

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA CENTROAMERICANA DE GEOLOGÍA

**Modelo hidrogeológico conceptual de un sector al sur de  
la margen izquierda del río Virilla, San José, Costa Rica.**

PRÁCTICA DIRIGIDA PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
LICENCIATURA EN GEOLOGÍA

Junior David Ramos García

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
2014

Práctica Dirigida sometida y aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de  
Licenciatura en Geología y el Comité Evaluador de la Universidad de Costa  
Rica, como requisito parcial para optar por el grado académico de Licenciado en Geología.

**Comité Evaluador**



M.Sc. Héctor Enrique Zúñiga Mora

Escuela Centroamericana de Geología y  
Centro de Investigaciones en Ciencias  
Geológicas

Director



M.Sc. Pablo Ramírez Granados

Centro de Investigaciones en Ciencias  
Geológicas

Miembro del comité asesor



Ph.D. Lolita Campos Bejarano

Escuela Centroamericana de Geología

Miembro del comité asesor



Ph.D. Marco Barahona Palomo

Escuela Centroamericana de Geología

Lector



Ph.D. Javier Trejos Zelaya

Decano de la Facultad de Ciencias

**Postulante**



Geól. Junior David Ramos García

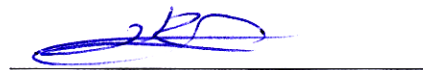
## **DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL**

Yo, Junior David Ramos García, portador de la Cédula de Identidad No. 113330831, conocedor de las sanciones legales con las que la Ley Penal de la República de Costa Rica castiga el falso testimonio.

DECLARO bajo la fe de juramento lo siguiente: que soy estudiante de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica y como requisito de graduación debo defender mi práctica dirigida para optar por el grado académico de Licenciatura en Geología, la cual versa sobre el tema: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE UN SECTOR AL SUR DE LA MARGEN IZQUIERDA DEL RÍO VIRILLA, SAN JOSÉ, COSTA RICA. Por lo que manifiesto que la misma ha sido elaborada siguiendo las disposiciones exigidas por la Universidad de Costa Rica.

Además, declaro solemnemente que dicha práctica dirigida es fruto de mi esfuerzo e investigación en su totalidad, que en ella no han participado personas ajenas a mi Director, Co-Directores y Lector, instituciones ni organizaciones extrañas y que los documentos utilizados están respectivamente citados. ES TODO.

Firma en la ciudad de San José a las 13 horas del día 4 de Diciembre de 2014.



Geól. Junior David Ramos García

Sustentante

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo expresarles un profundo y sincero agradecimiento a las siguientes personas e instituciones que de una u otra manera colaboraron con este proyecto:

Al director de la Práctica Dirigida Héctor Zúñiga Mora por toda su ayuda, interés y paciencia en la realización de este proyecto.

Al comité evaluador conformado por la Ph.D. Lolita Campos Bejarano, el M.Sc. Pablo Ramírez Granados y el Ph.D. Marco Barahona Palomo, por sus comentarios, sugerencias, correcciones y aportes realizados durante todo el trabajo.

A Mario Arias Salguero, director del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG) por su apoyo, comentarios y sugerencias.

A la M.Sc. Ana Lucia Castro Matamoros, al Lic. Andrés Ulloa Carmiol y al Geól. José Daniel López Oviedo por toda la ayuda e interés mostrado.

A los colegas, amigos y compañeros que siempre estuvieron pendientes con el avance de este proyecto.

Y a mi familia que me ha apoyado en todo momento.

*A Dios, mis padres y mi familia*

## ÍNDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	3
1.3	METODOLOGÍA.....	3
1.4	JUSTIFICACIÓN.....	4
1.5	PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA .....	4
<b>2</b>	<b>ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>6</b>
2.1	ANTECEDENTES .....	6
2.2	MARCO TEÓRICO.....	9
2.2.1	<i>Modelo conceptual</i> .....	9
2.2.2	<i>Tipos de acuíferos</i> .....	9
2.2.3	<i>Sistema de acuíferos</i> .....	10
2.2.4	<i>Vulnerabilidad hidrogeológica</i> .....	11
<b>3</b>	<b>MODELO CONCEPTUAL.....</b>	<b>14</b>
3.1	PERFILES HIDROGEOLÓGICOS .....	14
3.2	SISTEMA ACUÍFERO SAN JOSÉ. ....	22
3.2.1	<i>Unidad de piroclastos</i> .....	23
3.2.2	<i>Unidad de brechas lávicas</i> .....	25
3.2.3	<i>Unidad de lavas fracturadas</i> .....	36
3.3	INFLUENCIA DE LAS ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS EN LA HIDROGEOLOGÍA.....	39
<b>4</b>	<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO.....</b>	<b>41</b>
4.1	EXTENSIÓN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS .....	41
4.2	EQUIPOTENCIALES.....	41
4.3	PATRÓN DE DRENAJE.....	44
4.4	MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA ACUÍFERO SAN JOSÉ.....	49
<b>5</b>	<b>VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS.....</b>	<b>53</b>
5.1	GRADO DE CONFINAMIENTO DEL ACUÍFERO .....	53
5.2	SUSTRATO SOBROYACIENTE.....	56
5.3	DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL AGUA .....	59
5.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	59

<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>64</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>66</b>
	<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>70</b>
	POZOS UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DE LOS PERFILES.....	70
	<b>ANEXO 2 .....</b>	<b>75</b>
	GRÁFICOS DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO PARA LA UNIDAD DE BRECHAS LÁVICAS.....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1:	ÁREA DE ESTUDIO. ....	2
FIGURA 2:	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO GOD (TOMADO Y MODIFICADO DE FOSTER, 1987). ....	13
FIGURA 3:	MAPA DE UBICACIÓN DE LOS POZOS UTILIZADOS EN LOS PERFILES. ....	15
FIGURA 4:	UBICACIÓN DE LOS PERFILES HIDROGEOLÓGICOS. ....	16
FIGURA 5:	PERFIL 1. ....	17
FIGURA 6:	PERFIL 2. ....	18
FIGURA 7:	PERFIL 3. ....	19
FIGURA 8:	PERFIL 4. ....	20
FIGURA 9:	PERFIL 5. ....	26
FIGURA 10:	PERFIL 6 .....	27
FIGURA 11:	PERFIL 7. ....	28
FIGURA 12:	PERFIL 8. ....	29
FIGURA 13:	PERFIL 9. ....	30
FIGURA 14:	PERFIL 10. ....	31
FIGURA 15:	PERFIL 11. ....	32
FIGURA 16:	PERFIL 12. ....	33
FIGURA 17:	PERFIL 13. ....	34
FIGURA 18:	PERFIL 14. ....	38
FIGURA 19:	MAPA DE FALLAS TEÓRICAS E INFERIDAS.....	40
FIGURA 20:	EXTENSIÓN INTERPRETADA DE LA UNIDAD DE PIROCLASTOS.....	42
FIGURA 21:	EXTENSIÓN INTERPRETADA DE LA UNIDAD DE BRECHAS LÁVICAS.....	43
FIGURA 22:	EQUIPOTENCIALES DE LA UNIDAD DE PIROCLASTOS.....	45
FIGURA 23:	EQUIPOTENCIALES DE LA UNIDAD DE BRECHAS LÁVICAS.....	46
FIGURA 24:	PATRÓN DE DRENAJE Y FALLAS QUE AFECTAN A LA UNIDAD DE PIROCLASTOS. ....	47

FIGURA 25: PATRÓN DE DRENAJE Y FALLAS QUE AFECTAN A LA UNIDAD DE BRECHAS LÁVICAS. ..	48
FIGURA 26: PERFIL ESQUEMÁTICO DEL MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO.....	51
FIGURA 27: CROQUIS COMPARATIVO HIDROGEOLÓGICO AL NORTE Y SUR DEL RÍO VIRILLA.....	52
FIGURA 28: GRADO DE CONFINAMIENTO DE LA UNIDAD DE PIROCLASTOS.....	54
FIGURA 29: GRADO DE CONFINAMIENTO DE LA UNIDAD DE BRECHAS LÁVICAS.....	55
FIGURA 30: SUSTRATO LITOLÓGICO PARA LA UNIDAD DE PIROCLASTOS.....	57
FIGURA 31: SUSTRATO LITOLÓGICO PARA LA UNIDAD DE BRECHAS LÁVICAS.....	58
FIGURA 32: DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LA UNIDAD DE PIROCLASTOS.....	60
FIGURA 33: DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LA UNIDAD DE BRECHAS LÁVICAS.....	61
FIGURA 34: ÍNDICE DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN EN LA UNIDAD DE PIROCLASTOS.62	
FIGURA 35: ÍNDICE DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN EN LA UNIDAD DE BRECHAS LÁVICAS.....	63

## **ÍNDICE DE CUADROS**

CUADRO 1: CAUDALES Y TRANSMISIVIDADES DEL SECTOR SUR POR CANTÓN.....	21
CUADRO 2: RELACIÓN DE LA ESTRATIGRAFÍA Y LA HIDROGEOLOGÍA EN EL ÁREA DE ESTUDIO. ....	22
CUADRO 3: CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LA UNIDAD DE PIROCLASTOS.....	24
CUADRO 4: CAUDALES Y TRANSMISIVIDADES DE LA UNIDAD DE PIROCLASTOS POR CANTÓN. ....	24
CUADRO 5: CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LA UNIDAD DE BRECHAS LÁVICAS. ....	35
CUADRO 6: CAUDALES Y TRANSMISIVIDADES DE LA UNIDAD DE BRECHAS LÁVICAS POR CANTÓN.35	
CUADRO 7: RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO DE LA UNIDAD DE BRECHAS LÁVICAS. ....	36
CUADRO 8: CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LA UNIDAD DE LAVAS FRACTURADAS.....	37
CUADRO 9: CAUDALES Y TRANSMISIVIDADES DE LA UNIDAD DE LAVAS FRACTURADAS POR CANTÓN.....	37



## Resumen

Como parte del proyecto de investigación 830-B2-404 llamado “Estudio hidrogeológico de un sector de la provincia de San José”; ejecutado por el Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG) de la Universidad de Costa Rica, se llevó a cabo la investigación del modelo hidrogeológico conceptual de un sector al sur de la margen izquierda del río Virilla, a partir del análisis de la información litológica y de profundidad del agua subterránea obtenida de una serie de pozos registrados en la base de datos del SENARA.

El objetivo principal se centró en establecer el modelo hidrogeológico de la zona basado en la correlación estratigráfica de pozos, así como determinar el grado de vulnerabilidad a la contaminación que posee cada uno de los acuíferos presentes en el área de estudio.

Mediante la correlación de 122 pozos se realizaron 14 perfiles hidrogeológicos en los cuales se determinó la presencia de un sistema de niveles de agua a los cuales se le asignó el nombre de Sistema Acuífero San José, del cual se distinguen tres unidades: la Unidad de piroclastos (acuífero semiconfinado), la Unidad de brechas lávicas (acuífero semiconfinado) y la Unidad de lavas fracturadas (acuífero confinado).

La Unidad de piroclastos se encuentra a una profundidad promedio de 10-15 mbns y se localiza principalmente en una capa de lahares y cenizas, aunque también abarca litologías como tobas, ignimbritas y lavas en los sectores norte y oeste del área de estudio. Este nivel posee una carga de presión que oscila entre 1 y 20 m y un espesor que varía entre 10 y 30 m.

La Unidad de brechas lávicas se reconoce a una profundidad promedio de 70-80 mbns y se encuentra dentro de una capa de brechas lávicas y lavas asociadas al Miembro Linda Vista, perteneciente a la Formación Lavas Intracañón. Esta unidad ostenta una carga de presión que oscila entre los 12 y 55 m y un espesor que varía entre 15 y 60 m.

La última unidad interpretada (Unidad de lavas fracturadas) se encuentra a una profundidad promedio de 165 m y se extiende por una capa de lavas negras andesítica-basálticas asociadas al Miembro Belén, perteneciente a la Formación Lavas Intracañón. El espesor de esta unidad varía entre los 15 y 20 m y la carga de presión aproximada es de 27 m.

El caudal y transmisividad que presenta la Unidad de piroclastos es menor en comparación con las otras dos unidades debido a la constante impermeabilización de los suelos que se

presenta en las zonas intermedias de recarga, producto de la constante ampliación de las zonas urbanas. El caudal en esta unidad varía entre 1,73 m<sup>3</sup>/d y 604,8 m<sup>3</sup>/d y la transmisividad posee valores entre los 0,074 m<sup>2</sup>/d y 140 m<sup>2</sup>/d. Por otra parte la Unidad de lavas fracturadas es la que presenta el mayor caudal, el cual varía entre 203,90 m<sup>3</sup>/d y 2586,82 m<sup>3</sup>/d y la transmisividad ronda los 1075 m<sup>2</sup>/d.

En el sector sur del área de estudio se encuentra presente un conjunto de materiales sedimentarios y volcánicos de edades miocénicas, los cuales presentan un alto grado de arcillificación, impidiendo el libre tránsito del agua subterránea. Esto provoca que el agua subterránea de este sector circule mayoritariamente por las fracturas producto de condiciones locales presentes en estas rocas. Al no existir perforaciones suficientes en esta zona, no es posible definir adecuadamente la cantidad o extensión de los acuíferos presentes, lo que impide su correcta interpretación.

Como resultado del razonamiento y análisis realizados a los perfiles hidrogeológicos se identificó una serie de fallas geológicas en los ríos Tiribí, María Aguilar, Cañas, Macho y Torres y las quebradas San Francisco y Rivera, las cuales concuerdan con alineaciones encontradas en las redes de flujo obtenidas de los niveles piezométricos de algunos de los pozos utilizados. En dichos perfiles estas fallas poseen componentes gravitacionales, sin embargo, geomorfológicamente no se observan indicios del tipo de falla que representan.

El análisis de la vulnerabilidad a la contaminación de las unidades identificadas se realizó con el método GOD y el mismo evidenció que la Unidad de piroclastos presenta índices de vulnerabilidad que van desde bajo a despreciable, la Unidad de brechas lávicas muestra índices que también oscilan entre bajo y despreciable mientras que a la Unidad de lavas fracturadas no se le logró asignar el índice de vulnerabilidad debido a que no existen los datos suficientes para generar el mapa de isolíneas y por consiguiente el modelado de la vulnerabilidad.

