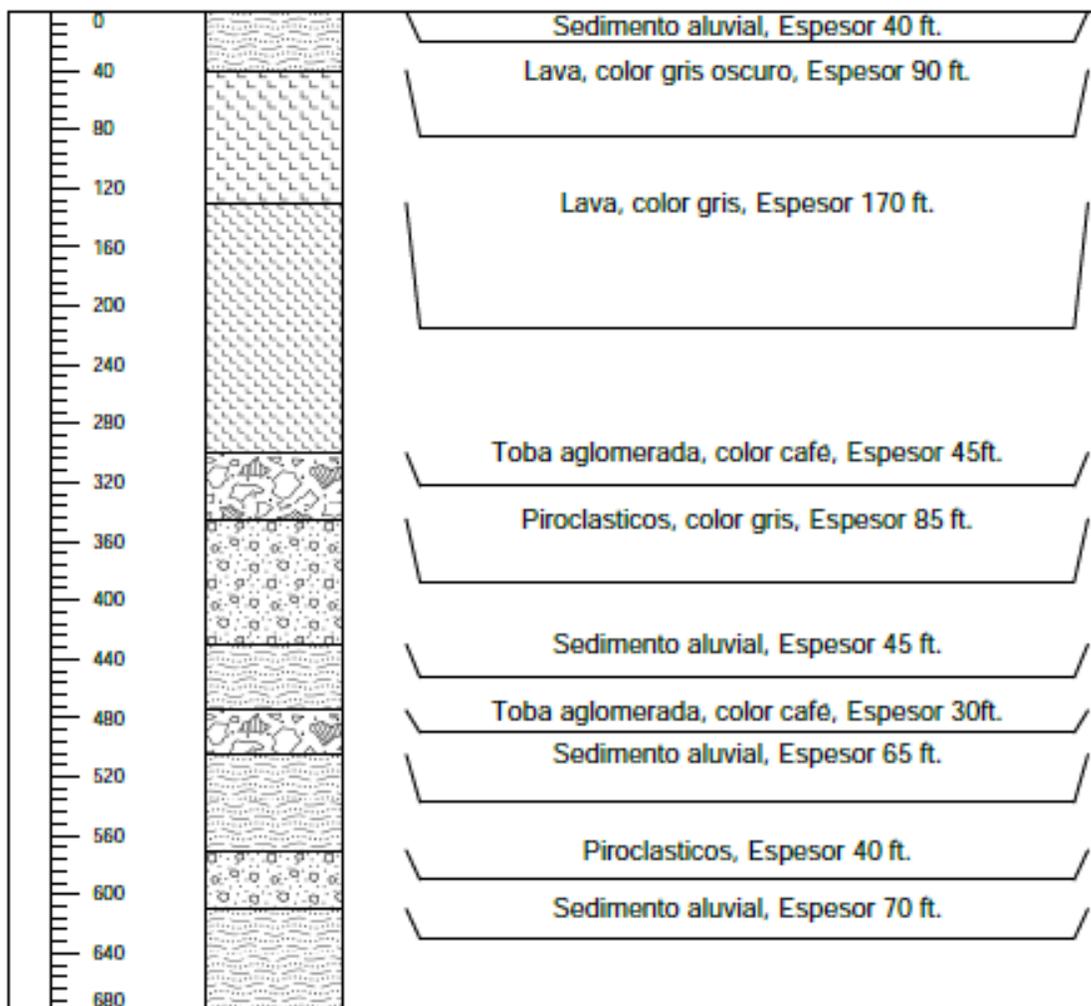
Nivel Estático (ft)
249
Diámetro de la perforación
12 pulgadas

Pozo de Monitoreo
Municipio de Nejapa

Autora: Andrea Molgar

Pozo Cementerio Jardín Monte Los Olivos

Profundidad en pies (ft)



Coordenadas
296683 N
479734 W

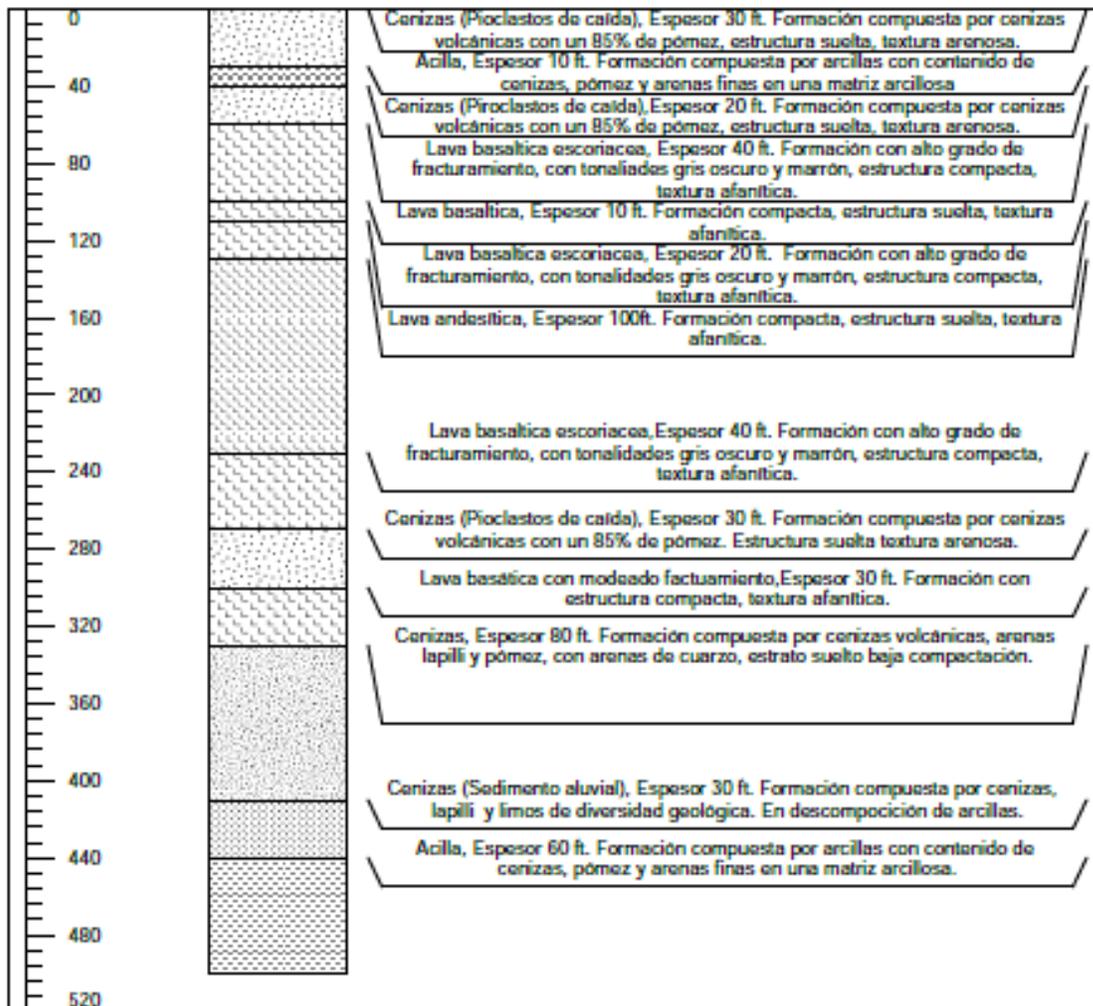
Nivel Estático (ft)
155

Elevación (msnm)
476

Autora: Andrea Molgar

CORPORACIÓN DE BEBIDAS Y ALIMENTOS S. A DE C.V (COBEA 1)

Profundidad en pies (ft)



Coordenadas
295923 N
478193 W

Nivel Estático (ft)
175
Diámetro de la perforación
6 pulgadas

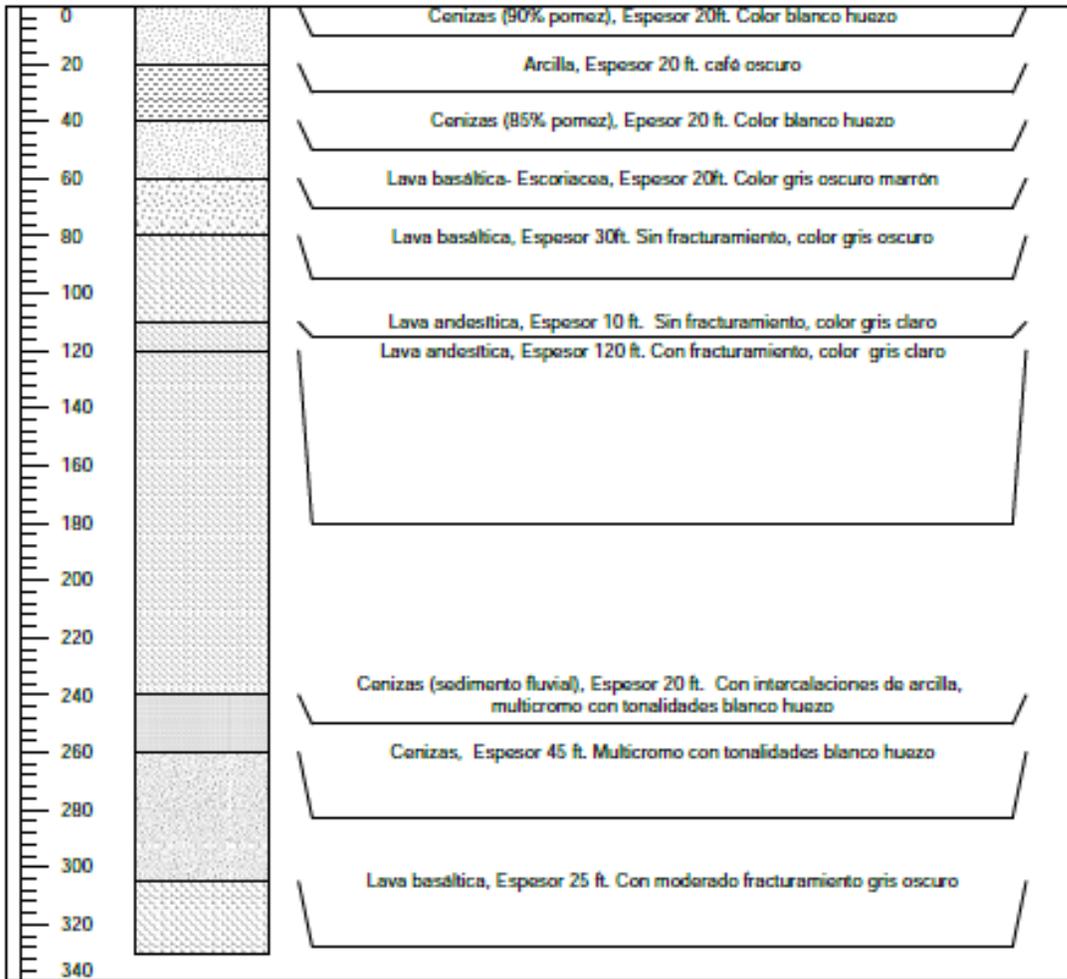
Elevación (msnm)
495

Pozo de Monitoreo
Municipio: Apopa

Autora: Andrea Molgar

CORPORACIÓN DE BEBIDAS Y ALIMENTOS S. A DE C.V (COBEA)