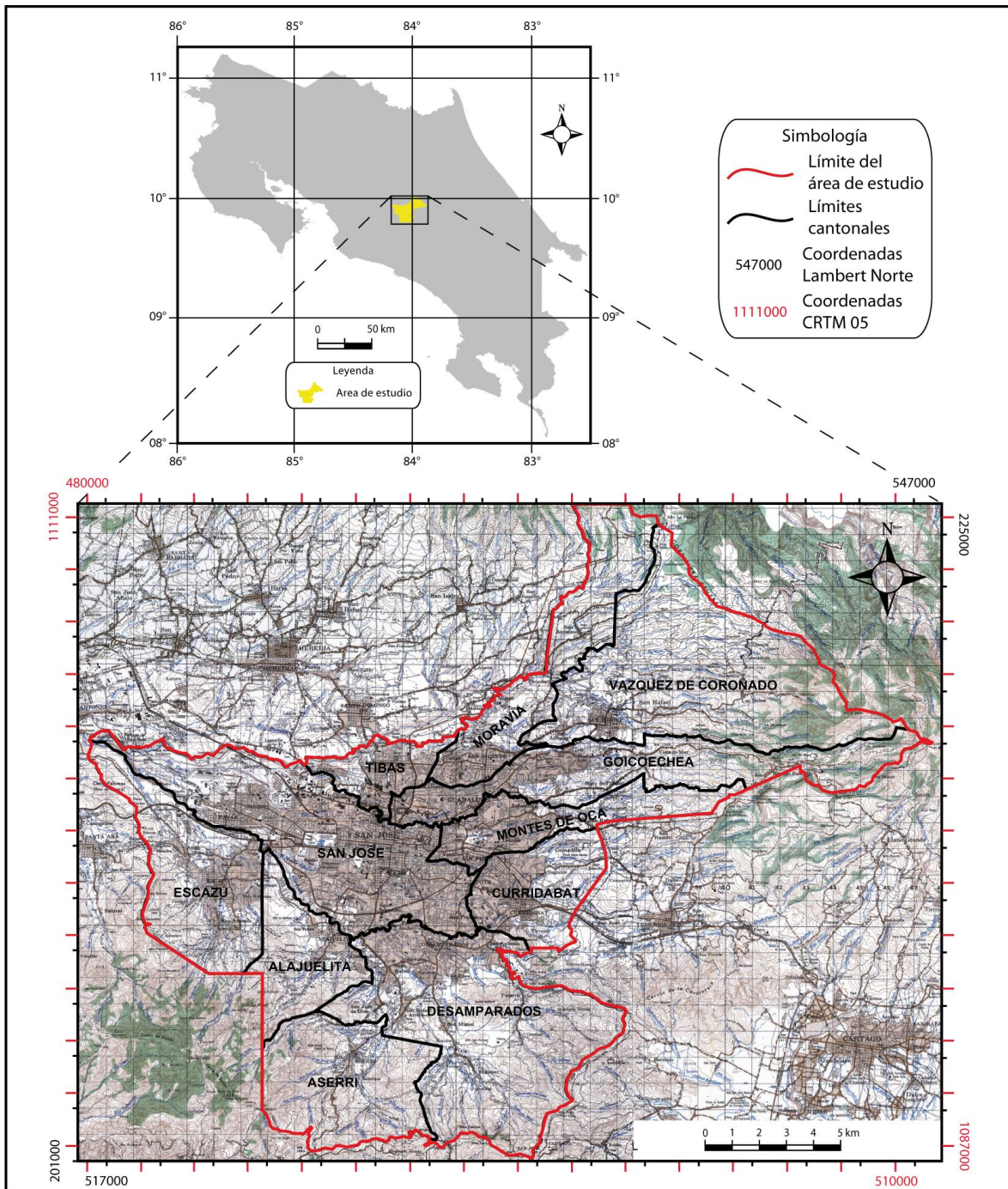
# 1 Introducción

## 1.1 Ubicación Geográfica

La presente práctica dirigida se realizó en la margen izquierda del río Virilla; abarcando gran parte de las subcuencas de los ríos Tiribí y Torres. Esta investigación se enmarca dentro del proyecto 830-B2-404, desarrollado en el Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG) bajo el título: “Estudio Hidrogeológico de un sector de la provincia de San José”, el cual se realiza mediante un convenio firmado entre el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), la Universidad de Costa Rica (UCR) y la Fundación de la Universidad de Costa Rica para la Investigación (FUNDEVI).

Geográficamente se ubica entre las coordenadas de proyección conforme cónica de Lambert Costa Rica Norte 516310 – 547690 Norte y 201070 – 226160 Este y entre las coordenadas de proyección transversal de Mercator para Costa Rica CRTM05 480190 – 511560 Norte y 1086268 – 1111370 Este de las hojas topográficas Abra, Carraigres, Istarú, Barva y Carrillo, escala 1:50000, editadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Los cantones que abarca esta zona de estudio corresponden a: San José, Escazú (excepto el área que incluye la Zona Protectora de los Cerros de Escazú), Desamparados (exceptuando los distritos de Rosario, Frailes y San Cristóbal), los distritos de Aserrí y Salitrillos del cantón de Aserrí, Goicoechea, Alajuelita (excepto el área que incluye la Zona Protectora de los Cerros de Escazú), Vázquez de Coronado, Tibás, Moravia, Montes de Oca y Curridabat; abarcando un área total de 238,2 km<sup>2</sup> (Figura 1).



**Figura 1: Área de estudio.**

## **1.2 Objetivos**

### ➤ Objetivo general:

Realizar un modelo conceptual hidrogeológico preliminar de un sector en la margen izquierda del río Virilla, San José, Costa Rica, basándose en la correlación estratigráfica de pozos.

### ➤ Objetivos específicos:

1. Establecer el espesor de las formaciones geológicas y de los acuíferos que se encuentran en el área de estudio, a partir de la correlación estratigráfica de los pozos registrados en la base de datos del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA).
2. Realizar un mapa hidrogeológico que represente la red de flujo del agua subterránea.
3. Determinar la vulnerabilidad intrínseca que presentan los acuíferos, a partir de la información recolectada sobre las características hidráulicas, climáticas, hidrogeológicas y geológicas del (los) acuífero(s) de la zona en estudio.

## **1.3 Metodología**

Para el cumplimiento de los objetivos planteados, se propuso la siguiente metodología:

- Recopilación y análisis de la información obtenida de bases de datos, trabajos e investigaciones en geología, hidrogeología y otros, que se encuentren en las bibliotecas de instituciones públicas.
- Correlación de la litología reportada en los pozos obtenidos en la base de datos del SENARA.
- Elaboración de 14 perfiles hidrogeológicos utilizando distintos programas de cómputo.
- Realización de giras de campo para validar la información recopilada.
- Confección de las redes de flujo para los acuíferos presentes con el fin de obtener información sobre la dirección del flujo y profundidad de los mismos.
- Ejecución de los mapas de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos del área en estudio a partir del método GOD.

#### **1.4 Justificación**

En un sector de la Gran Área Metropolitana (GAM) dentro de la provincia de San José se presentó la particularidad de que no se habían realizado estudios detallados en donde se representen los espesores de las formaciones geológicas, ni la distribución espacial de los acuíferos que se encuentran contenidos en ellas.

Es por esta razón que se realizó un análisis de las formaciones geológicas y de los acuíferos en el sector que comprende la margen izquierda del río Virilla, cuya ubicación exacta se describió anteriormente. Este análisis se ubicó dentro del marco del proyecto de investigación “Estudio hidrogeológico de un sector de la provincia de San José”; ejecutado por el Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG) de la Universidad de Costa Rica.

#### **1.5 Planteamiento de la problemática**

Gran parte de la población de la provincia de San José se encuentra ubicada en el Valle Central de Costa Rica, siendo ésta la zona de mayor densidad de población de todo el país. Sin embargo dicha región es una de las áreas menos estudiadas hidrogeológicamente en el Valle Central.

El agua que se utiliza en la provincia de San José proviene de varias fuentes: entre las que se encuentran los acuíferos Colima Superior, Colima Inferior y Barva; los cuales se encuentran en la margen derecha del río Virilla y aportan más del 50% del agua potable con que se abastece el Gran Área Metropolitana (Agüero, 2000).

Otros de los sitios importantes de donde proviene el agua que abastece la provincia de San José corresponden a la zona de Orosi y a las diferentes ASADAS (asociaciones administradoras de acueductos rurales) que se ubican en los sectores más alejados del cantón central de San José y que son utilizadas para el consumo potable de pequeños poblados.

Debido al constante incremento de la población y por consiguiente, a una mayor demanda de los recursos hídricos en el Valle Central, es que se pretende ubicar nuevas fuentes de agua potable que ayuden a solventar dicha demanda, por lo que se hace necesario el estudio de los cuerpos de agua subterránea que se encuentran en la provincia de San José.

Esto se realizará con el fin de caracterizar la hidrogeología de la zona y poder realizar un mapa hidrogeológico de los acuíferos existentes que represente la red de flujo del agua subterránea y la vulnerabilidad que poseen estos acuíferos.

De esta manera se pretende solucionar la carencia de conocimiento del recurso hídrico disponible en la margen izquierda del río Virilla y con esto poder realizar un ordenamiento territorial más adecuado en la zona que abarca el presente estudio.

Esta situación hace necesaria la participación de las entidades capaces de desarrollar este tipo de investigaciones como es el caso del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG) de la Universidad de Costa Rica (UCR), entidad que en los últimos años ha orientado parte de sus esfuerzos hacia la investigación en el tema del recurso hídrico.

## 2 Antecedentes y Marco Teórico

### 2.1 Antecedentes

Las investigaciones que sobresalen en la zona de estudio, hacen referencia a las formaciones geológicas aflorantes en la misma, las cuales corresponden a rocas de origen volcánico en los sectores norte, este y oeste, así como rocas de origen sedimentario e intrusivo en los sectores sur y suroeste del área.

El Valle Central Occidental, según Malavassi & Madrigal (1967), ha sido construido por el acúmulo de materiales que provienen de las áreas vecinas, constituidos por piroclastos y lavas de los volcanes; deslizamientos de cerros circunvecinos, lahares y materiales acarreados por los ríos. Estos materiales yacen discordantemente sobre rocas sedimentarias del Terciario; dichos materiales sedimentarios van desde lutitas hasta conglomerados piroclásticos.

Fernández (1969) propone los nombres para las unidades volcánicas que se distinguen en la zona, refiriéndose a estas como: Formación Colima y Formación Tiribí; asignándole una edad Plio-Pleistoceno a ambas formaciones. Esta nomenclatura y edades también son utilizadas por Paniagua (1975), Echandi (1981) y Denyer & Arias (1991).

Previamente; Malavassi (1965), Dóndoli (1954) y Williams (1952) clasificaban estas rocas volcánicas en el Valle Central como Lavas Intracañón y Depósitos de Ignimbritas respectivamente.

Fernández (1969) también señala que la formación sedimentaria que conforma el basamento de las unidades volcánicas corresponde a la Formación Pacacua, la cual consiste en una gruesa sucesión de conglomerados brechosos tobáceos con interstratificaciones de areniscas, limolitas y lutitas densas, las cuales, según Denyer & Arias (1991), poseen una edad del Mioceno Inferior.

Castillo & Krushensky (1977) incorporan dentro de las formaciones sedimentarias que se ubican en el sur del área de estudio a las formaciones Coris, San Miguel, Pacacua y Térraba; mencionando que la Formación Coris se compone de areniscas y arcillas cuarzosas del Mioceno Inferior; la Formación San Miguel corresponde a una caliza gris azulada con conchas del mismo periodo; la Formación Térraba compuesta de lutitas y limolitas interstratificadas del Eoceno – Oligoceno y la Formación Pacacua que corresponde con



interestratificaciones de conglomerados brechosos tobáceos con areniscas, limolitas y lutitas densas del Eoceno – Oligoceno.

Estos autores también señalan que algunas de las principales poblaciones (Desamparados, Aserri, Paso Ancho, Escazú, Zapote y Alajuelita) poseen una cobertura de entre 0-20 m de aluvi3n, y que en el sector de Guatuso de Desamparados se encuentra un peque1o afloramiento de la Formaci3n Aguacate, el cual corresponde con lahares, tobas y coladas de lava del Mioceno Superior – Plioceno.

Posteriormente Denyer & Arias (1991), modifican el mapa geol3gico sustituyendo la Formaci3n T3rraba por la Formaci3n Pe1a Negra; la cual se compone de areniscas finas y lutitas de edad Mioceno Medio. Tambi3n agregan a la Formaci3n La Cruz que se caracteriza por coladas basálticas y andesíticas del Mioceno Superior, la Formaci3n Grifo Alto que se le designa a una serie de rocas volcánicas andesíticas y piroclásticas del Plio-Pleistoceno y una Formaci3n de lahares y cenizas de edad Pleistoceno-Holoceno que cubre desde la ciudad de San Jos3 hacia el este del 1rea de estudio, abarcando San Jos3, Desamparados, Alajuelita, San Pedro, Zapote, Curridabat, Guadalupe y San Isidro de Coronado.

En lo referente a la hidrogeol3gia, Paniagua (1975) y Losilla (1977) mencionan que en las lavas y brechas de las secuencias volcánicas se encuentran los principales acuíferos del Valle Central, pero la toba aparentemente es la que almacena las aguas subterráneas. Este 3ltimo autor hace menció de las rocas sedimentarias e intrusivas que se encuentran en el sur del 1rea de estudio al decir que aunque aparentemente son de poca importancia para el agua subterránea, cumplen un papel determinante en el sistema de flujo de la misma en la cuenca hidrográfica, ya que su naturaleza impermeable determina el límite natural de la cuenca hidrogeol3gica.

Losilla (1977) menciona que se han detectado tres acuíferos interrelacionados en diferentes grados, todos de tipo fisural; estos acuíferos son: Barva, Colima Superior y Colima Inferior. SENARA & BGS (1985) realizaron un mapa hidrogeol3gico del Valle Central, en donde se1alan las formaciones geol3gicas existentes y su potencial acuífero. Este mapa, aunque concentra su estudio en la margen derecha del rí Virilla, incluye algunos sectores al norte del 1rea de estudio; sin embargo, la informaci3n generada en este sector es muy escasa.

Schosinsky & Vargas (2001) señalan que en la zona comprendida entre Rohrmoser, Pavas y Hatillo, la principal unidad hidrogeológica es la Formación Colima; por su parte los flujos de ignimbrita, los horizontes de toba y los depósitos laháricos constituyen acuitardos, aunque en algunos sectores presentan conductividades hidráulicas que favorecen la transmisión del agua subterránea.

Posteriormente Schosinsky *et al.* (2001) señalan que en esa misma zona de Rohrmoser, Pavas y Hatillo se presentan altas concentraciones de cloruro en las aguas subterráneas, lo que impide que las mismas cumplan con las normas de potabilidad del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). Esta contaminación, según las conclusiones de estos autores posee un origen termal, sin embargo no existen evidencias de fallas ni manantiales termales en dicha zona.

Ramírez (2007) indica que los sectores medios y altos de Vásquez de Coronado, Goicoechea, Moravia y Montes de Oca representan las zonas de mayor recarga en el área de estudio.

Con respecto al fallamiento, Fernández & Montero (2002) mencionan un importante sistema de fallas activas en el sector sur del área de estudio. Entre las fallas más trascendentes se encuentran las fallas Escazú, Belo Horizonte y Aserrí, (estas asociadas a la falla Jericó), y la falla Río Azul asociada a la falla Agua Caliente. De igual manera en el sector Oeste del área, los mismos autores mencionan la falla inversa Cipreses, a la cual se asocia un grupo de pliegues.

Este mismo fallamiento se ve reflejado en el Atlas Tectónico de Costa Rica (Denyer *et al.*, 2003); sin embargo la falla Jericó es mencionada como falla Frailes.

En el sector noreste de la zona de estudio, Fernández & Pacheco (1998) mencionan una serie de fallas que se encuentra en las cercanías de Rancho Redondo y Coronado, las cuales se denominan: falla Rancho Redondo, falla San Rafael y falla Las Nubes; sin embargo estas fallas no se señalan en el Atlas Tectónico de Costa Rica.

Con respecto al tema de la vulnerabilidad que presentan los acuíferos en el Valle Central, Ramírez & Alfaro (2002) realizaron un mapa de vulnerabilidad de una parte del Valle Central utilizando el método DI-O-S (similar al método GOD) y la base topográfica a escala 1:200000. Estos autores señalan que en el sector este del área de estudio la

vulnerabilidad de los acuíferos es alta, mientras que en el sector de Tibás la vulnerabilidad es media.

## **2.2 Marco Teórico**

En el siguiente apartado se realizará una introducción a los términos base que se utilizarán en el presente estudio, así mismo se establecerá una explicación del método que se utilizará en la determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos.

### **2.2.1 Modelo conceptual**

El modelo conceptual es una simplificación esquemática (física o numérica) de la naturaleza, en la que se intentan representar las condiciones hidrogeológicas reales en una determinada cuenca, realizando un modelo conceptual del funcionamiento del sistema acorde a la realidad (Madrigal, 2004). El presente modelo conceptual se plantea a partir del análisis en conjunto de la información geológica e hidrogeológica de la zona en estudio, los cuales son indicadores del comportamiento del flujo y la hidráulica de los pozos. Estos parámetros son fundamentales para que el modelo resultante sea congruente con la pretendida simulación de la naturaleza.

### **2.2.2 Tipos de acuíferos**

Los acuíferos pueden clasificarse de varias formas, algunas de las cuales dependen de su estructura, comportamiento hidráulico y la movilidad del agua.

De acuerdo con su comportamiento hidráulico y su estructura, los acuíferos se clasifican en: acuíferos libres, confinados, semiconfinados y colgados.

Los **acuíferos libres, no confinados o freáticos** son aquellos en los que la presión del agua es igual a la presión atmosférica y no poseen una capa de materiales impermeables sobre ella (Custodio & Llamas, 1976). En el acuífero libre el nivel freático coincide con la superficie y se encuentra en contacto directo con la zona subsaturada del suelo. Su posición varía dependiendo de la época de lluvias o la época seca.

Los **acuíferos confinados** son aquellos cuerpos de agua en los que la presión a la que están sometidos es mayor a la presión atmosférica (Custodio & Llamas, 1976). Estos acuíferos se acumulan en una roca permeable y se encuentran entre dos capas impermeables.

El **acuífero semiconfinado** ocurre cuando el estrato de suelo que lo cubre no es totalmente impermeable (acuitardo), permitiendo que ocurra la descarga y recarga a través de este estrato (Custodio & Llamas, 1976).

Los **acuíferos colgados** se originan debido a la presencia de capas de material de baja permeabilidad que se encuentran en forma de lentes en materiales más permeables. El agua se mueve hacia abajo a través de la zona no saturada y es interceptada por esta capa, acumulándose en la parte superior de dicho lente, el cual tiene una extensión limitada sobre la zona saturada más próxima (Fetter, 1988).

Según la movilidad del agua, los acuíferos se clasifican en: acuíferos, acuitardos, acuicludos y acuífugos. La velocidad del agua dependerá de la porosidad y percolación de la roca a una velocidad de 1 cm por año.

Los **acuíferos** son aquellos estratos o formaciones geológicas que permiten la circulación y almacenamiento del agua por sus poros y/o grietas, de manera que puede ser aprovechada como recurso (Fetter, 1988).

Los **acuitardos** son las formaciones geológicas que contienen apreciables cantidades de agua pero que las transmiten lentamente, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones; sin embargo bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos (Custodio & Llamas, 1976).

Los **acuicludos** son formaciones geológicas que conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación, no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación; por lo general son arcillas (Custodio & Llamas, 1976).

Los **acuífugos** son formaciones que no contienen ni transmiten agua (Custodio & Llamas, 1976).

### **2.2.3 Sistema de acuíferos**

Una vez aclarados los conceptos de los tipos de acuíferos, se puede definir el concepto de sistema de acuíferos, el cual es definido como un cuerpo heterogéneo con intercalaciones de materiales permeables y poco permeables que funcionan a nivel regional como una unidad hidráulica productora, que comprende dos o más capas permeables (acuíferos) separados por lo menos a nivel local por acuitardos (unidades de confinamiento) que

impiden el movimiento de las aguas subterráneas, pero no afectan en gran medida la continuidad hidráulica regional del sistema (ASTM, 2004).

#### **2.2.4 Vulnerabilidad hidrogeológica**

En la determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos existen varias metodologías, algunas de las cuales se basan en las características intrínsecas del medio (vulnerabilidad intrínseca) y otras se relacionan con el comportamiento del medio y el tipo de contaminante (vulnerabilidad específica).

En el presente estudio se utilizará una de las metodologías basadas en las características propias del medio, dicha metodología corresponde con el método GOD, esta metodología se utilizará debido a que los parámetros con los que se cuenta en el presente estudio se amoldan de una mejor manera al método GOD, de igual manera se realizará una breve descripción de otros métodos existentes para la determinación de la vulnerabilidad hidrogeológica.

##### **2.2.4.1 Método DRASTIC**

Este método fue desarrollado por Aller *et al.* (1987) con el objetivo de desarrollar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos; se basa en la asignación de índices que van de 1 (mínima vulnerabilidad) a 10 (máxima vulnerabilidad), de acuerdo a las características y el comportamiento de las variables consideradas en su acrónimo: **D** (depth – profundidad del agua freática) **R** (recharge – recarga neta) **A** (aquifer – litología del acuífero) **S** (soil – tipo de suelo) **T** (topography – topografía) **I** (impact – litología de la región subsaturada) **C** (hydraulic conductivity – conductividad hidráulica del acuífero).

##### **2.2.4.2 Método SINTACS**

Fue desarrollado por Civita *et al.* (1990) derivado del DRASTIC y adecuado a las diversas características hidrogeológicas de Italia. Sus parámetros son: **S** (soggiacenza – profundidad del agua) **I** (infiltrazione – infiltración) **N** (non saturo – sección subsaturada) **T** (tipologia della copertura – tipo de suelo) **A** (acquifero – características hidrogeológicas del acuífero) **C** (conducibilità – conductividad hidráulica) **S** (superficie topográfica).

#### **2.2.4.3 Método EPIK**

Es un método desarrollado por Doerfliger & Zwahlen (1997) para acuíferos kársticos. El acrónimo EPIK significa: **E** (Epikarst – zona kárstica) **P** (protective cover – cubierta protectora) **I** (infiltration conditions – condiciones de infiltración) **K** (karst network development – desarrollo de la red kárstica).

#### **2.2.4.4 Método EKv**

Desarrollado por Auge (1995), considera que la vulnerabilidad “es un concepto cualitativo que se refiere al grado de protección natural de un acuífero frente a la contaminación”. Su clasificación esta basaba en: **E** (espesor de la zona subsaturada) y **Kv** (permeabilidad vertical de la zona subsaturada).

#### **2.2.4.5 Método GOD**

El método de GOD fue desarrollado por Foster (1987), se considera el primer paso para la determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas con el fin de establecer prioridades.

El método determina la vulnerabilidad intrínseca por lo que no toma en cuenta el tipo de contaminante (Figura 2). Establece la vulnerabilidad del acuífero, como una función de la inaccesibilidad de la zona saturada, desde el punto de vista hidráulico a la penetración de contaminantes y la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada como resultado de su retención física y la reacción química con los contaminantes (Foster e Hirata, 1991).

La vulnerabilidad según el método se calcula como el producto de los siguientes factores:

$$\text{Índice de Vulnerabilidad} = G * O * D$$

Donde:

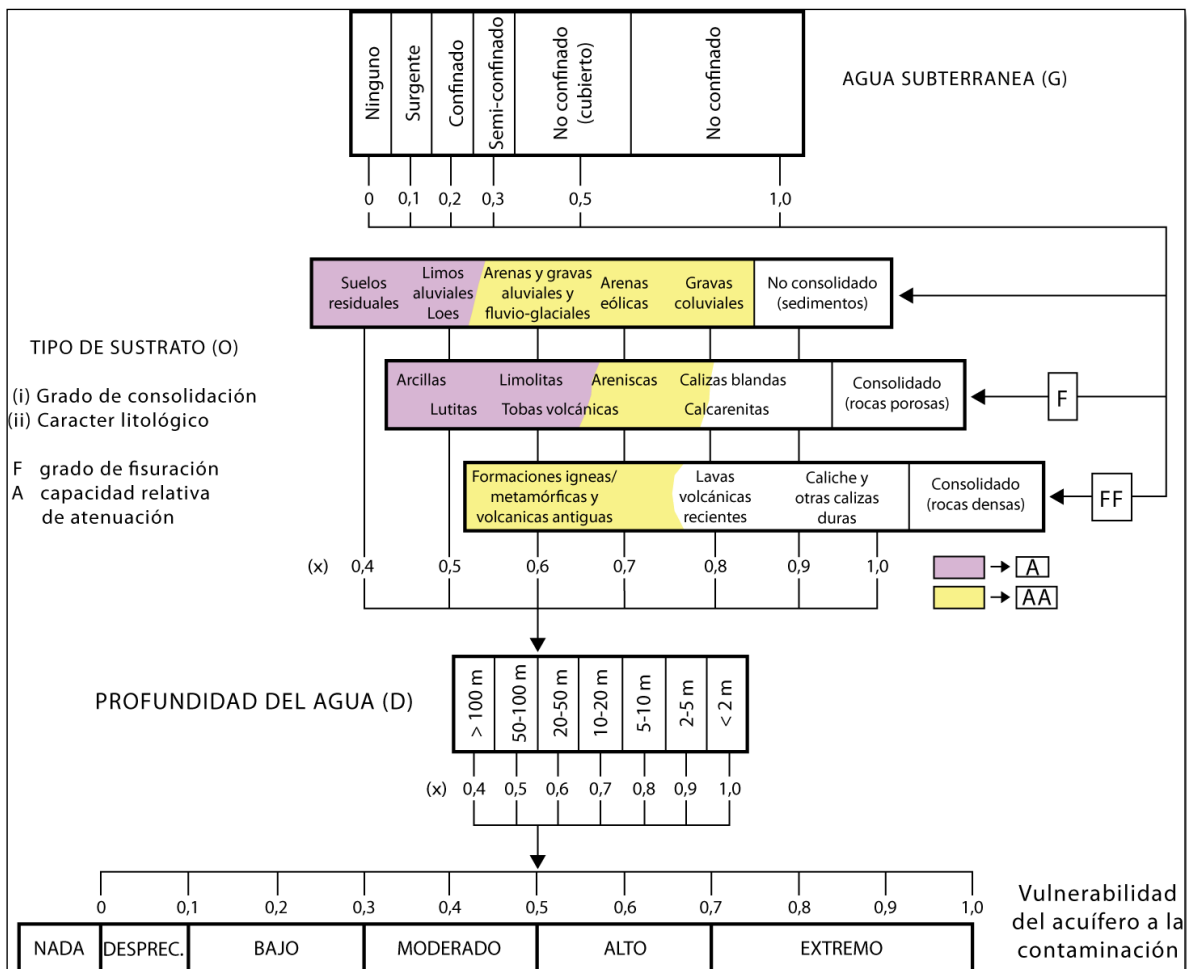
**G** = índice por condición de confinamiento del acuífero u ocurrencia del agua subterránea (Groundwater occurrence)

**O** = índice del substrato litológico en términos de grado de consolidación y características litológicas (Overall aquifer class).

**D** = índice por profundidad del nivel del agua o techo del acuífero confinado (Depth).

Cada uno de los factores posee valores entre cero y uno, entre mayor es el valor, más desfavorable es la condición. Este método solo asigna un peso indirecto a las variables a través de sus valores.

Se considera una vulnerabilidad despreciable si el valor es menor a 0,1, baja si el valor está entre 0,1 y 0,3, moderada si está entre 0,3 y 0,5, alta si está entre 0,5 y 0,7 y extrema si es mayor a 0,7.



**Figura 2: Descripción del método GOD (tomado y modificado de Foster, 1987).**

### 3 Modelo Conceptual

#### 3.1 Perfiles Hidrogeológicos

A partir de la información litológica y de profundidad del agua obtenida de 122 pozos registrados en la base de datos del SENARA (Figura 3), y los cuales se encuentra la lista en la sección de anexos, se realizaron un total de 14 perfiles hidrogeológicos, los cuales se distribuyen en toda el área de estudio.