Profundidad en pies (ft)



Coordenadas
295923 N
478193 W

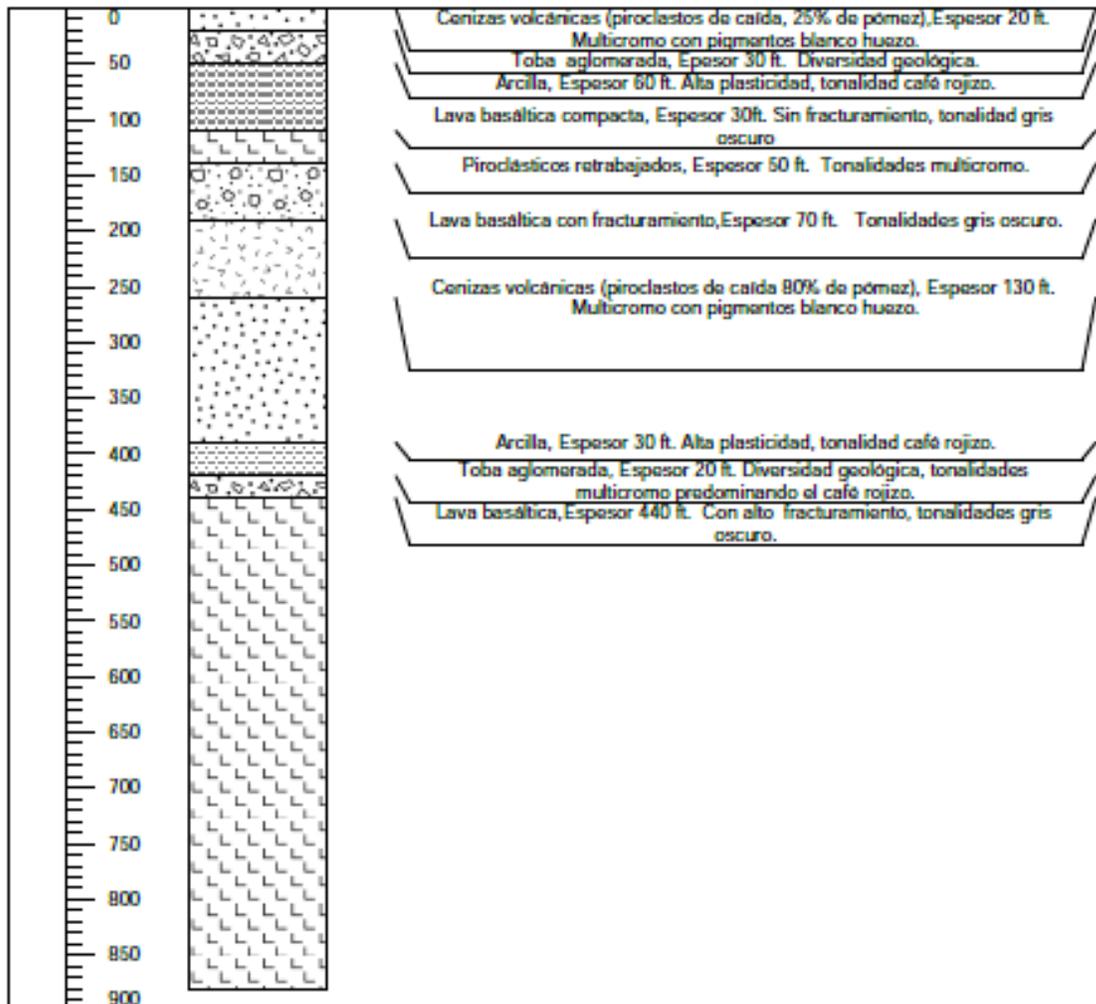
Nivel Estático (ft)
175
Diámetro de la perforación
6 pulgadas

Elevación (msnm)
495

Autora: Andrea Molgar

POZO 1 SECTOR EL ÁNGEL, Apopa, San Salvador

Profundidad en pies (ft)



Coordenadas
297605 N
478416 W

Nivel Estático (ft)
204

Diámetro de la perforación
12 pulgadas

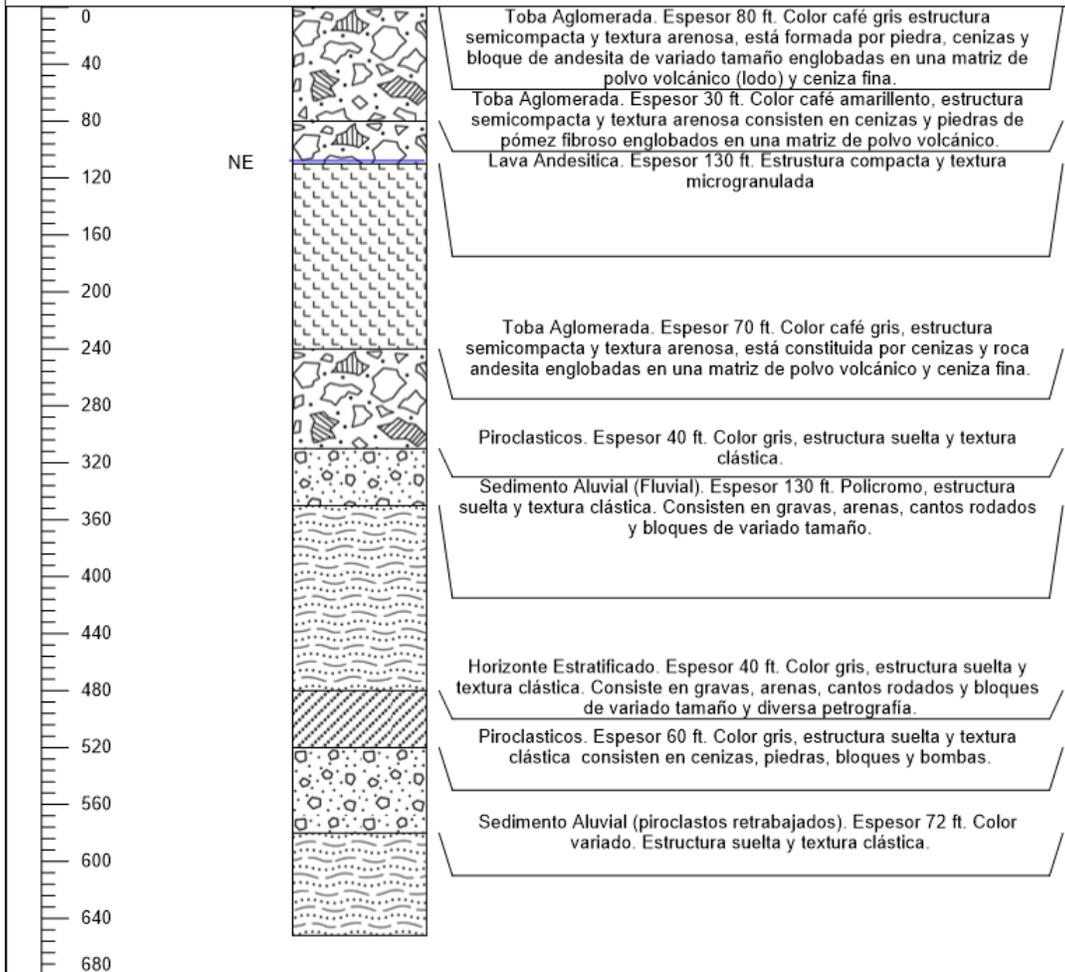
Elevación (msnm)
420

Pozo Propiedad de ANDA
Municipio: Apopa

Autora: Andrea Molgar

Pozo Palo Alto, Apopa, San Salvador.

Profundidad en pies (ft)



Coordenadas
295494 N
476679 W

Elevación (msnm)
580

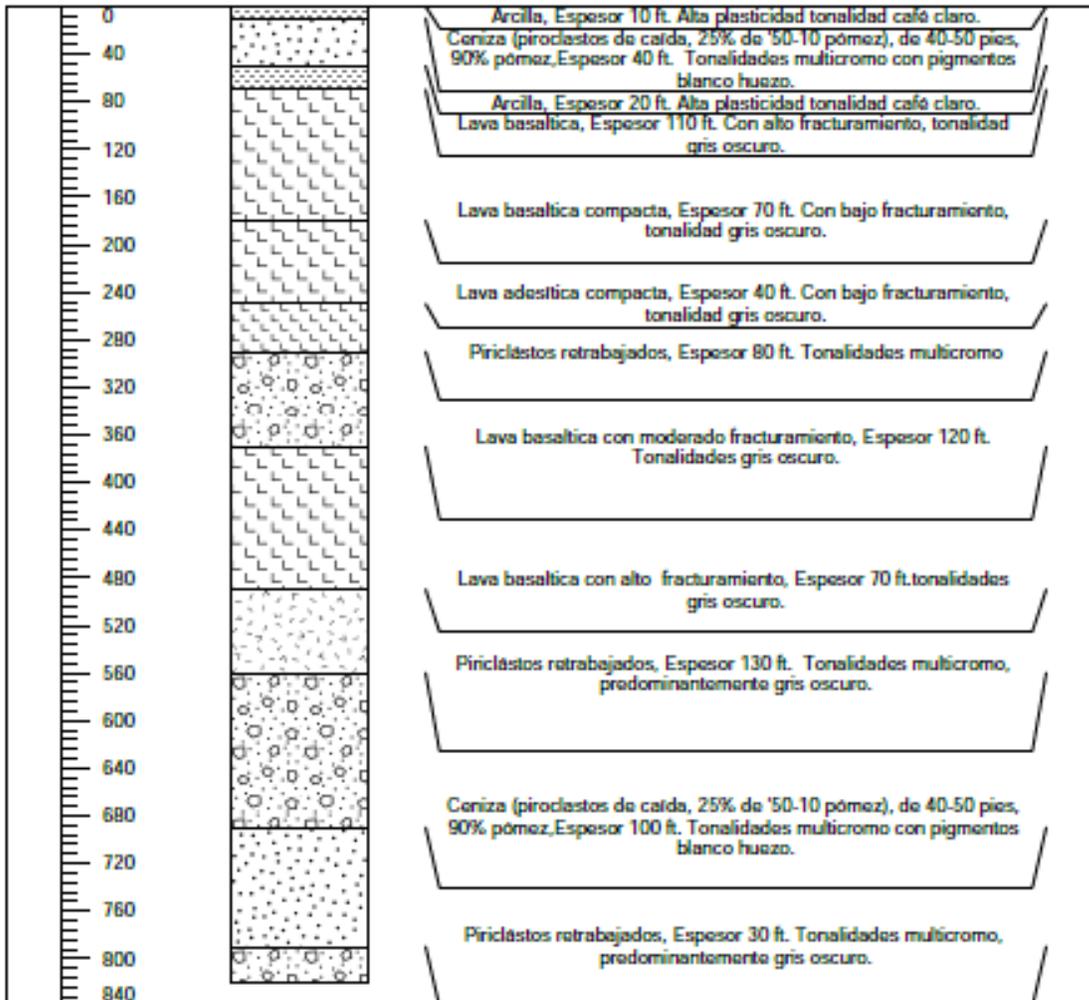
Nivel Estático (ft)
107
Diámetro de la perforación
8 pulgadas