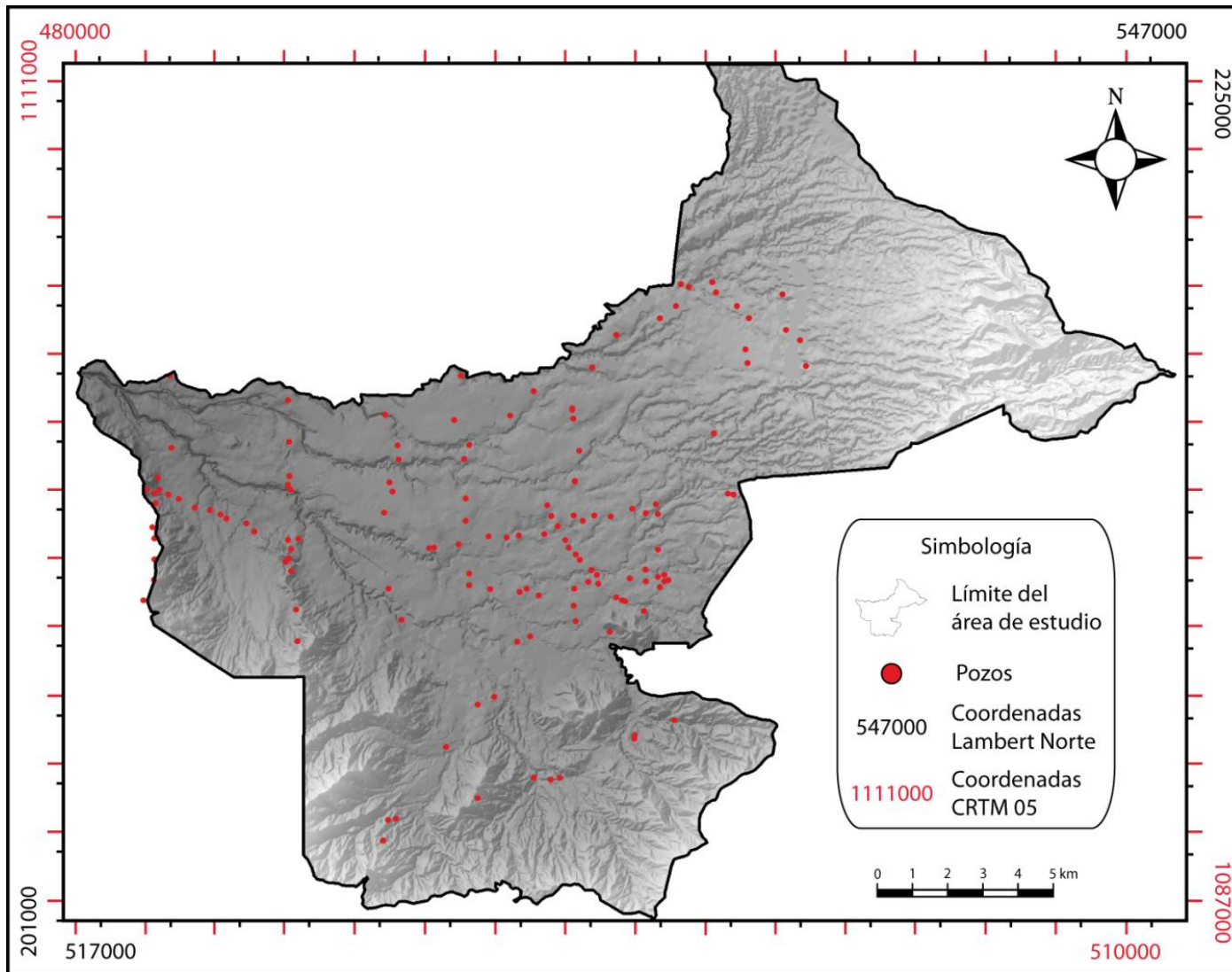
La mayoría de los pozos consultados poseen profundidades entre los 23 y 60 mbns (metros bajo el nivel del suelo), no obstante 28 pozos sobrepasaron los 100 metros de profundidad.

Los perfiles planteados a partir de estos pozos tiene longitudes que varían entre los 3,9 - 11,2 km, y se encuentran orientados N-S, NE-SW, E-W, NW-SE y SE-NW (Figura 4).

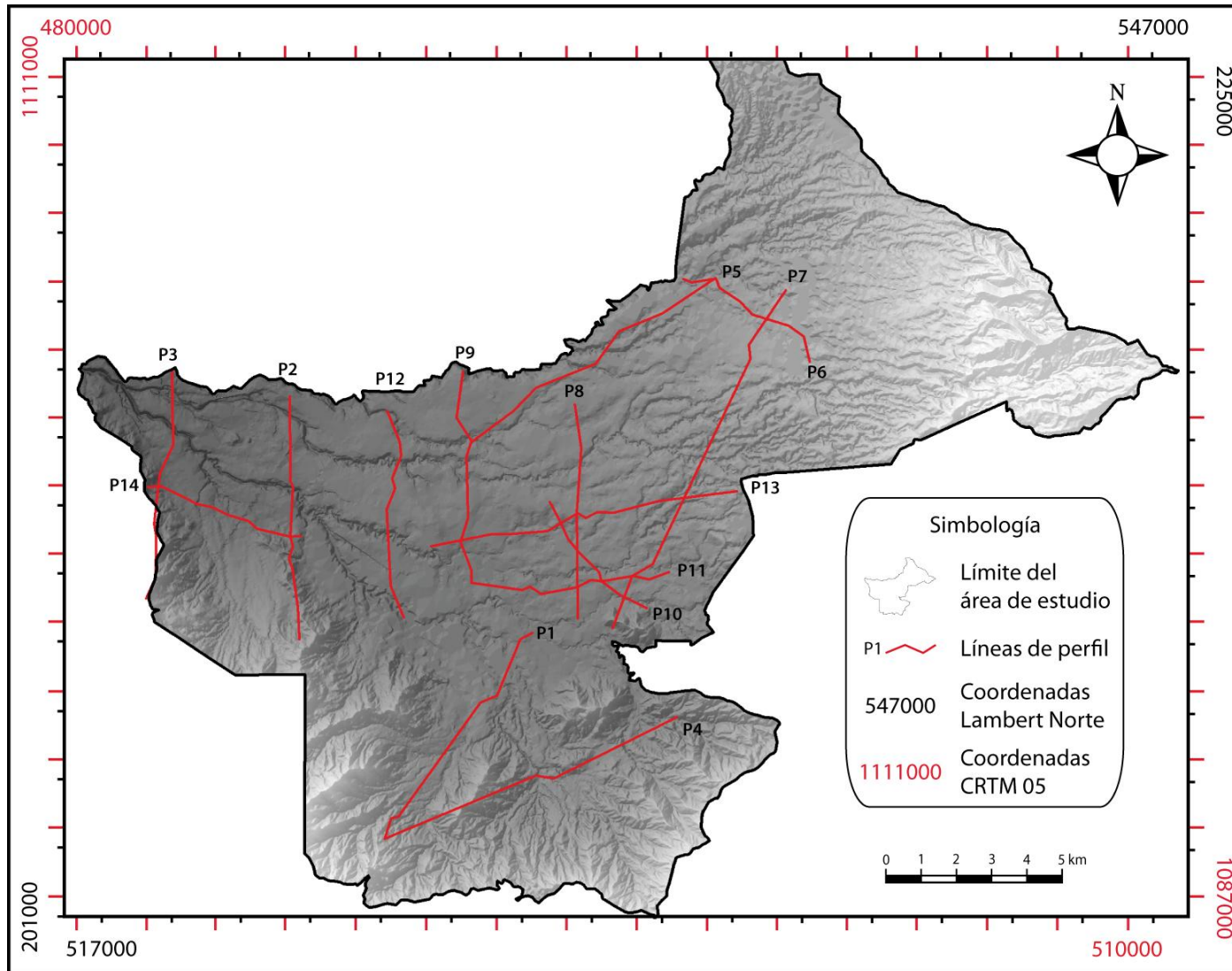
Al sur del área de estudio, de acuerdo con la información obtenida a partir de los perfiles 1, 2, 3 y 4 (Figura 5, 6, 7 y 8), se han identificado un conjunto de materiales sedimentarios que corresponderían con las formaciones Pacacua, Peña Negra y Coris, las cuales poseen edades del Mioceno (Denyer & Arias, 1991), estas formaciones varían entre lutitas, areniscas muy finas, finas y medias muy meteorizadas, fracturadas y arcillificadas, que poseen un nivel de agua subterránea que se encuentra entre los 0 y 25 mbns, el cual circula por las fracturas de las rocas (Figura 5 y 8). Estas areniscas poseen una coloración gris verdosa a rojiza y presentan una permeabilidad aparente que oscila entre baja y media. En algunos sectores estas rocas están sobreyacidas por una capa de abanicos aluviales con espesores inferiores a los 40 m, compuesta por granos medios a gruesos y con fracciones arcillosas de poco espesor. De acuerdo a las características descritas anteriormente este nivel captado correspondería con un acuífero semiconfinado, ya que el alto grado de arcillificación que presentan estas rocas sedimentarias genera una carga de presión que oscila entre 3 y 27 m, igualmente provoca que el tránsito del agua subterránea por las fracturas de las rocas (producto de condiciones locales) no se presente en forma constante, por lo que es más probable que en este sector del área de estudio, los niveles de agua existentes correspondan con acuíferos colgados, sin embargo no existen las perforaciones suficientes para definir adecuadamente este o estos acuífero(s), lo que impide su correcta interpretación.

La información obtenida de los pozos analizados en estas litologías es muy variada y se muestra en el Cuadro 1.

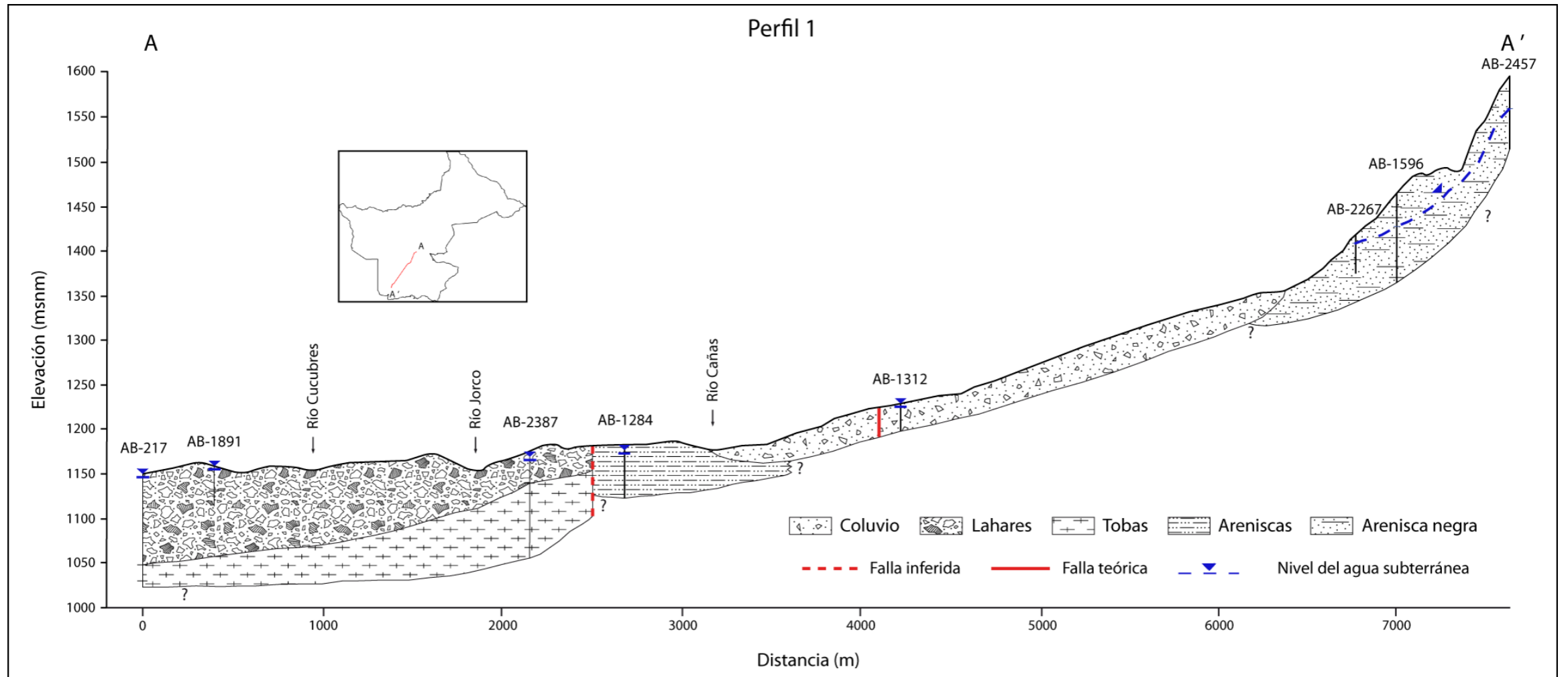




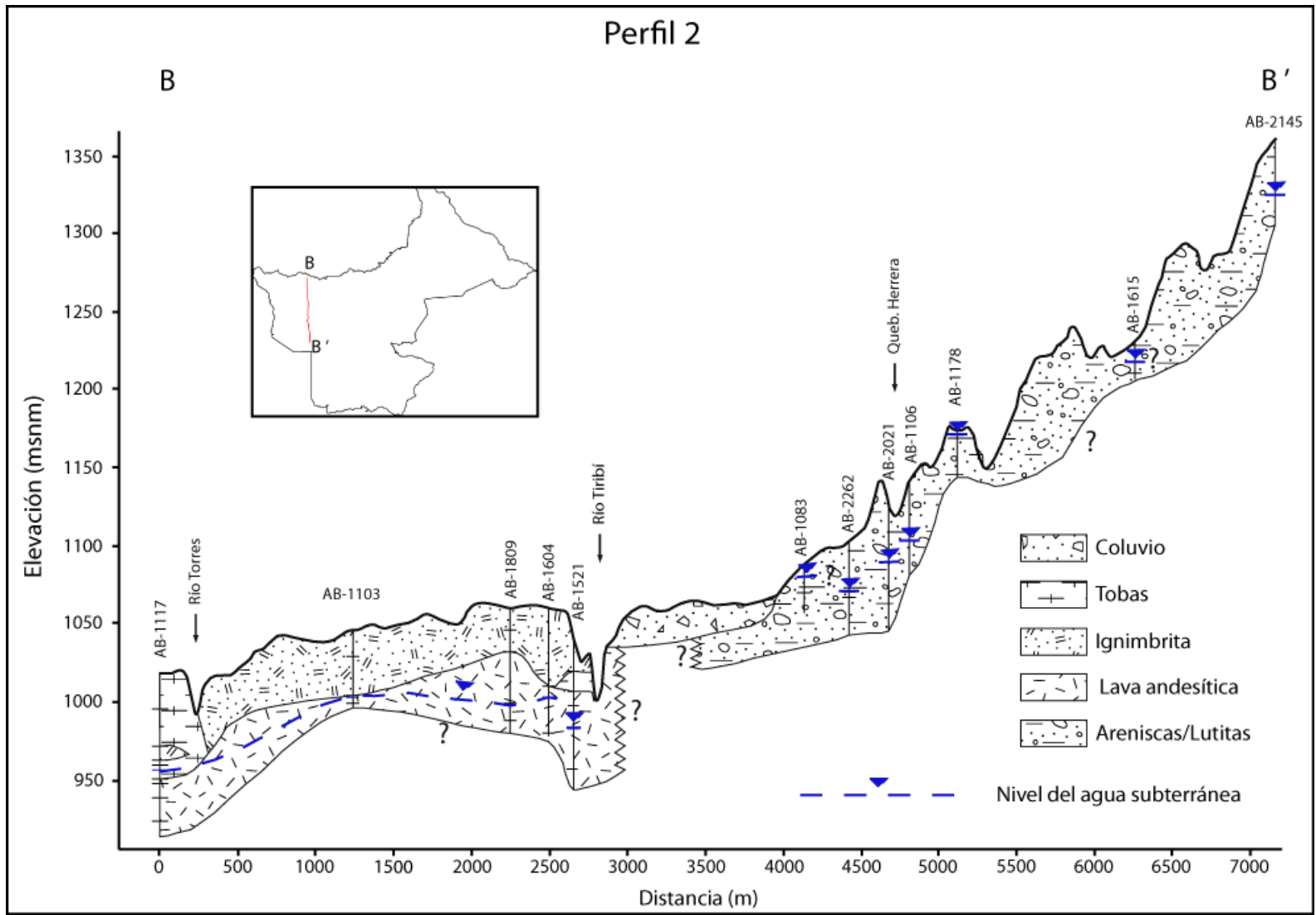
**Figura 3: Mapa de ubicación de los pozos utilizados en los perfiles.**



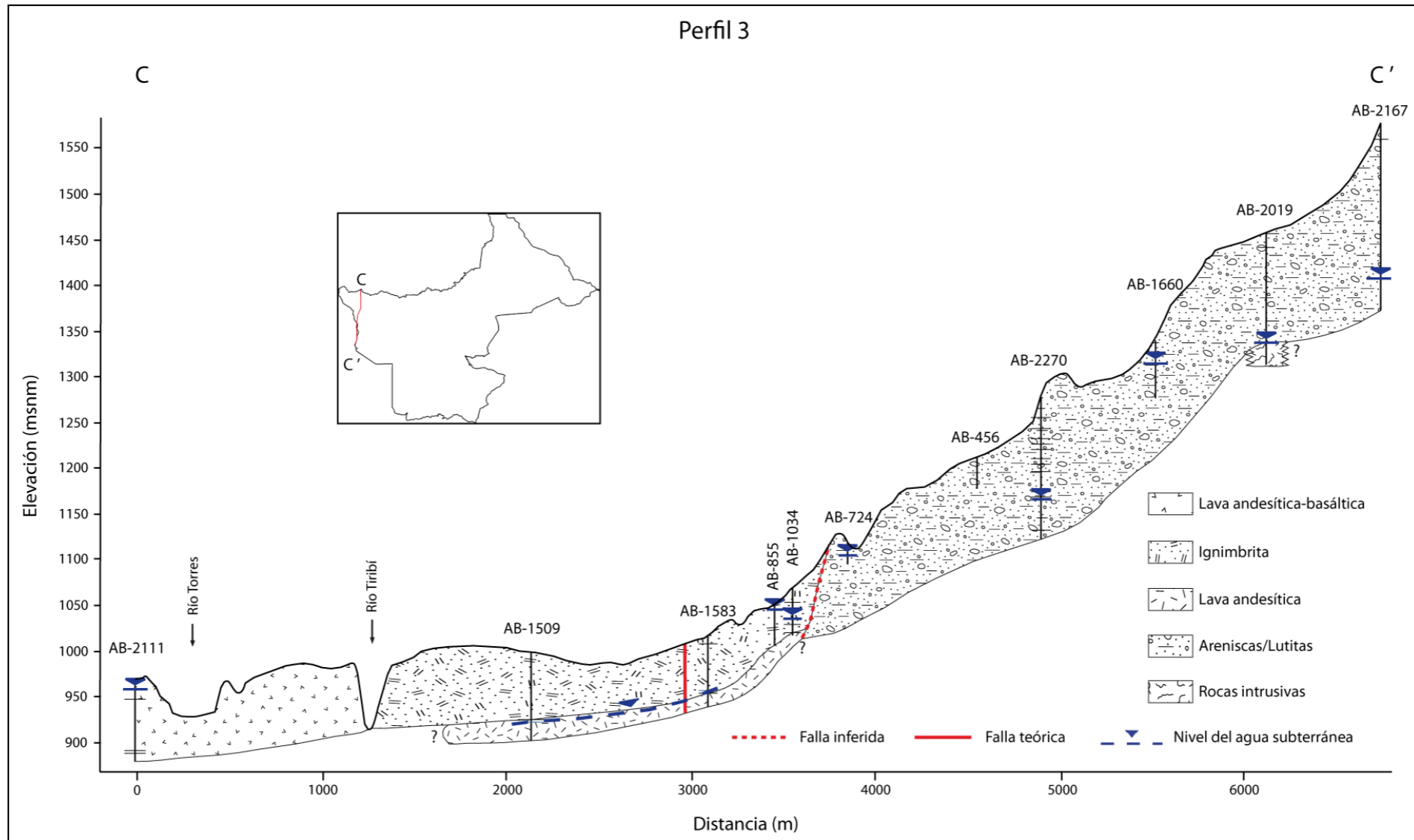
**Figura 4: Ubicación de los perfiles hidrogeológicos.**



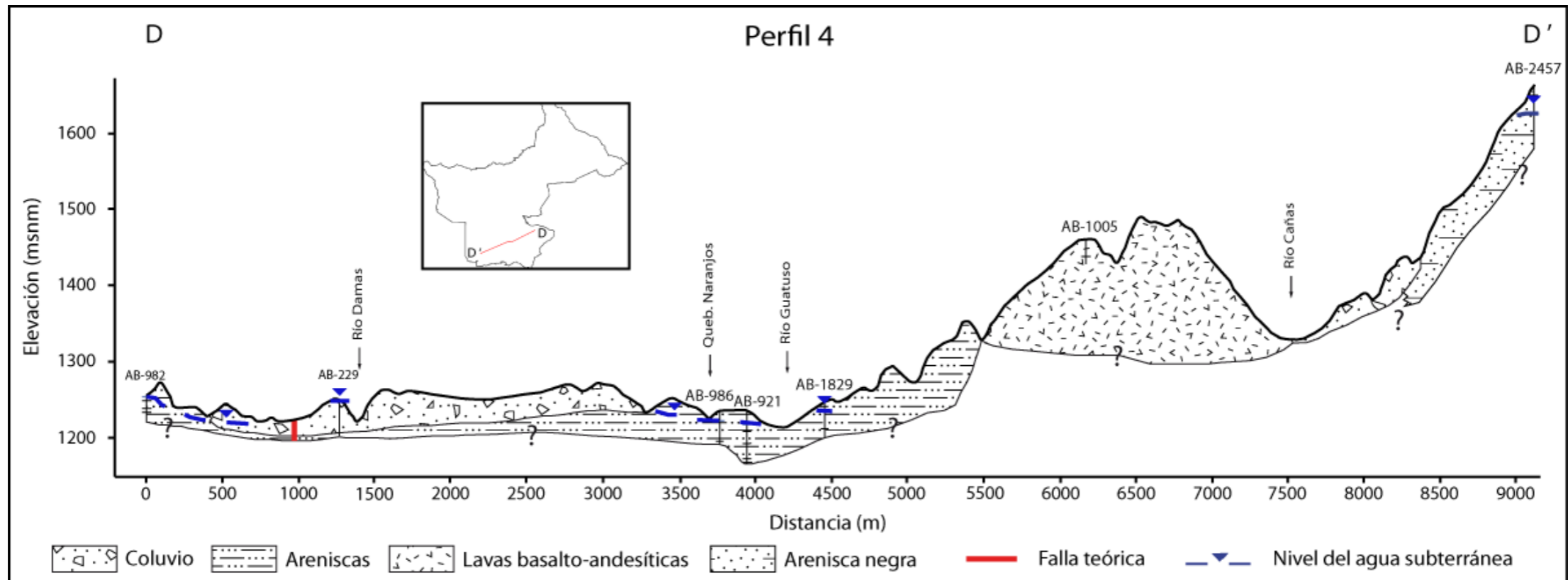
**Figura 5: Perfil 1.**



**Figura 6: Perfil 2.**



**Figura 7: Perfil 3.**



**Figura 8: Perfil 4.**

**Cuadro 1: Caudales y transmisividades del sector sur por cantón.**

<b>Formación</b>	<b>Cantón</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/d)</b>	<b>T (m<sup>2</sup>/d)</b>	<b>Pozos</b>
Pacacua	Escazú	233,4	31,62	AB-1478
Peña Negra	Aserri	190,08	212	AB-2457
Coris	Desamparados	-	1,47	AB-2447
		345,6	25	AB-986

Este mismo sector también se ve afectado por la presencia de materiales volcánicos (Figura 8) de edad Miocénica, el cual es asociado con la Formación La Cruz (Denyer & Arias, 1991), y que según las descripciones de los pozos consultados, corresponde con una lava basalto-andesítica de color gris, no muy densa, por lo que presenta una permeabilidad aparente media-alta.

En las regiones altas de los cerros de Escazú y Alajuelita afloran materiales relacionados con el Intrusivo de Escazú de edad Mio-Plioceno (Denyer & Arias, 1991), sin embargo en los perfiles no se ve reflejada esta formación como tal; sin embargo si se manifiesta en los coluvios que cubren estos cantones.

Las zonas donde se presentan las formaciones sedimentarias e intrusivas (sectores de Desamparados, Alajuelita y Escazú) poseen geoformas con pendientes fuertes y abanicos aluviales de gran espesor al pie de las zonas montañosas.

Debido a la poca información obtenida en estos sectores y la variedad de litologías, no se puede hablar de un acuífero en específico como se mencionó previamente.

Además de estas zonas productoras en rocas sedimentarias, se logró identificar un sistema acuífero en el sector central del área de estudio, compuesto por al menos 3 niveles productores, el cual se denominará “Sistema Acuífero San José”.

Este sistema acuífero está compuesto por rocas volcánicas y tendría su límite al sur del río Tiribí, ubicándose desde las cercanías de Vista Alegre, San Rafael de Escazú y el Cerro Palomas en el sector suroeste de la zona de estudio, hasta las cercanías San Rafael Arriba de Desamparados en el sector sur-sureste de dicha área (Figura 5).

A continuación se describen las características de este sistema acuífero.

### 3.2 Sistema Acuífero San José.

Este sistema acuífero está constituido por tres unidades hidrogeológicas:

- Unidad de piroclastos
- Unidad de brechas lávicas
- Unidad de lavas fracturadas

Estas unidades hidrogeológicas se encuentran ubicadas en una serie de materiales volcánicos del Pleistoceno, los cuales cubren gran parte de lo que se conoce como Valle Central.

Debido a la variación en los nombres que han sufrido estos materiales con el transcurso del tiempo, en el presente trabajo se decidió realizar una unificación de los nombres estratigráficos y los miembros designados a los respectivos nombres hidrogeológicos.

En el Cuadro 2 se observan los distintos nombres estratigráficos con los que han sido citados estos materiales volcánicos, sus principales referencias, la relación que poseen con las unidades hidrogeológicas y los acuíferos presentes en el área de estudio.

**Cuadro 2: Relación de la estratigrafía y la hidrogeología en el área de estudio.**

<b>Nombres estratigráficos</b>	<b>Nombres hidrogeológicos</b>		<b>Acuíferos al norte del río Virilla</b>	<b>Acuíferos al sur del río Virilla</b>
Fm Lahares y cenizas	-	-	-	Unidad de piroclastos
Fm Avalancha Ardiente	Fm Tiribí	Mb La Caja	Tiribí	
		Mb Electriona		
		Mb Nuestro Amo		
Fm Lavas Intracañón	Fm Colima	Mb Linda Vista	Colima Superior	Unidad de brechas lávicas
		Mb Puente de Mulas		
		Mb Belén	Colima Inferior	Unidad de lavas fracturadas
<b>Referencias</b>				
Williams, 1952	Fernández, 1969		Losilla, 1977	Se definen en este trabajo
Malavassi, 1965	Losilla, 1977			
Denyer & Arias, 1991	Echandi, 1981		SENARA & BGS, 1985	
	SENARA & BGS, 1985			



### **3.2.1 Unidad de piroclastos**

El primero y más superficial de los niveles de agua se encuentra en promedio a 10-15 mbns, el cual, al norte del área se ubica en una capa de tobas fracturadas con coloraciones café-amarillentas, compuesta por fragmentos y partículas piroclásticas incluidas en una matriz arenosa-cenicienta, parcialmente arcillificada y con un espesor mínimo de 57 m, en el sector central del área de estudio se ubica en una capa de lahares de color café, con fragmentos lávicos y una matriz limo-arenosa, pero que en algunos sectores se presenta de forma arcillosa, presenta un espesor máximo de 80 m y en el sector oeste de dicha área circula por distintos materiales aflorantes que se componen de tobas, lavas e ignimbritas de coloración grisácea y con un espesor máximo de 70 m.

Este cambio en la litología se debe a que el sector noreste del área de estudio (en las cercanías de Los Tanques de Moravia) se encuentra influenciado por los materiales volcánicos provenientes de lo que Denyer & Arias (1991) denominan Formación Avalancha Ardiente, de edad Pleistoceno, en el sector central los materiales que predominan son los lahares y cenizas producto de los edificios volcánicos actuales y en el sector oeste imperan de nuevo los materiales correspondientes con la Formación Avalancha Ardiente (Figura 9, 10, 12 y 13).

Este nivel es captado por la mayoría de pozos analizados y corresponde a un acuífero semiconfinado (Figura 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 y 17), ya que posee capas de suelo arcilloso, cenizas y/o tobas que se encuentran sobreyaciendo a los lahares, los cuales actúan como un acuitardo y generan una carga de presión que en algunos lugares sobrepasa los 20 m pero en otros sectores escasamente alcanza 1 m (Figura 11, 12, 13, 14 y 17).