Pozo de Explotación
Apopa, San Salvador

Autora: Andrea Melgar

POZO 1 SECTOR DE INSINCA, Apopa, San Salvador

Profundidad en pies (ft)



Coordenadas
298445 N
482325 W

Nivel Estático (ft)
93.33

Diámetro de la perforación
12 pulgada

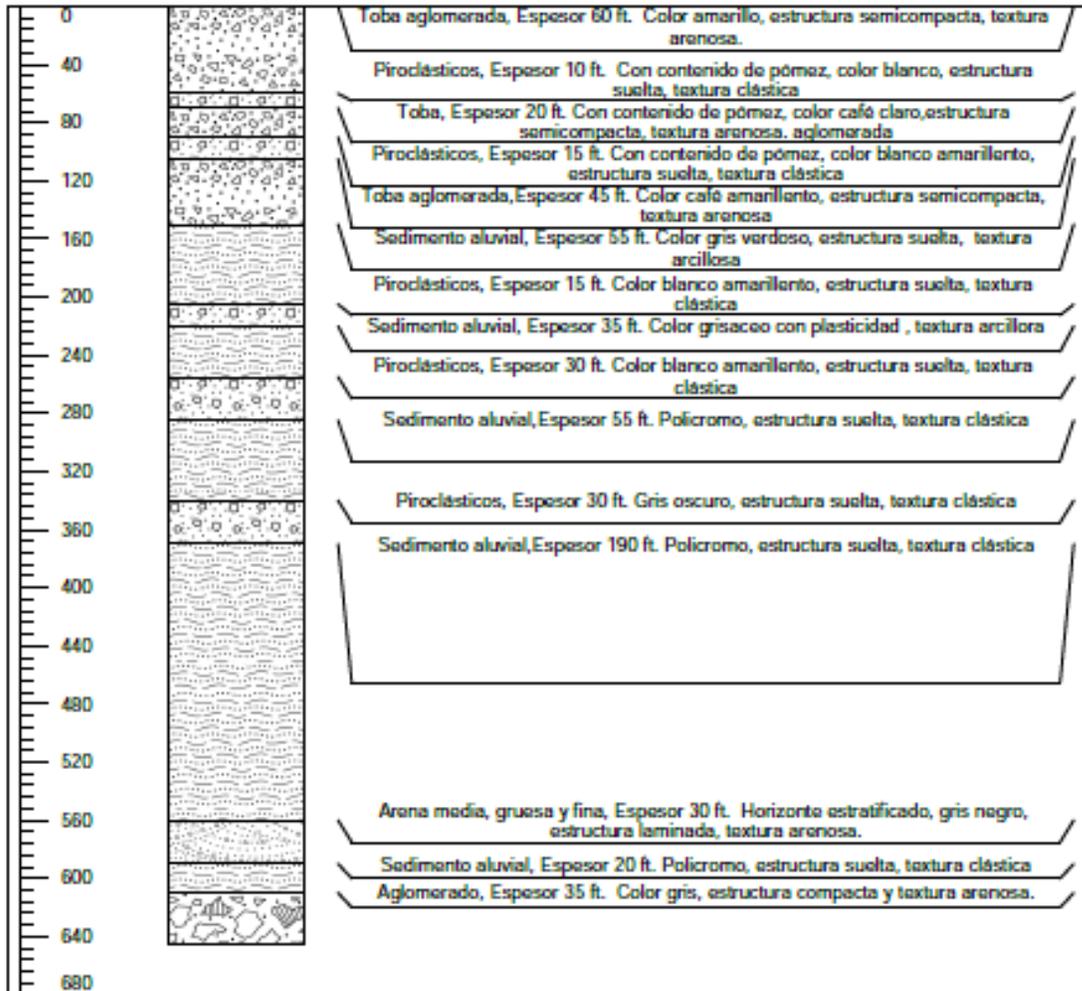
Elevación (msnm)
418

Pozo de Monitoreo
Municipio: Apopa

Autora: Andrea Molgar

Pozo Madre Tierra

Profundidad en pies (ft)



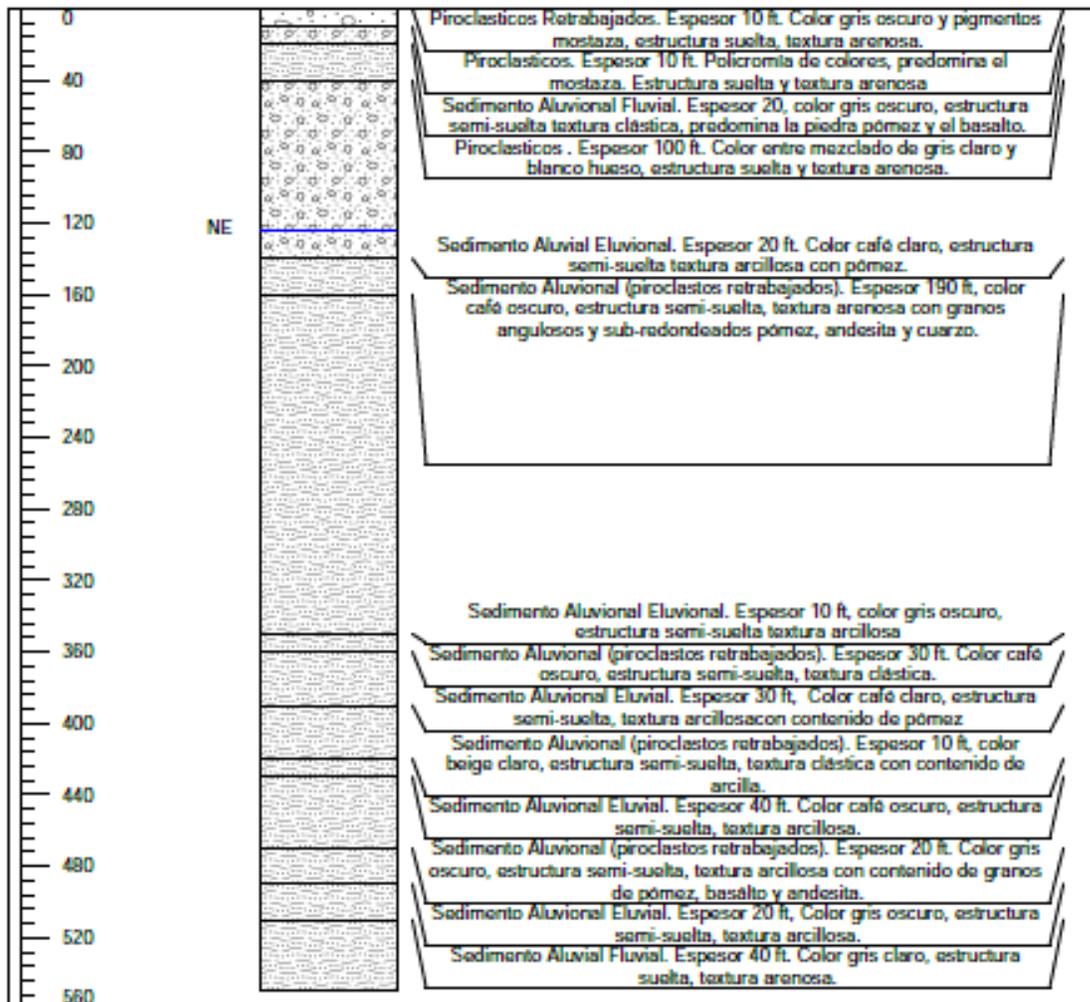
Coordenadas
298318 N
480125 W

Nivel Estático (ft)
96

Autora: Andrea Melgar

Pozo 2 Popotlan, Apopa, San Salvador.

Profundidad en pies (ft)



Coordenadas
297675,69 N
482205,1 W

Elevación (msnm)
447

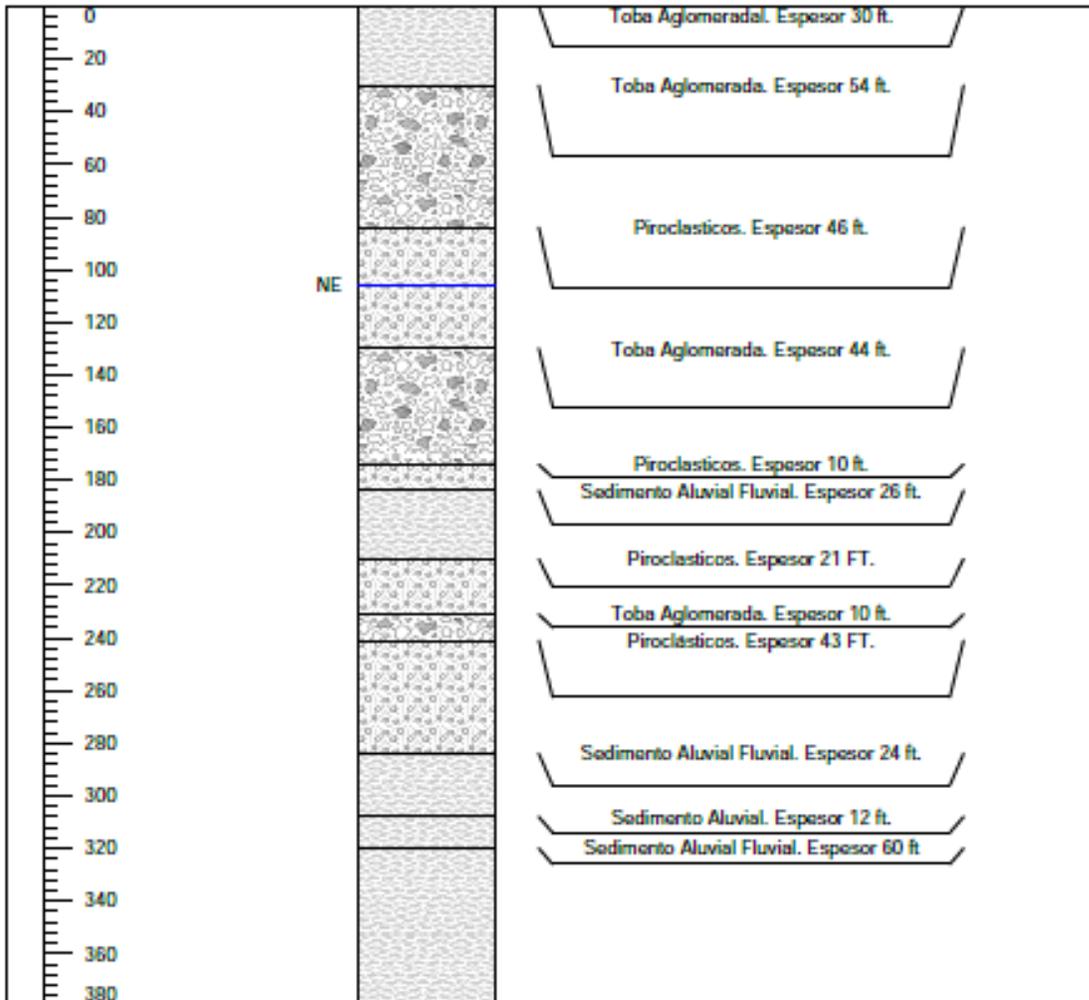
Nivel Estático (ft)
127
Diámetro de la perforación
15 pulgadas

Pozo de Explotación
Apopa, San Salvador

Autora: Andrea Melgar

Pozo Santa Marta, Apopa, San Salvador.

Profundidad en pies (ft)



Coordenadas
295900 N
481225 W

Elevación (msnm)
470

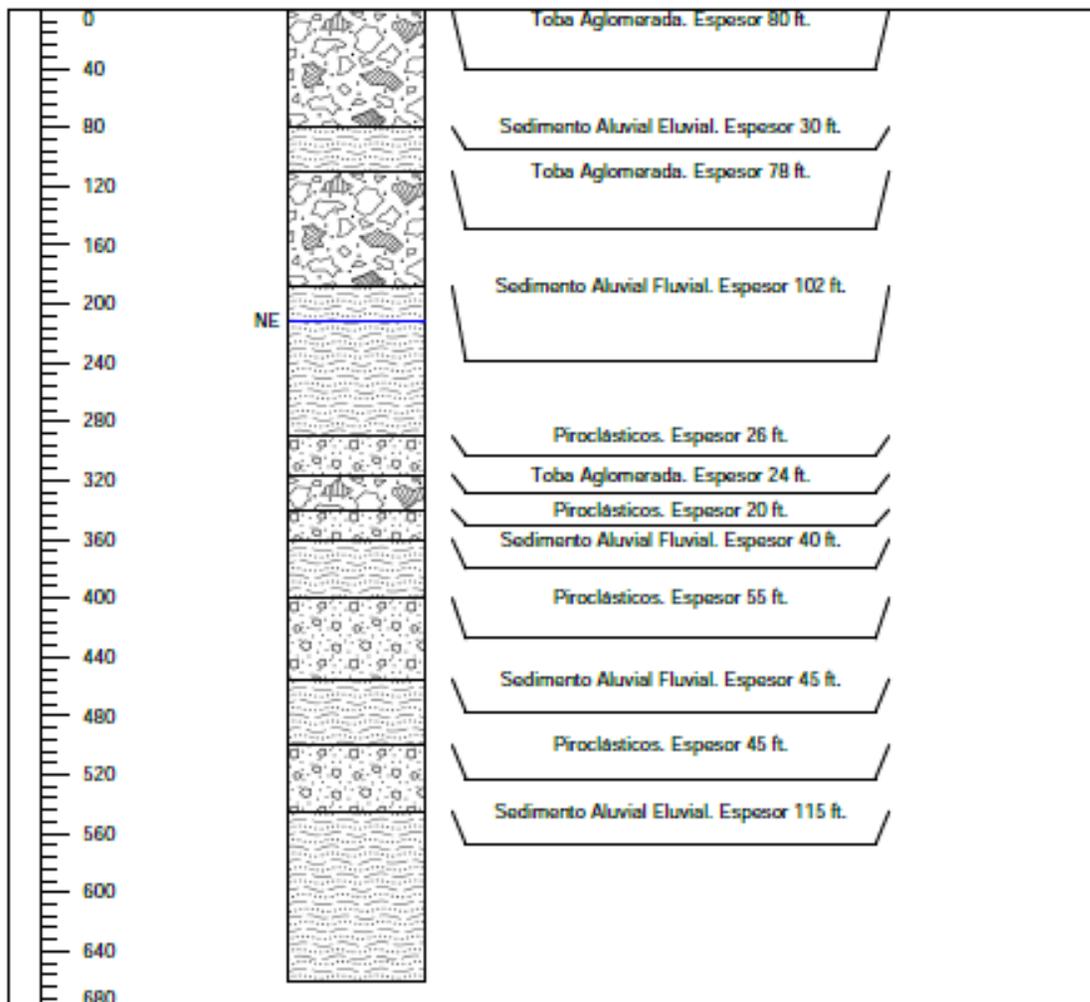
Nivel Estático (ft)
107.42
Diámetro de la perforación
8 pulgadas

Pozo de Explotación
Apopa, San Salvador

Autora: Andrea Melgar

Pozo Valle Verde, Apopa, San Salvador.

Profundidad en pies (ft)



Coordenadas
297085, 65 N
481900, 1W

Elevación (msnm)
461

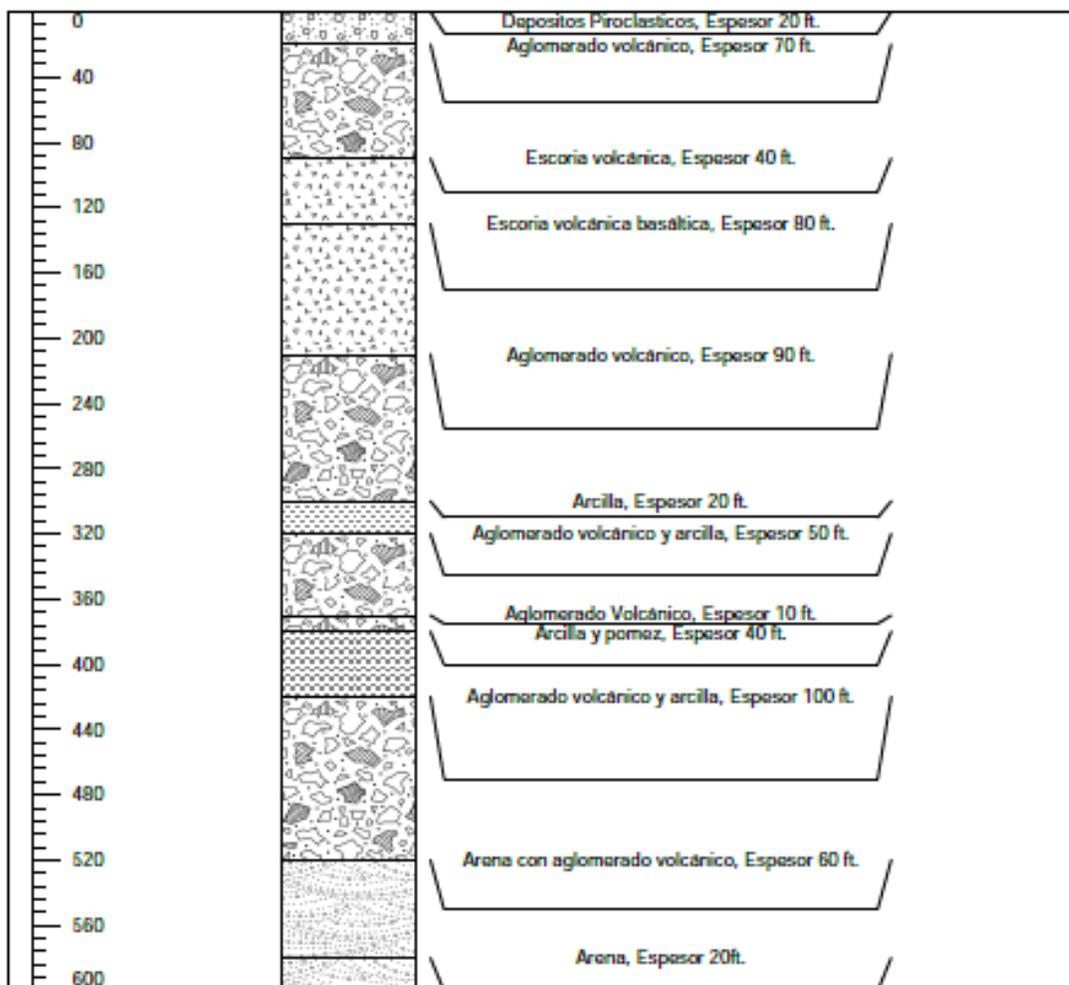
Nivel Estático (ft)
214.68
Diámetro de la perforación
10 pulgadas

Pozo de Explotación
Apopa, San Salvador

Autora: Andrea Melgar

Pozo RANSA, Nejapa, San Salvador.

Profundidad en pies (ft)



Coordenadas
295044,07 N
478036,48 W

Nivel Estático (ft)
221

Elevación (msnm)
511

Pozo de Explotación
Nejapa, San Salvador

Autora: Andrea Melgar

Pozo La Cancha, Apopa, San Salvador.