Esta capa de lahares que sobreyace gran parte del área de estudio posee una geoforma de flujo, la cual proviene del sector este de dicha área.

Algunos pozos ofrecen los datos de la longitud de la rejilla, esta información se puede asociar al espesor del acuífero, por lo que dicho espesor varía entre los 10 y 30 m para esta unidad.

En el Cuadro 3 se presenta un resumen de las características básicas que permitieron la definición de la Unidad de piroclastos y las cuales fueron descritas detalladamente con anterioridad.

**Cuadro 3: Características básicas de la Unidad de piroclastos.**

<b>Características</b>	<b>Unidad de piroclastos</b>
Litología predominante	Lahares, tobas, lavas e ignimbritas
Espesor promedio (m)	20
Profundidad del agua (mbns)	10-15
Grado de confinamiento	Semiconfinado
Unidad estratigráfica	Lahares y cenizas y Avalancha Ardiente
Edad	Pleistoceno

***Características hidráulicas de la Unidad de piroclastos***

Algunos de los expedientes de los pozos analizados para esta unidad muestran los datos de caudal y transmisividad; sin embargo no incluyen las pruebas de bombeo correspondientes. Estos parámetros son presentados a continuación (Cuadro 4), expresando los caudales -Q- en m<sup>3</sup>/d (metros cúbicos por día) y transmisividades -T- en m<sup>2</sup>/d (metros cuadrados por día) por cantón.

**Cuadro 4: Caudales y transmisividades de la Unidad de piroclastos por cantón.**

<b>Cantón</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/d)</b>	<b>T (m<sup>2</sup>/d)</b>	<b>Pozos</b>
Montes de Oca	64,8	-	AB-361
Curridabat	82,08	-	AB-207
	172,8	0,074	AB-1330
Desamparados	604,8	-	AB-2387
	-	140	AB-1993
Goicoechea	126,14	22,8	AB-2014
Tibás	108,86	-	AB-11
San José	15,55	36	AB-1373
	216	-	AB-1979
Coronado	172,8	5,6	AB-2252
	-	6,3	IS-81
Alajuelita	103,68	-	AB-2155
Escazú	1,73	10,75	AB-2350
	138,24	1	AB-1615

El caudal presentado es bajo en la mayoría de los cantones en comparación con las otras dos unidades que se explicaran más adelante; esto debido a la constante impermeabilización de los suelos que se presenta en las zonas medias de recarga de este nivel.

### **3.2.2 Unidad de brechas lávicas**

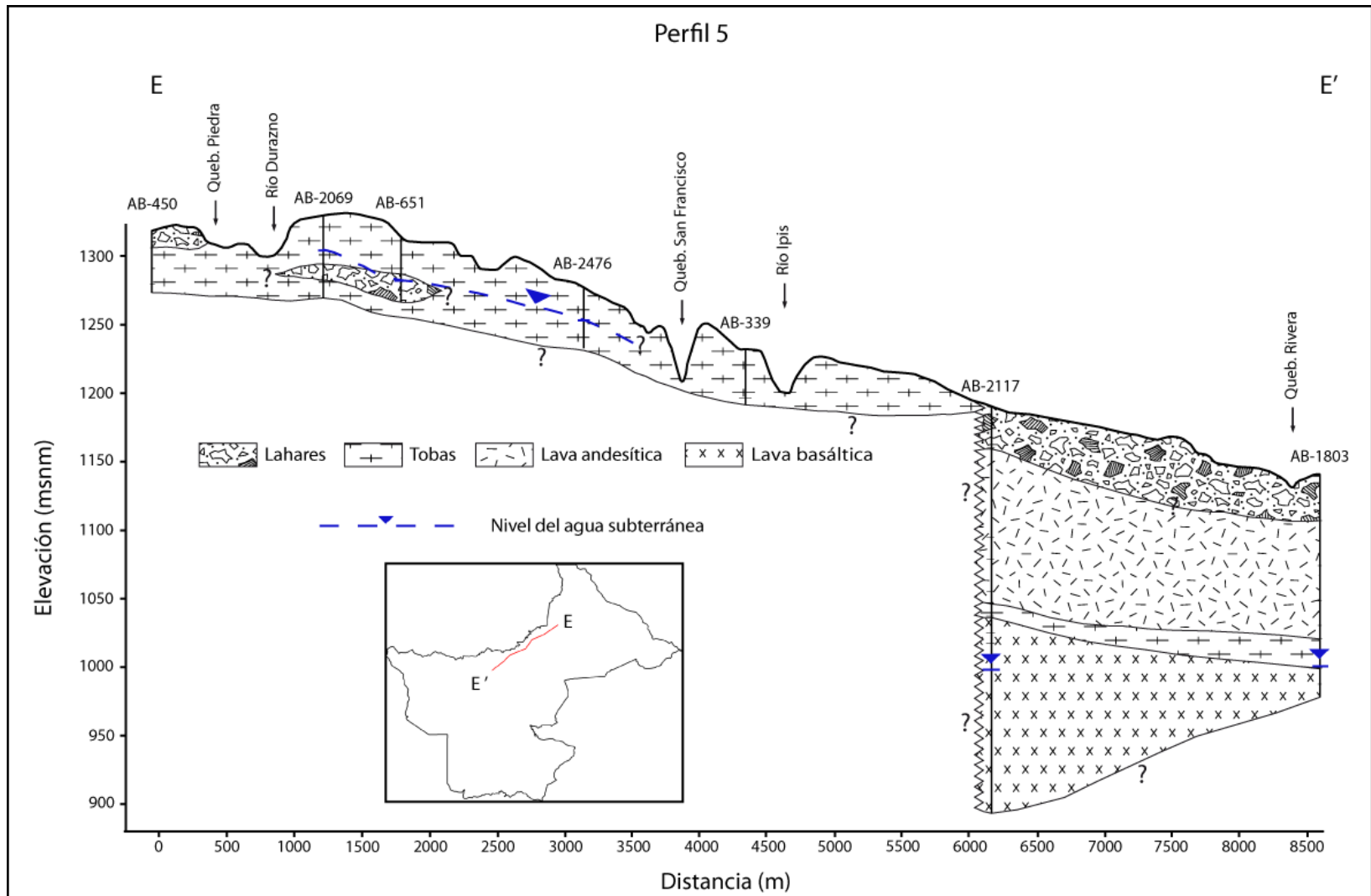
El segundo nivel se encuentra a una profundidad entre los 60-120 mbns, localizado en una capa de brechas lávicas y lavas densas fracturadas de composición andesítica, con coloraciones que van desde un tono rojizo hasta el gris oscuro; en algunos sectores esta roca se encuentra fracturada, dándole una permeabilidad aparente media-alta, no obstante en otros sectores se presenta la roca sana y muy densa; originando una permeabilidad aparente baja. Estas brechas y lavas poseen un espesor máximo aproximado a los 100 m y se encuentran sobreyacidas por los lahares y/o tobas mencionados anteriormente. Por la ubicación en la que se encuentra esta secuencia litológica, es asociable al Miembro Linda Vista, el cual, en este trabajo se relaciona a la Formación Lavas Intracañón descrita anteriormente por Echanti (1981) para el sector norte del río Virilla, sin embargo, esta unidad acuífera no es asociable a la unidad hidrogeológica Colima Superior ya que existe una barrera hidrogeológica entre ambas unidades hídricas como lo es el río Virilla, además la procedencia de sus aguas es diferente, así como la dirección en que estas circulan.

Algunas capas de lahares, tobas muy compactas o ignimbritas que sobreyacen a esta unidad, le dan características que corresponden a un acuífero semiconfinado, ya que las mismas funcionarían como acuitardos o acuícludos, dependiendo del contenido de arcillas que posean y generan una carga de presión que oscila entre los 12 m y 55 m.

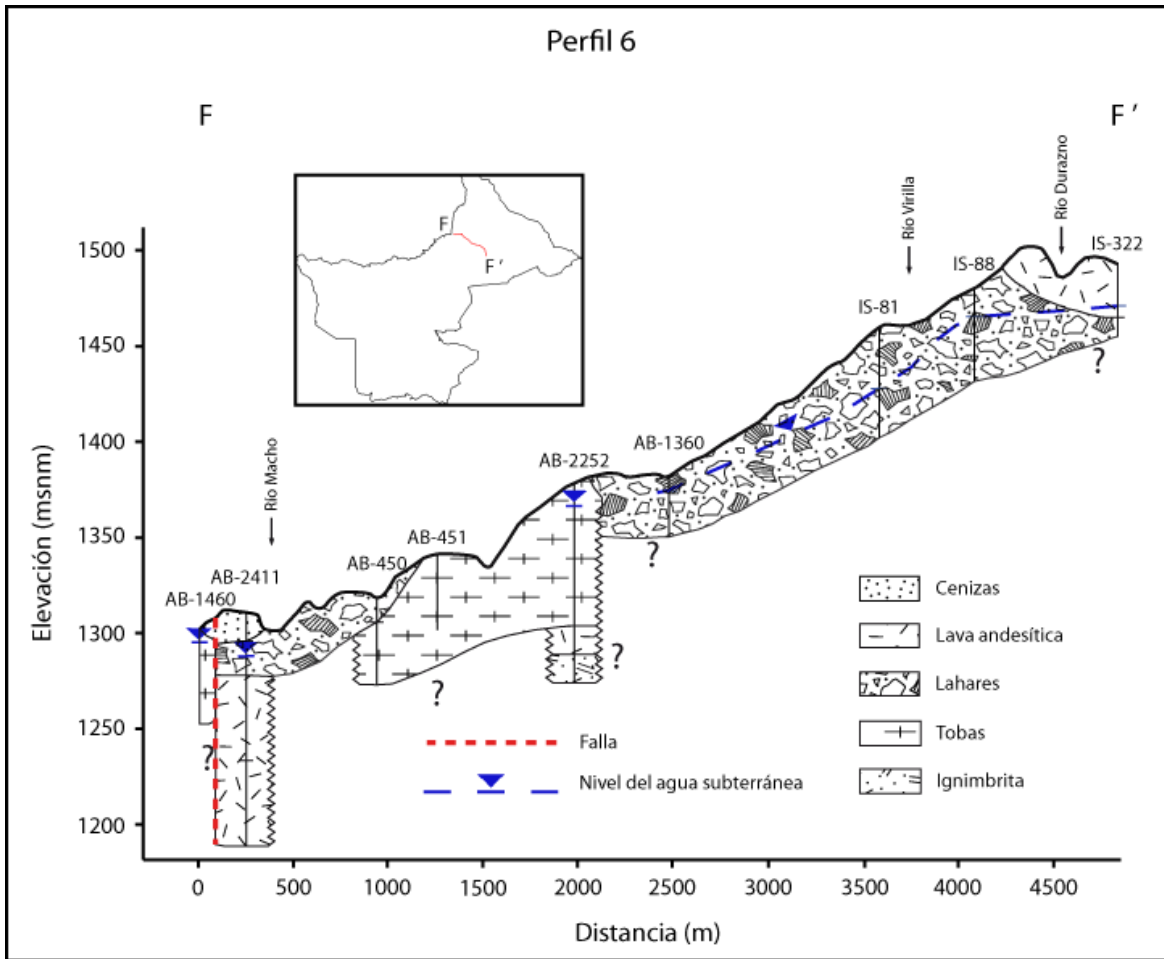
De igual manera, estas brechas y lavas se encuentran sobreyaciendo a una capa de toba café/rojiza de espesor variable (entre 20 m y 30 m) muy arcillosa, cuya permeabilidad aparente va de baja a muy baja (Figura 9, 12, 13, 16 y 17).

El espesor del acuífero obtenido de los datos de la longitud de la rejilla que ofrecen algunos de los pozos que captan este nivel, varía entre los 15 m y 60 m.

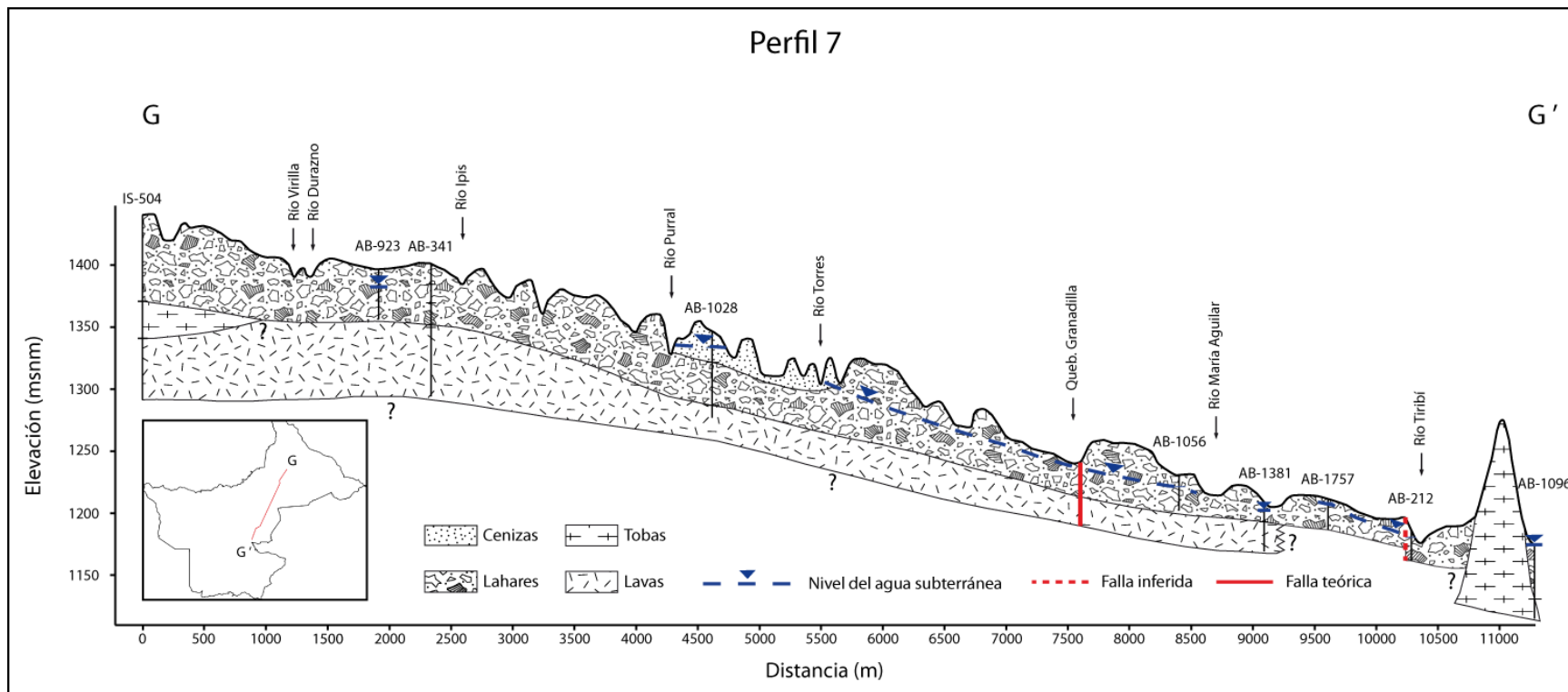
En el Cuadro 5 se presenta un resumen de las características básicas que permitieron la definición de la Unidad de brechas lávicas y las cuales fueron descritas detalladamente con anterioridad.