Profundidad en pies (ft)



Coordenadas
297625 N
479525 W

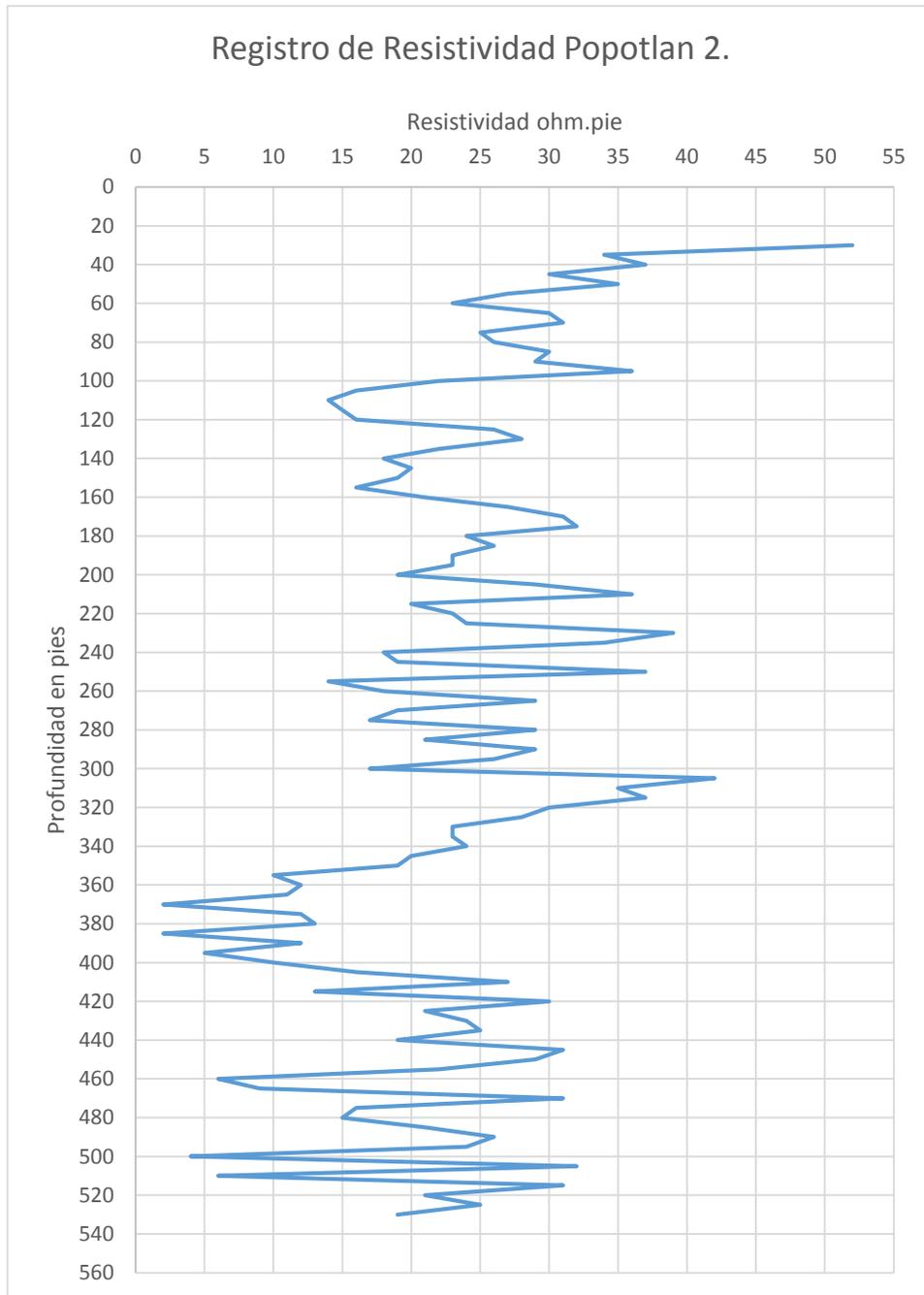
Nivel Estático (ft)
146

Elevación (msnm)
460

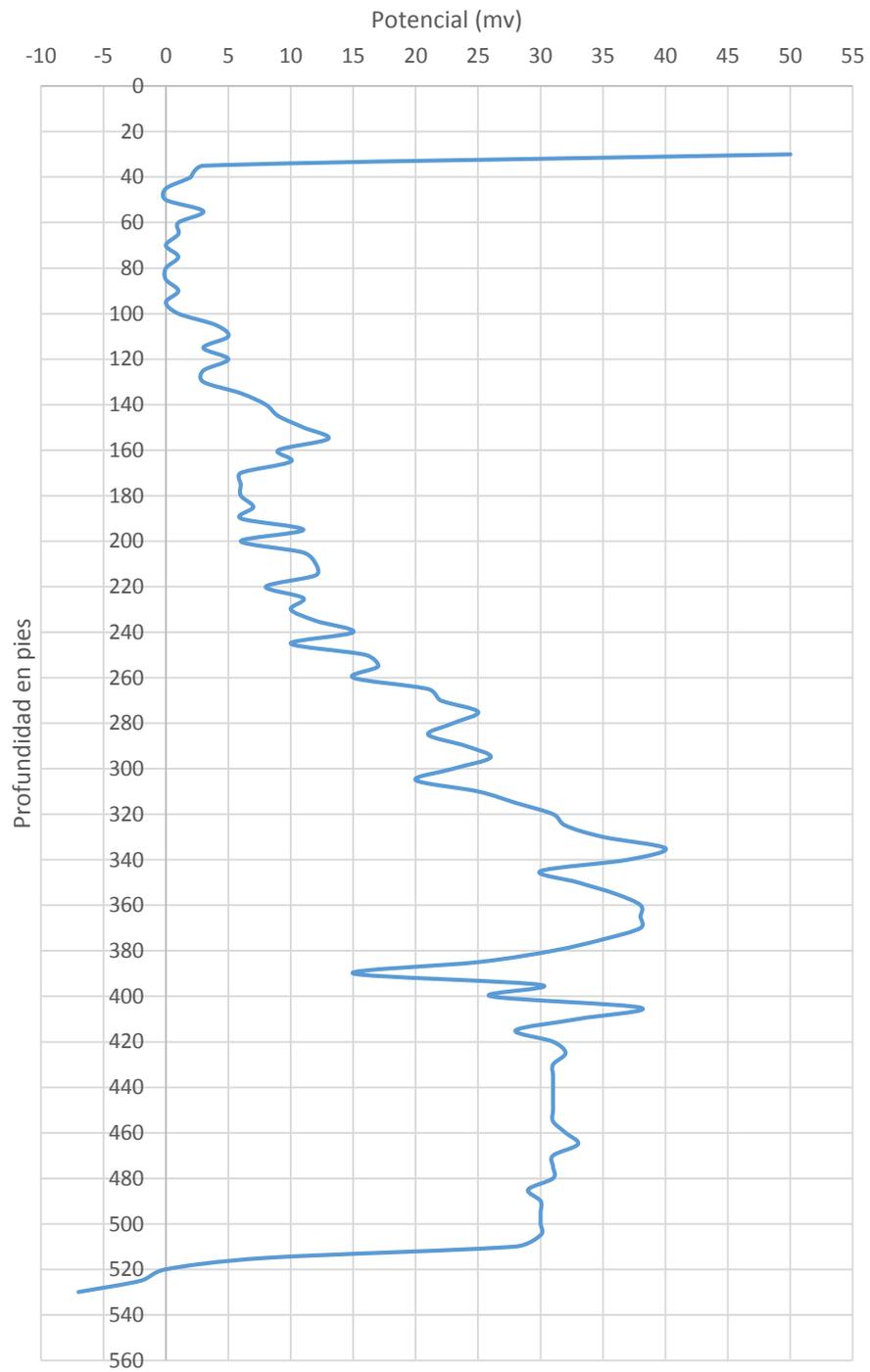
Pozo de Explotación
Apopa, San Salvador

Autora: Andrea Melgar

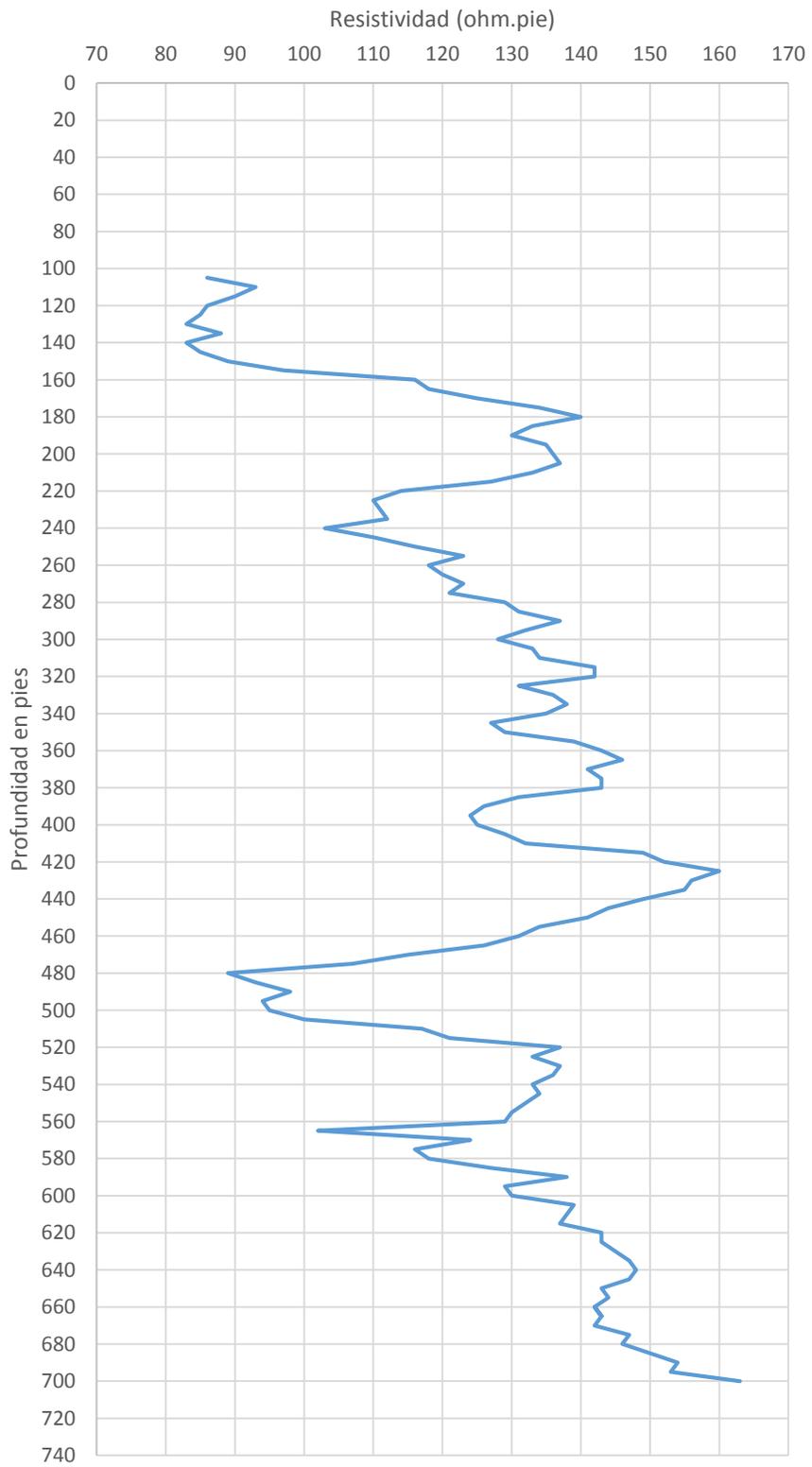
Anexo II. Registros Geofísicos.



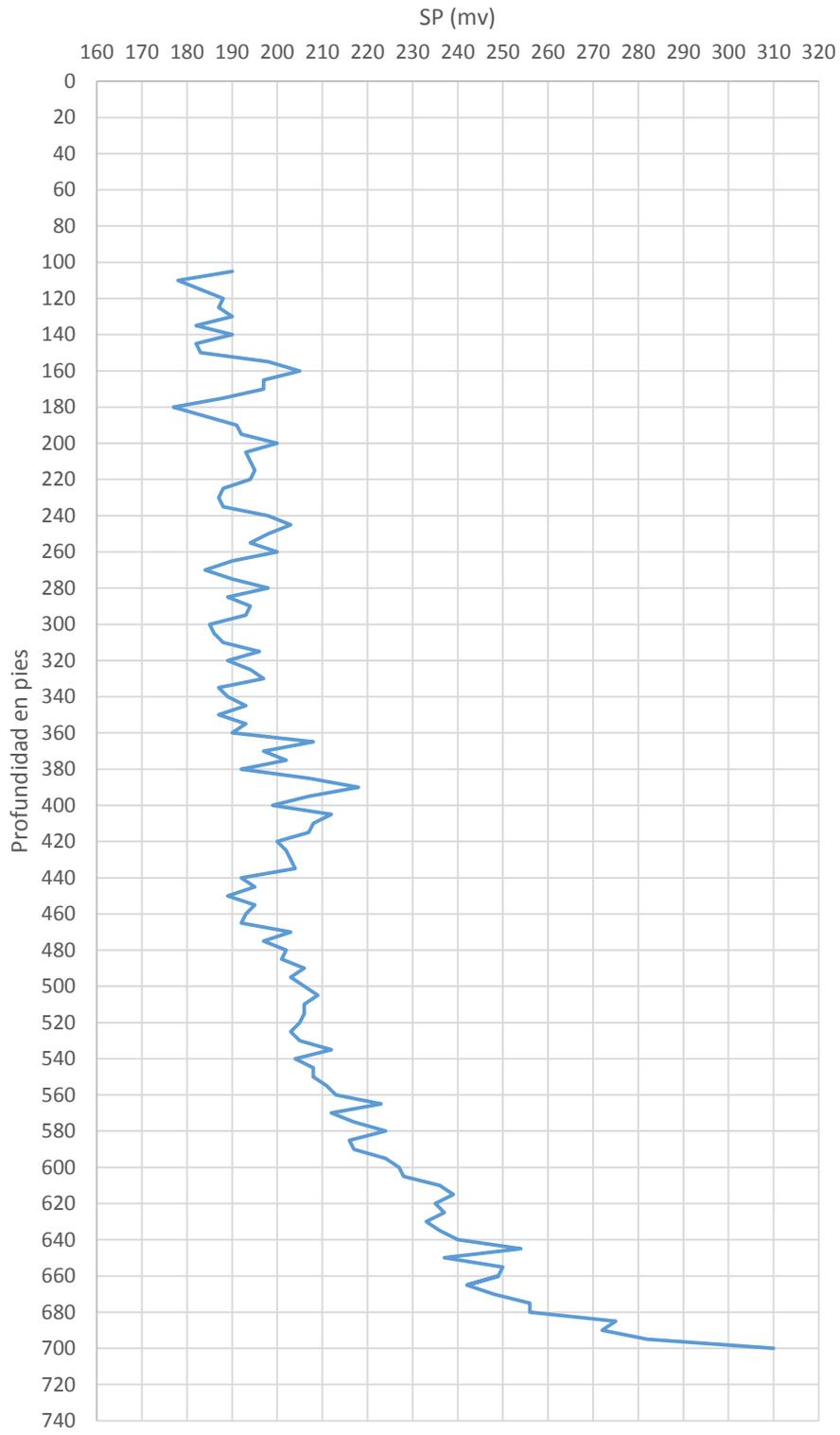
Registro de SP Popotlan 2.



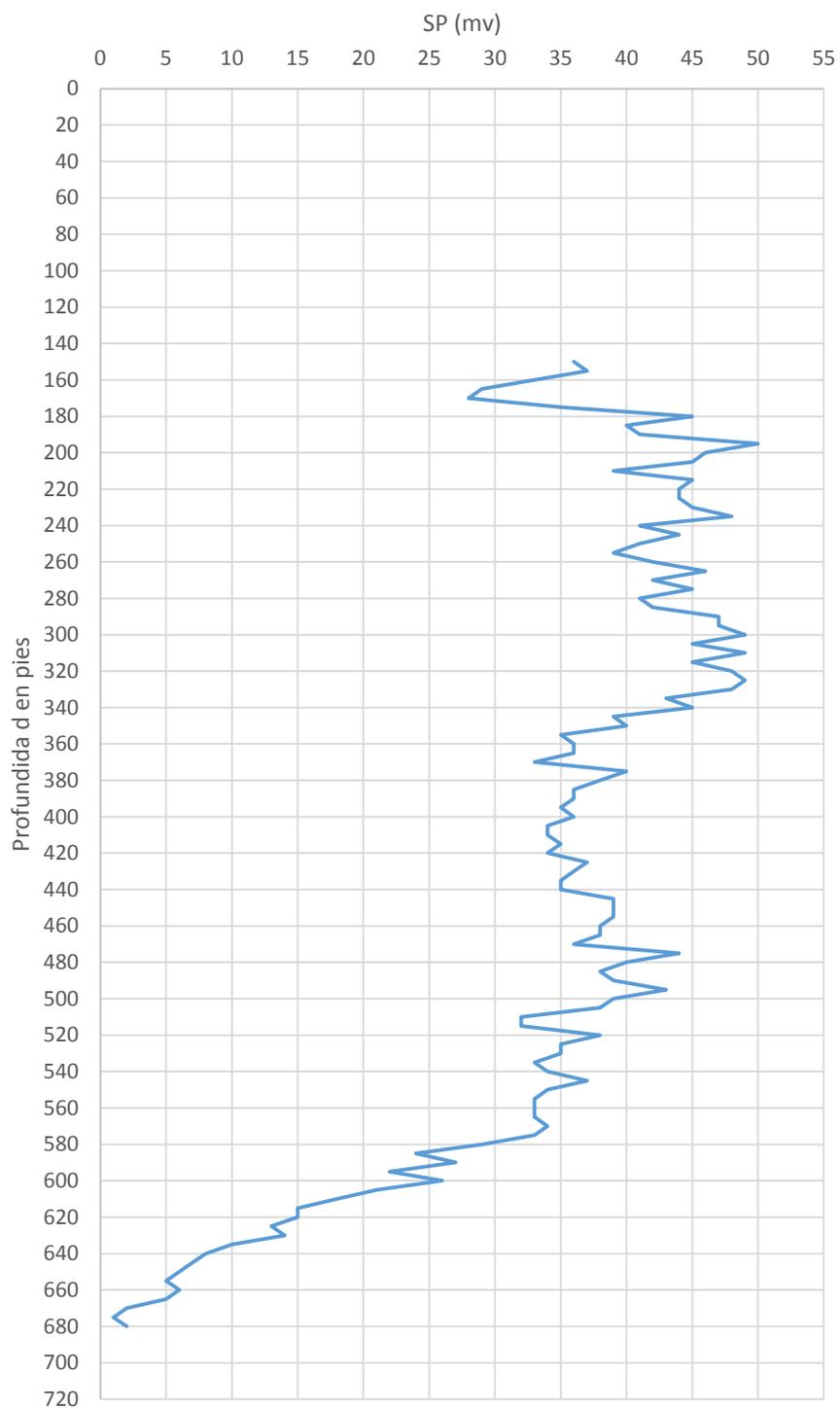
Registro de Resistividad Pozo La Cancha



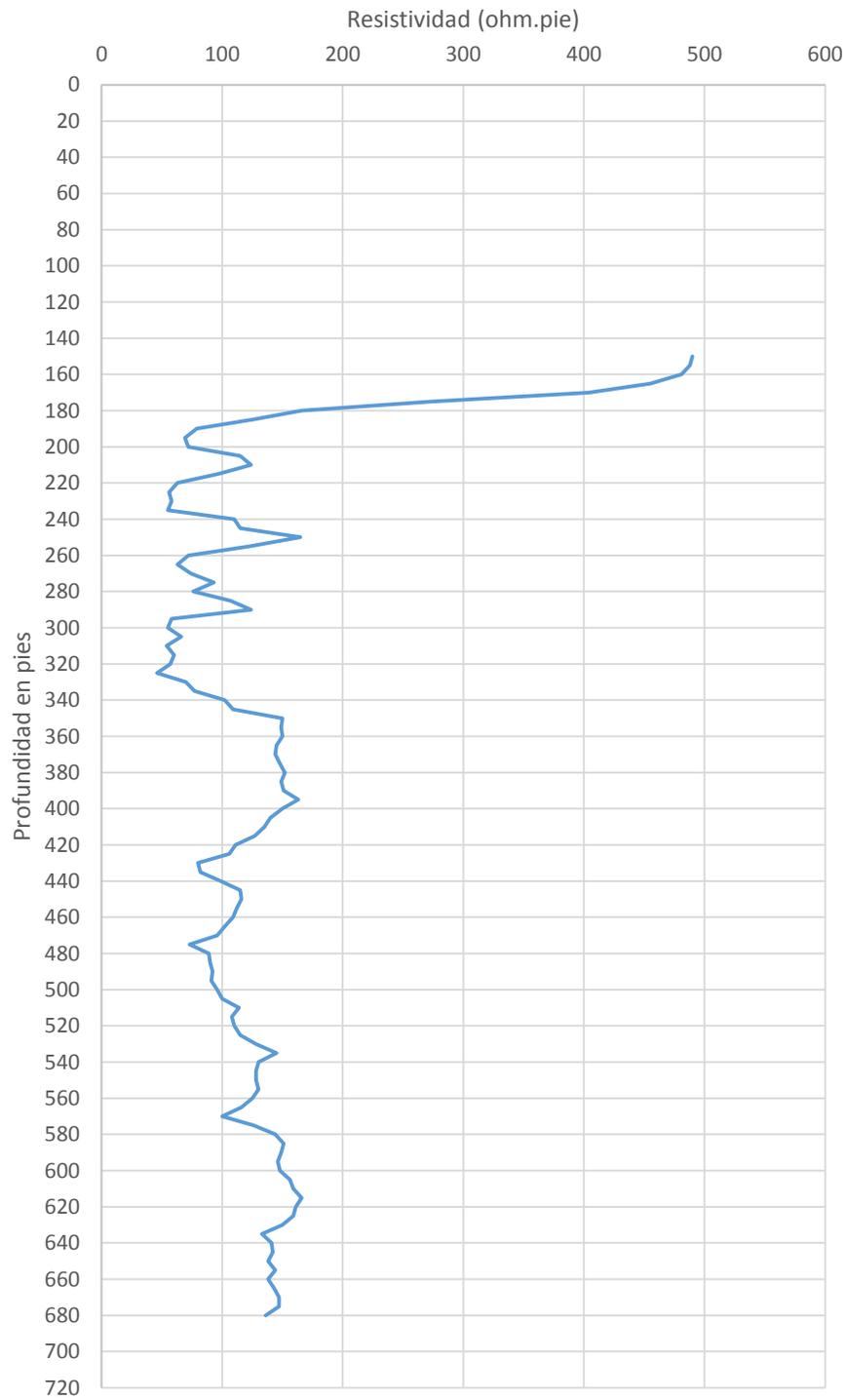
Registro de SP. Pozo La Cancha.