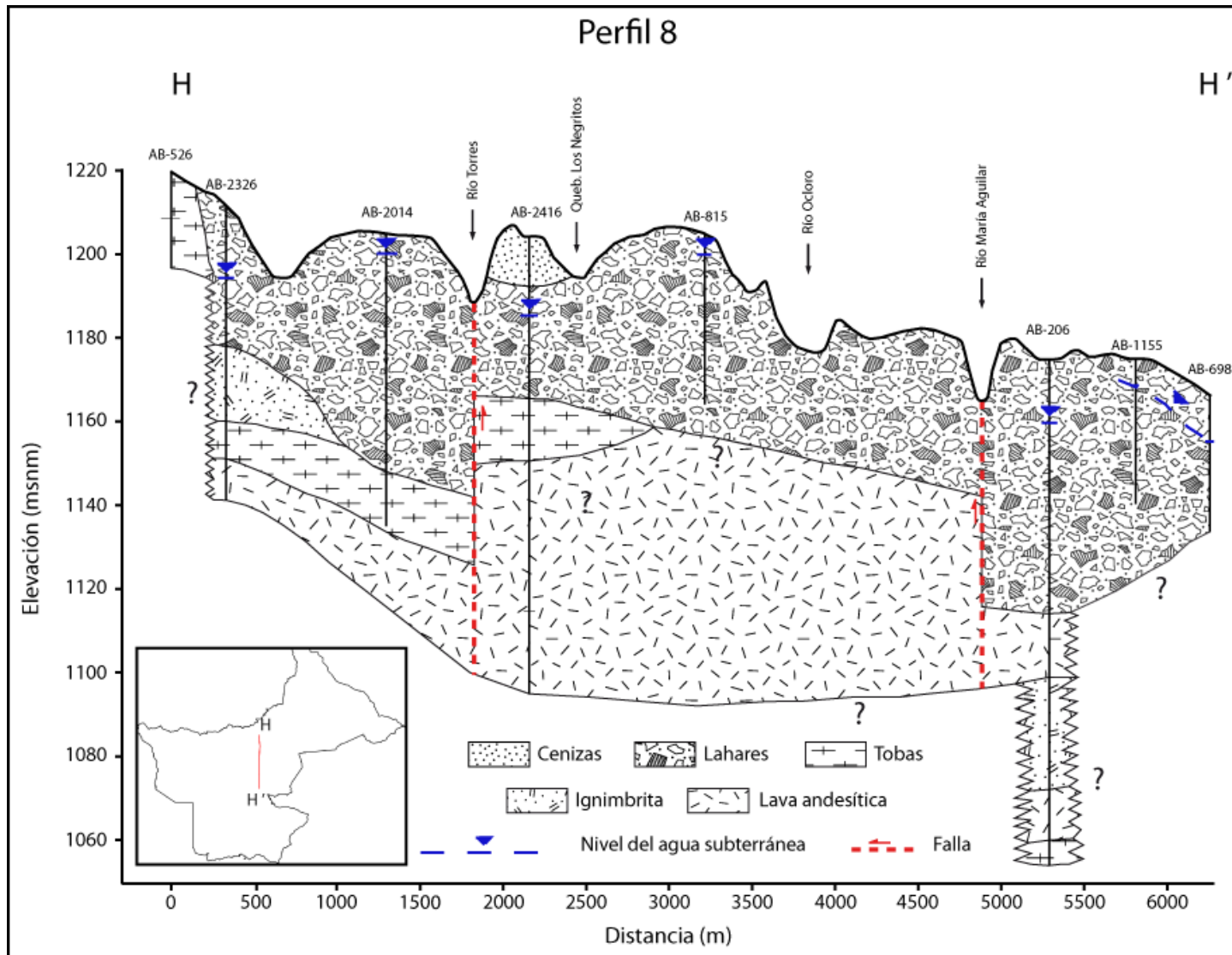
**Figura 9: Perfil 5.**



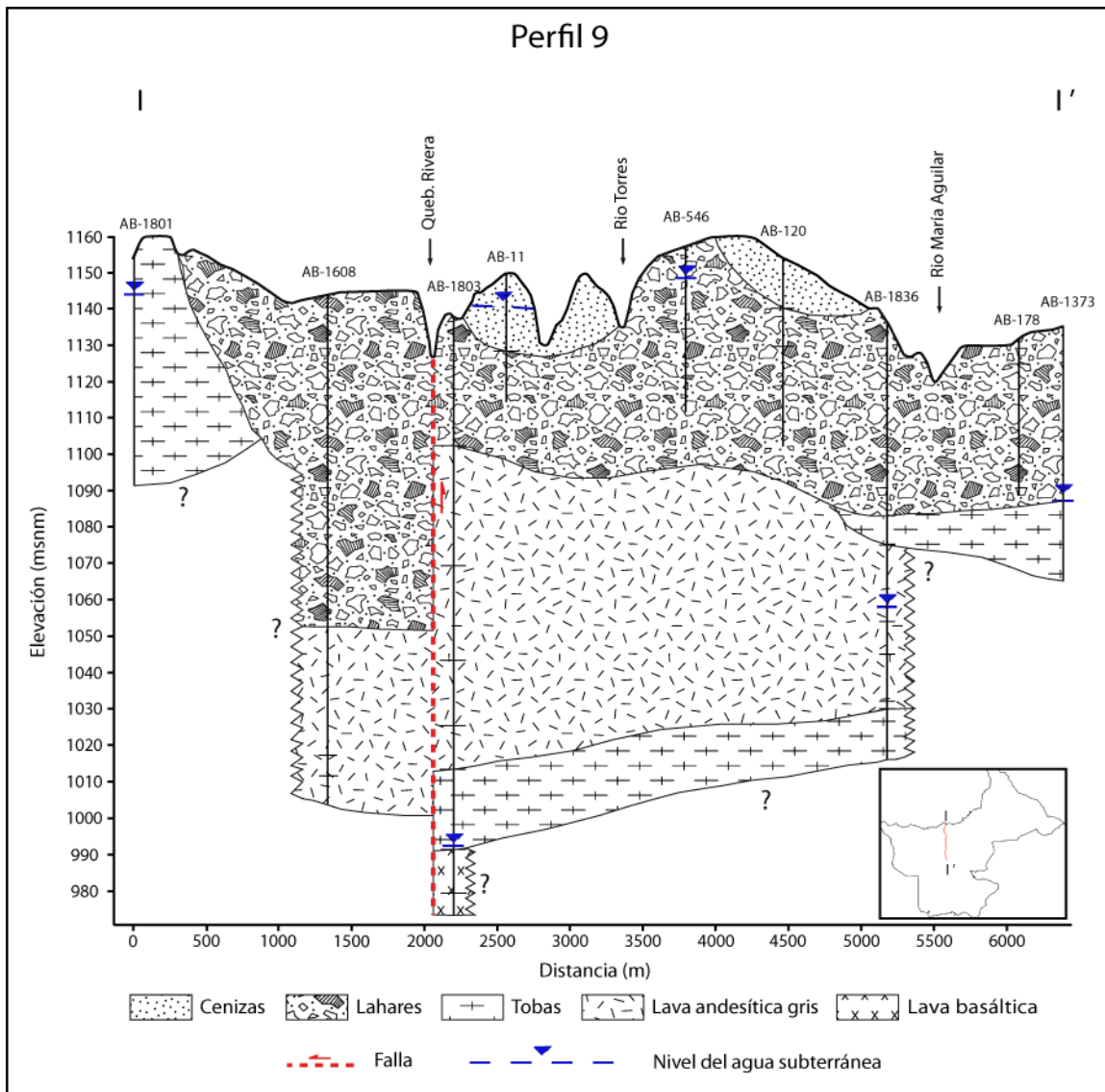
**Figura 10: Perfil 6**



**Figura 11: Perfil 7.**

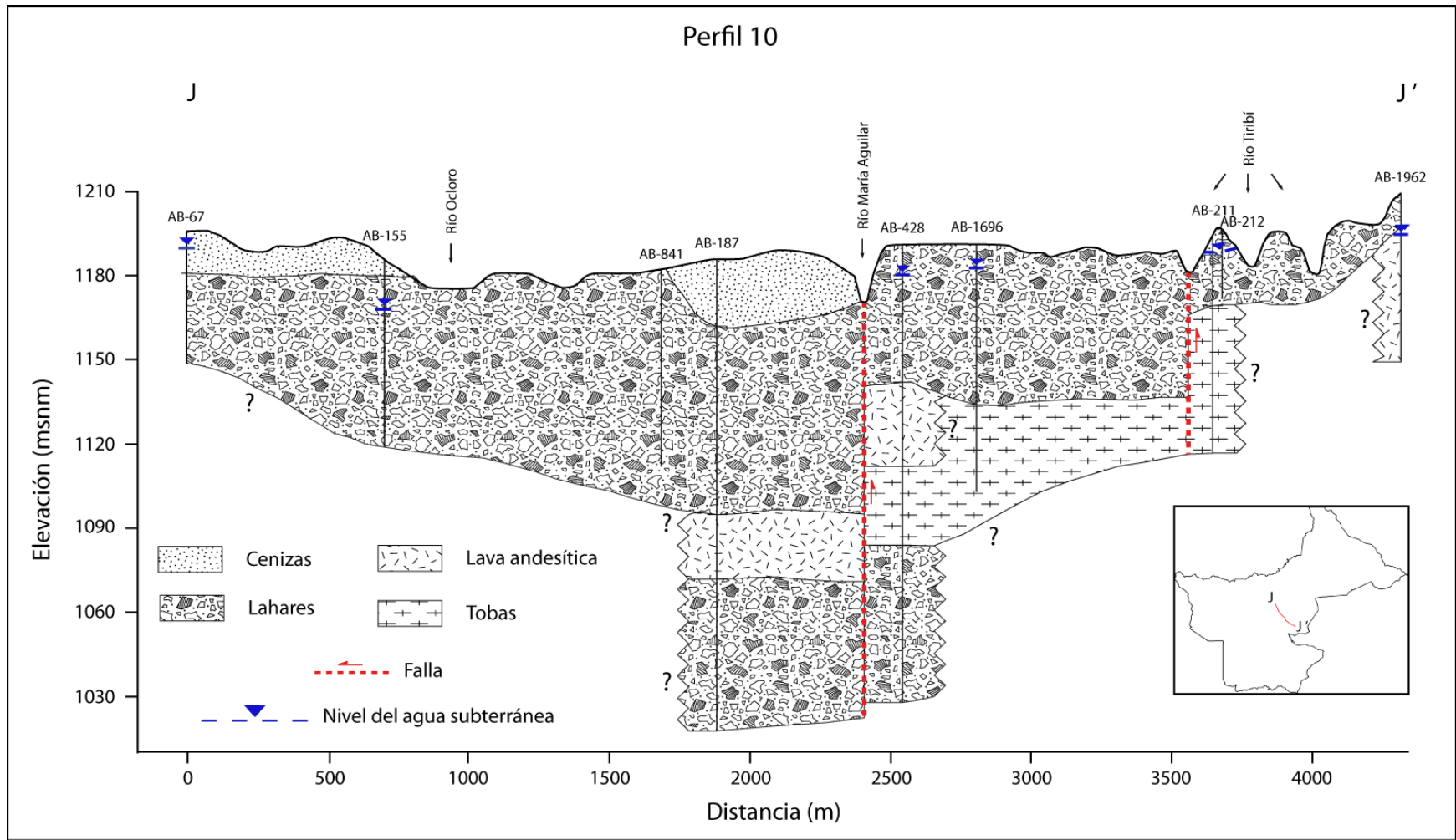


**Figura 12: Perfil 8.**

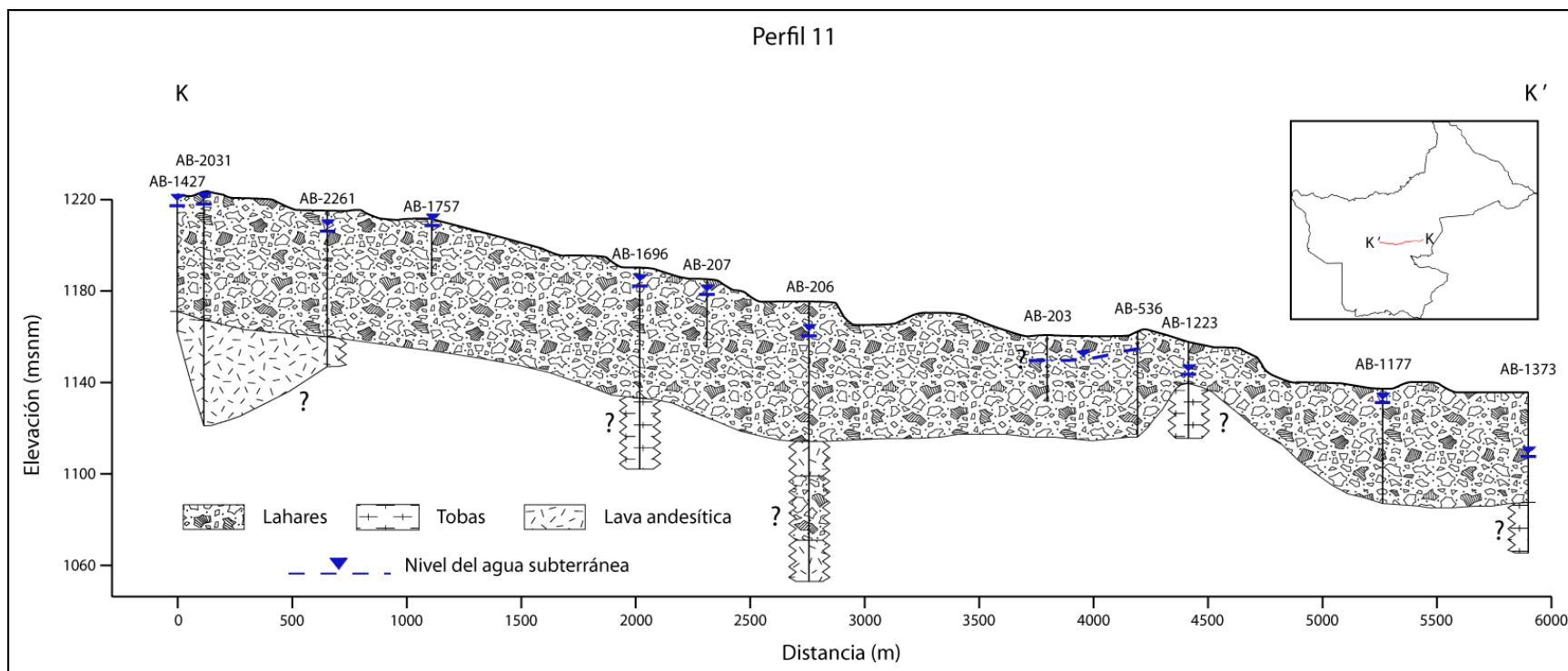


**Figura 13: Perfil 9.**

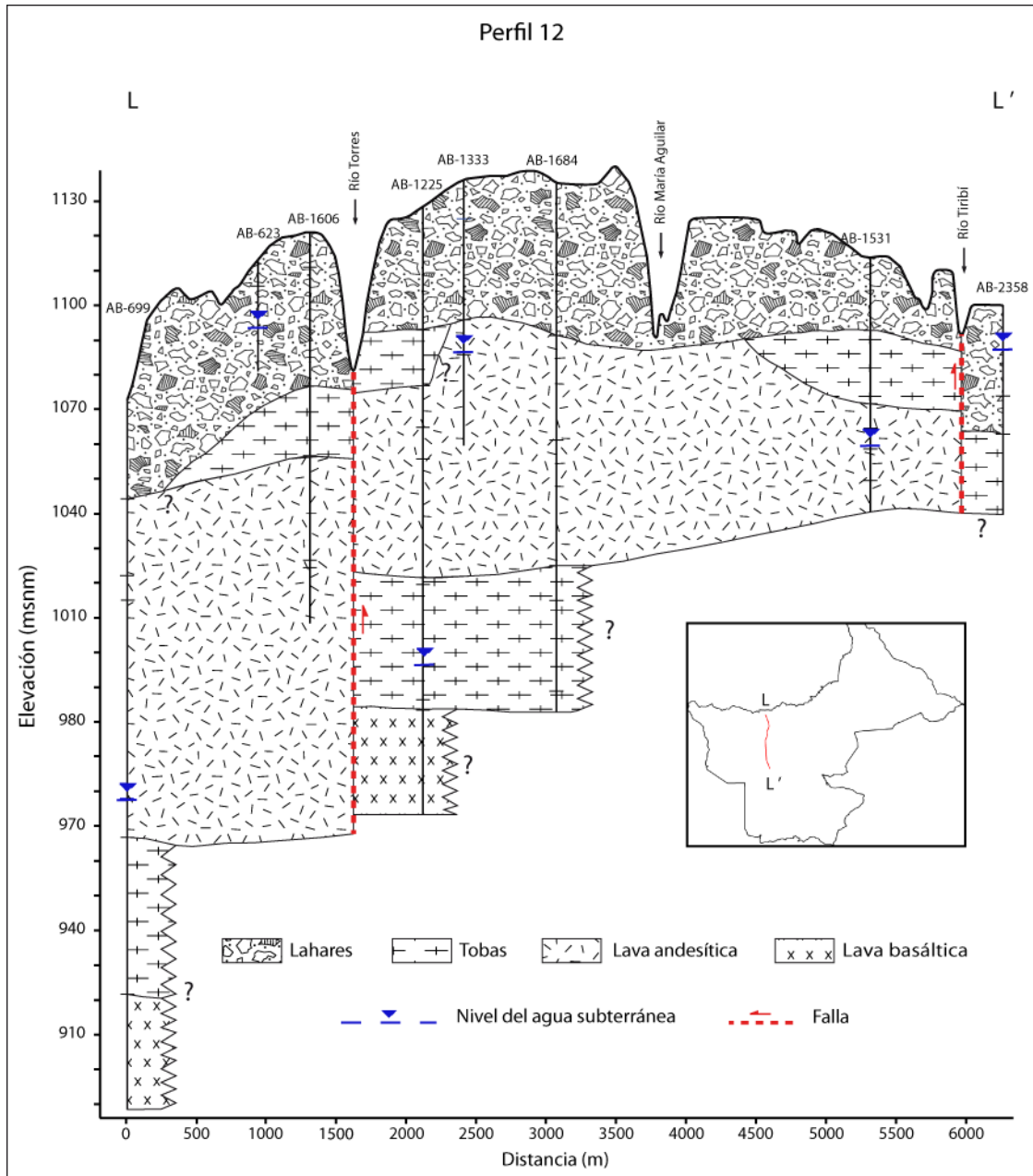




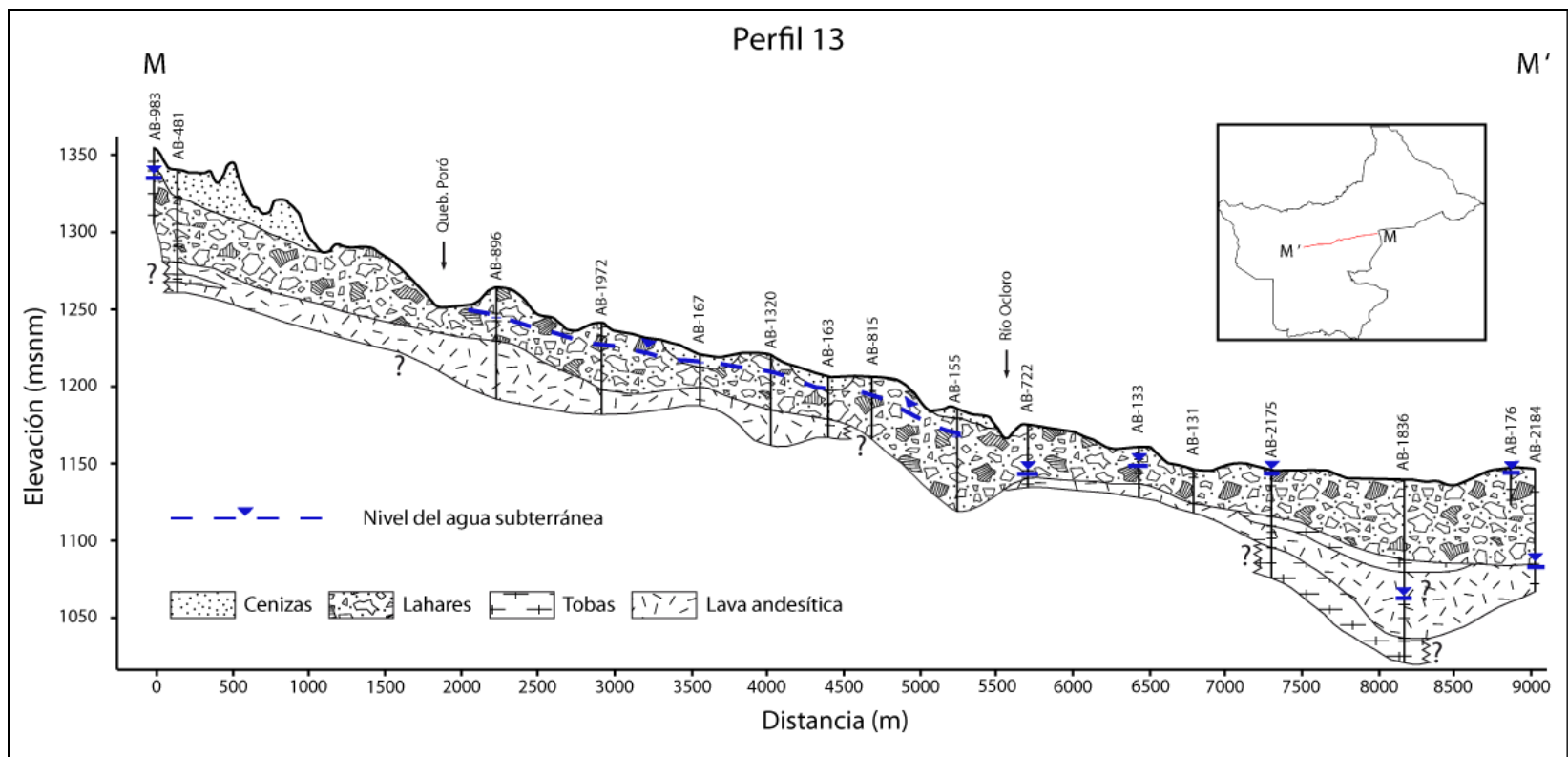
**Figura 14: Perfil 10.**



**Figura 15: Perfil 11.**



**Figura 16: Perfil 12.**



**Figura 17: Perfil 13.**

**Cuadro 5: Características básicas de la Unidad de brechas lávicas.**

Características	Unidad de brechas lávicas
Litología predominante	Lavas y brechas lávicas
Espesor promedio (m)	35
Profundidad del agua (mbns)	70-80
Grado de confinamiento	Semiconfinado
Unidad litoestratigráfica	Miembro Linda Vista, Fm. Lavas Intracañón
Edad	Pleistoceno

***Características hidráulicas de la Unidad de brechas lávicas***

El nivel de agua que se encuentra en estas brechas lávicas, según la información obtenida de varios de los pozos analizados refleja que el caudal de esta unidad es mayor que el de la unidad de piroclastos (Cuadro 6).

De la misma manera que para la Unidad de piroclastos, los datos mostrados a continuación fueron obtenidos de expedientes que aunque no incluyen la prueba de bombeo correspondiente, si muestran los valores de caudal y transmisividad obtenidos en dicho pozo.

**Cuadro 6: Caudales y transmisividades de la Unidad de brechas lávicas por cantón.**

Cantón	Q (m <sup>3</sup> /d)	T (m <sup>2</sup> /d)	Pozos
Montes de Oca	146,88	25	AB-1320
	-	16	AB-2416
	1296	-	AB-896
Curridabat	80,35	-	AB-2261
	216	2,6	AB-206
Tibás	820,8	5900	AB-697
Escazú	9,50	20	AB-2438
San José	138,24	1	AB-1521
	340,42	-	AB-1118

Sin embargo, para esta unidad fue posible obtener 7 expedientes de pozos con pruebas bombeo, no obstante dos de estos fueron descartados por varias razones:

- Los expedientes se encontraban incompletos.
- Las pruebas de bombeo eran de poca duración, por lo que no era posible evaluar la verdadera capacidad del nivel de agua.
- Las pruebas de bombeo se estabilizaban rápidamente, esto debido a que la transmisividad del pozo era mucho mayor que el caudal que se estaba extrayendo; por lo que igualmente no era posible evaluar la verdadera capacidad del nivel.

Las pruebas de bombeo a las que si fue posible realizar los análisis para calcular la transmisividad y el caudal ofrecieron los siguientes resultados (Cuadro 7).

**Cuadro 7: Resultados de las pruebas de bombeo de la Unidad de brechas lávicas.**

Cantón	Q (m <sup>3</sup> /d)	T (m <sup>2</sup> /d)		Pozos