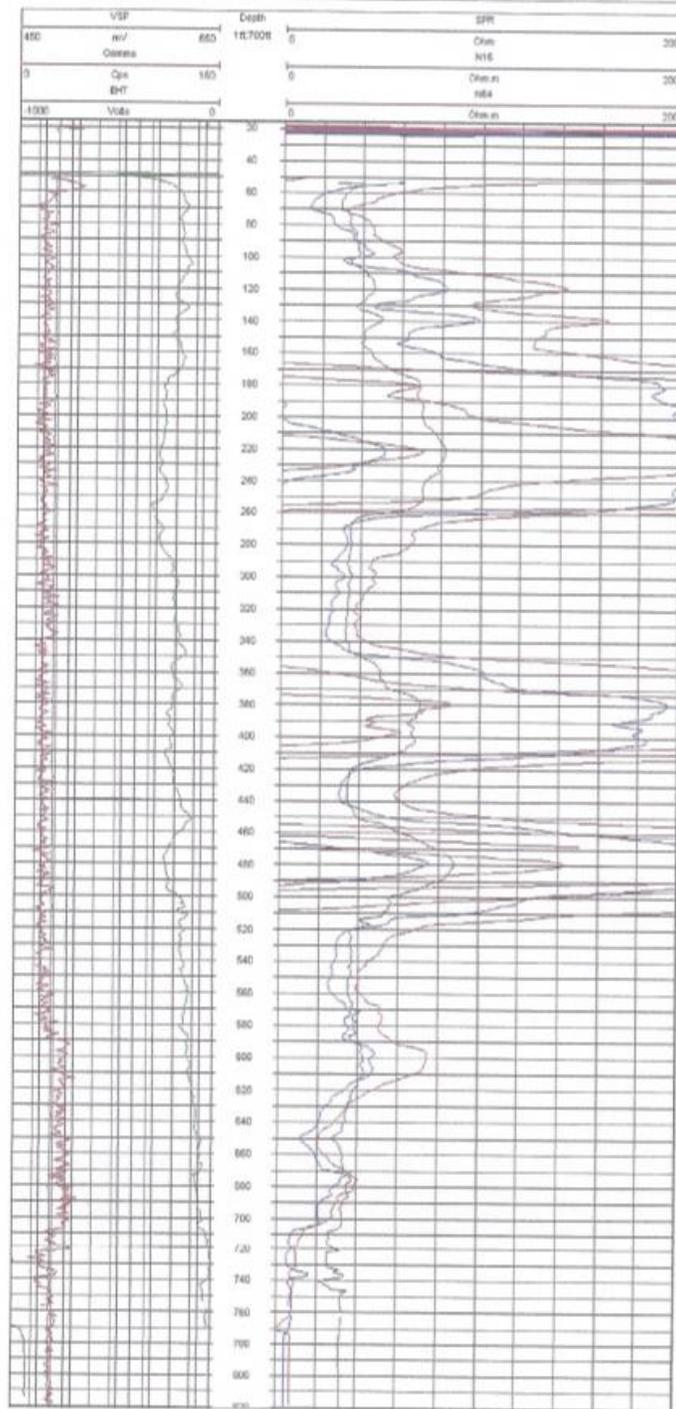
Registro de SP. Pozo Cementerio Jandín Monte Los Olivos.



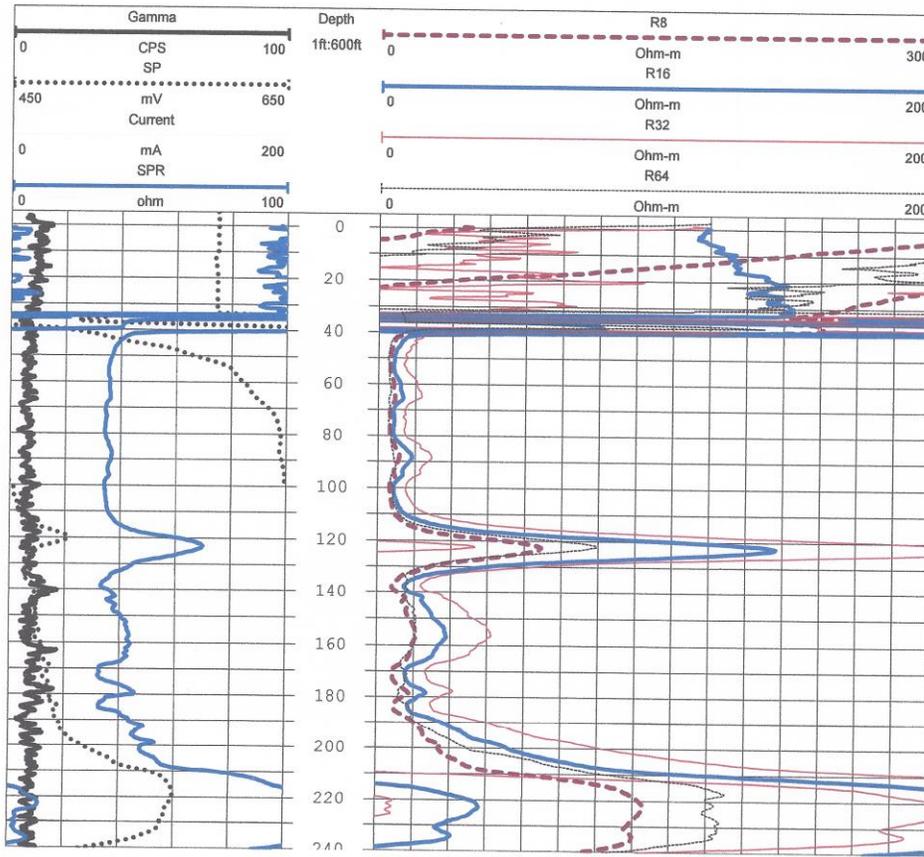
Registro de Resistividad. Pozo Cementerio Jandín Monte Los Olivos.

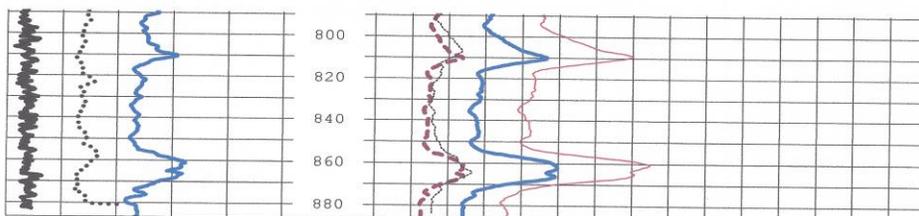
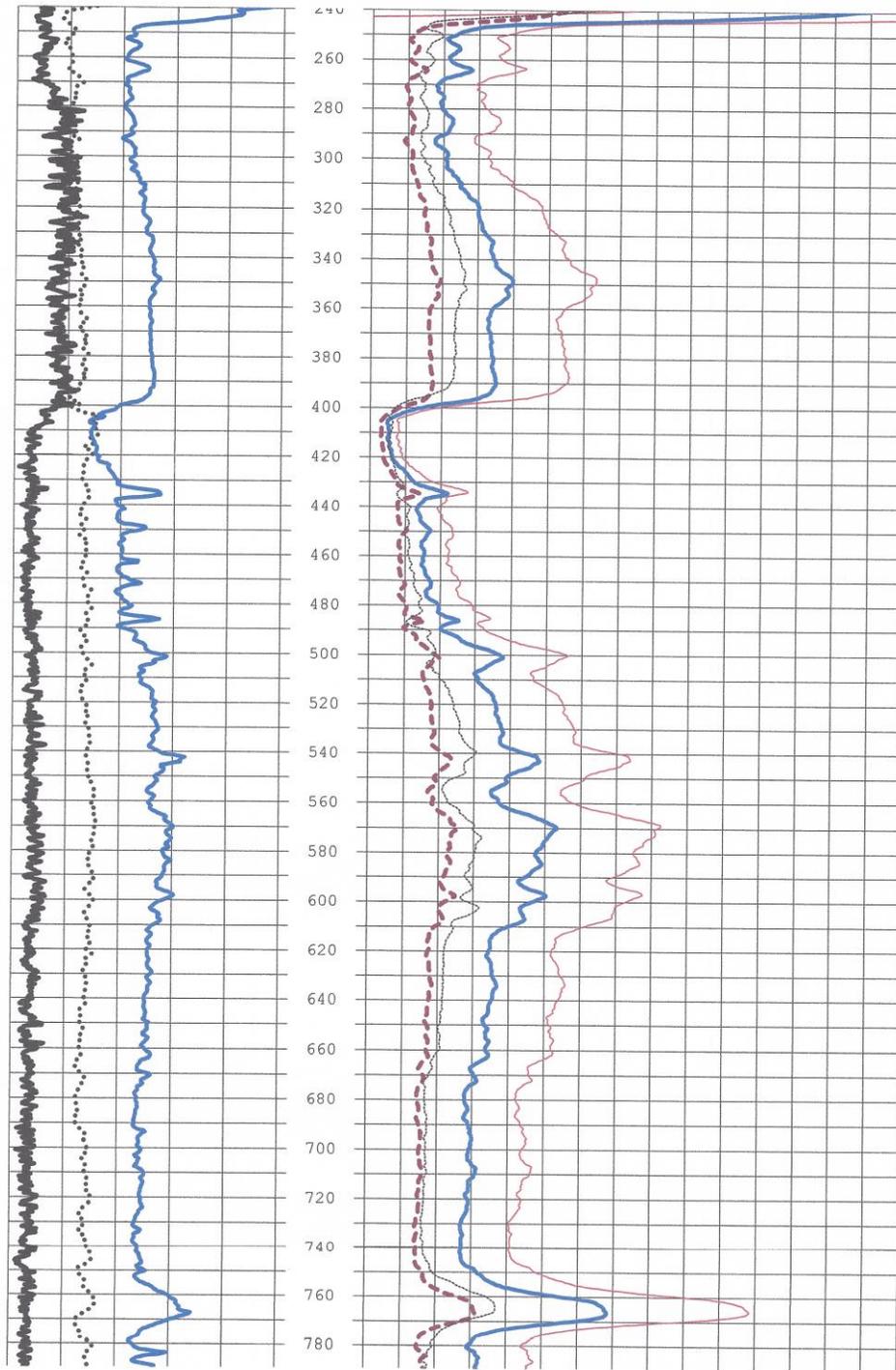


POZO INSINCA



POZO EL ÁNGEL





Anexo III. Parámetros Hidrogeológicos.

POZO COBEA 1

Radio (m) = 0.1016
 Descenso (m) = -1.64

Radio (m) = 1.016
 Descenso (m) = 15.04

$$m = \frac{S_2 - S_1}{\log S_2 - \log S_1}$$

m (m/m) = 16.68 OJO

B CALCULO DE T $m = 0.183 \frac{Q}{T}$

$$T = 0.183 \frac{Q}{m}$$

T (m²/d) = 5.497 OJO

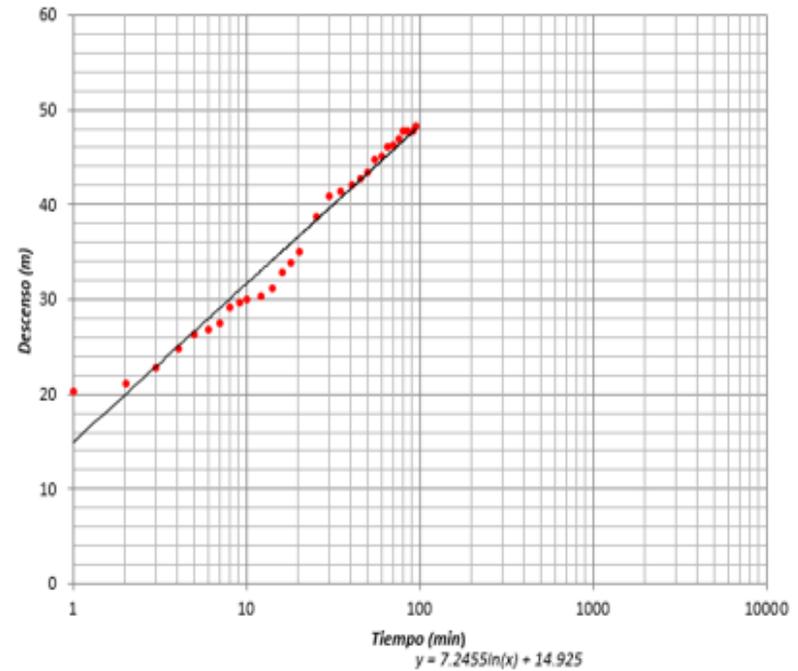
B CALCULO DE S

r = 0.1016 m
 to = 0.1 min
 to = 0.00007 Dias

$$s = 2.25 \frac{Txt_o}{r^2}$$

S = 0.083203

ACUIFERO CONFINADO



POZO EL ANGEL

Radio (m) = 0.1524
 Descenso (m) = 6.27

Radio (m) = 1.524
 Descenso (m) = 6.42

$$m = \frac{S_2 - S_1}{\log S_2 - \log S_1} \quad m \text{ (m/m)} = 0.15 \quad \text{OJO}$$

B CALCULO DE T $m = 0.183 \frac{Q}{T}$

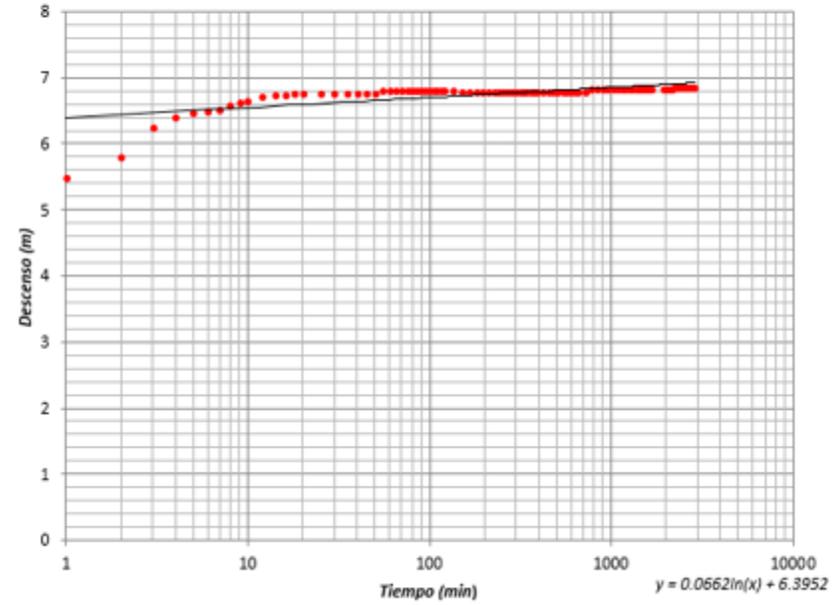
$$T = 0.183 \frac{Q}{m} \quad T \text{ (m}^2/\text{d)} = 6638.518 \quad \text{OJO}$$

B CALCULO DE S

r = 0.1524 m
 to = 0.0 min
 to = 0.00000 Dias

$$s = 2.25 \frac{Txt_0}{r^2} \quad s = 0.000000$$

ACUIFERO CONFINADO



POZO INSINCA

Radio (m) = 0.1524
 Descenso (m) = 3.94

Radio (m) = 1.524
 Descenso (m) = 4.05

$$m = \frac{S_2 - S_1}{\log S_2 - \log S_1} \quad m \text{ (m/m)} = 0.11 \quad \text{OJO}$$

B CALCULO DE T $m = 0.183 \frac{Q}{T}$

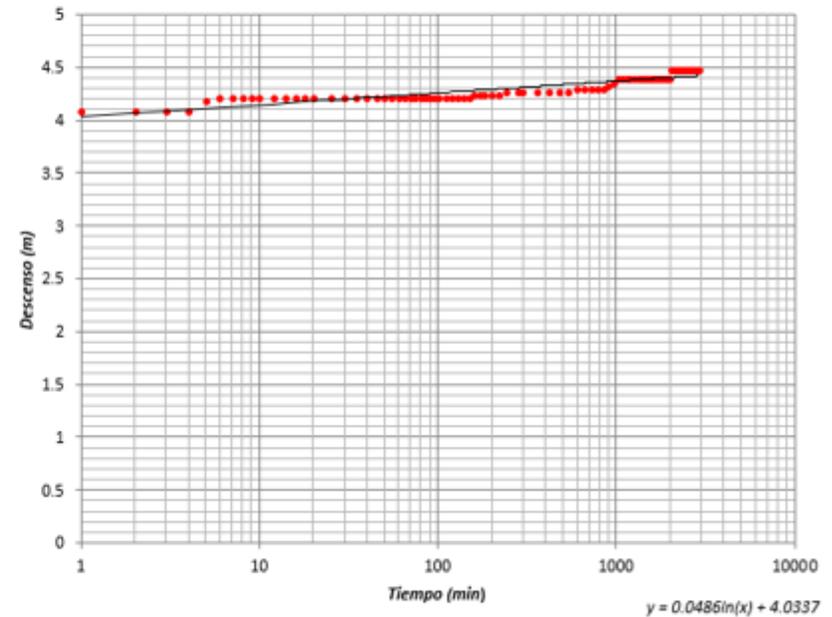
$$T = 0.183 \frac{Q}{m} \quad T \text{ (m}^2\text{/d)} = 9805.640 \quad \text{OJO}$$

B CALCULO DE S

$r = 0.1524 \text{ m}$
 $t_0 = 0.0 \text{ min}$
 $t_0 = 0.00000 \text{ Dias}$

$$s = 2.25 \frac{Txt_0}{r^2} \quad s = 0.000000$$

ACUIFERO CONFINADO



POZO LA CANCHA

Radio (m) = 0.127
 Descenso (m) = 12.98

Radio (m) = 1.27
 Descenso (m) = 24.61

$$m = \frac{S_2 - S_1}{\log S_2 - \log S_1} \quad m \text{ (m/m)} = 11.63 \text{ OJO}$$

B CALCULO DE T $m = 0.183 \frac{Q}{T}$

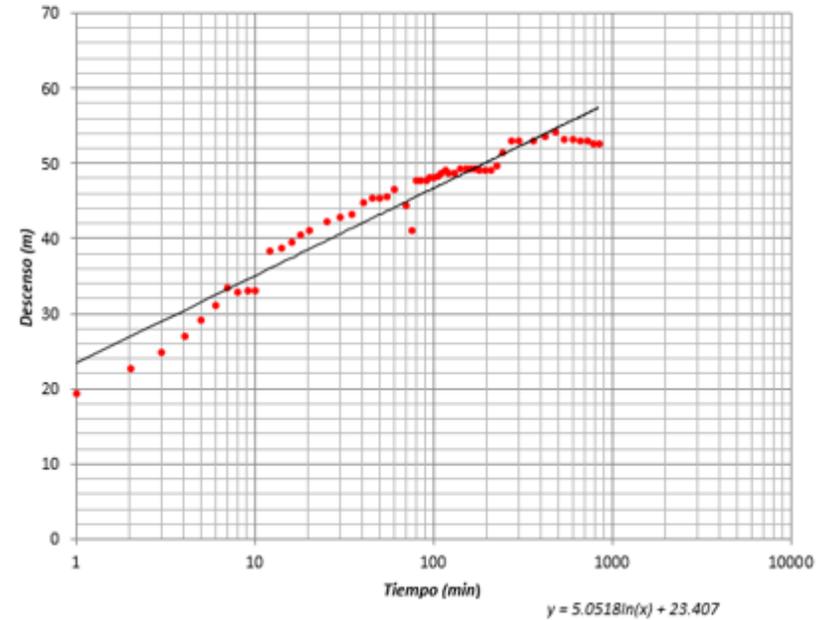
$$T = 0.183 \frac{Q}{m} \quad T \text{ (m}^2/\text{d)} = 16.723 \text{ OJO}$$

B CALCULO DE S

$$s = 2.25 \frac{Txt_o}{r^2} \quad s = 0.000000$$

$r = 0.127 \text{ m}$
 $to = 0.0 \text{ min}$
 $to = 0.00000 \text{ Dias}$

ACUIFERO CONFINADO



PLAZA INTEGRACIÓN

Radio (m) = 0.1016
 Descenso (m) = 0.39

Radio (m) = 1.016
 Descenso (m) = 0.39

$$m = \frac{S_2 - S_1}{\log S_2 - \log S_1} \quad m \text{ (m/m)} = 0.01 \quad \text{OJO}$$

B CALCULO DE T $m = 0.183 \frac{Q}{T}$

$$T = 0.183 \frac{Q}{m} \quad T \text{ (m}^2\text{/d)} = 18051.293 \quad \text{OJO}$$

B CALCULO DE S

r = 0.1016 m
 to = 0.0 min
 to = 0.000000 Dias

$$s = 2.25 \frac{Txt_o}{r^2} \quad S = 0.000000$$

ACUIFERO CONFINADO