		Bombeo	Recuperación	
Montes de Oca	172,8	3,77	-	AB-519
Escazú	86,4	1,21	-	AB-2266
San José	168,48	1,31	2,33	AB-1521
	464,83	45,57	26,85	AB-2109
	787,97	577,40	-	AB-2489

Estos resultados fueron obtenidos graficando el abatimiento del pozo con respecto al tiempo de la prueba de bombeo o la prueba de recuperación. Los gráficos que ofrecieron estos resultados se pueden apreciar en la sección de anexos.

Como se puede apreciar en el cuadro anterior correspondiente al segundo nivel (Unidad de brechas lávicas), los caudales tienden a ser semejantes entre los pozos que presentan las pruebas de bombeo y los que no la presentan; sin embargo los valores de la transmisividad reflejan variaciones en la mayoría de los casos con excepción del pozo AB-1521.

### **3.2.3 Unidad de lavas fracturadas**

El tercer nivel se encuentra a una profundidad promedio de 165 m, extendiéndose desde los 140 mbns hasta los 190 mbns, localizado en una capa de lavas negras fracturadas de composición andesítica-basáltica y de permeabilidad aparente alta. Estas lavas se encuentran sobreyacidas por la toba arcillosa de color café/rojiza mencionada anteriormente y poseen un espesor estimado en 150 m según los datos interpretados en el perfil 5 (Figura 9). Este nivel es captado por pocos pozos que sobrepasan los 100 mbns y corresponde a un acuífero confinado, ya que la toba sobreyacente actúa como un acuicludo y se genera una carga de presión aproximada a los 27 m (Figura 9 y 13).

Esta Unidad de lavas fracturadas, de acuerdo con la profundidad a la que fue descrita y la litología que comprende, correspondería con el Miembro Belén, el cual en este trabajo, se relaciona con la Fm. Lavas Intracañón; sin embargo, la unidad acuífera no es asociable a la unidad hidrogeológica Colima Inferior debido a la barrera hidrogeológica que conforma el río Virilla.

Los datos de la longitud de la rejilla, los cuales se asocian al espesor del acuífero varían entre los 15 y 20 m.

En el Cuadro 8 se presenta un resumen de las características básicas que permitieron la definición de la Unidad de lavas fracturadas y las cuales fueron descritas detalladamente con anterioridad.

**Cuadro 8: Características básicas de la Unidad de lavas fracturadas.**

<b>Características</b>	<b>Unidad de lavas fracturadas</b>
Litología predominante	Lavas andesíticas-basálticas
Espesor promedio (m)	20
Profundidad del agua (mbns)	165
Grado de confinamiento	Confinado
Unidad estratigráfica	Miembro Belén, Fm. Lavas Intracañón
Edad	Pleistoceno

***Características hidráulicas de la Unidad de lavas fracturadas***

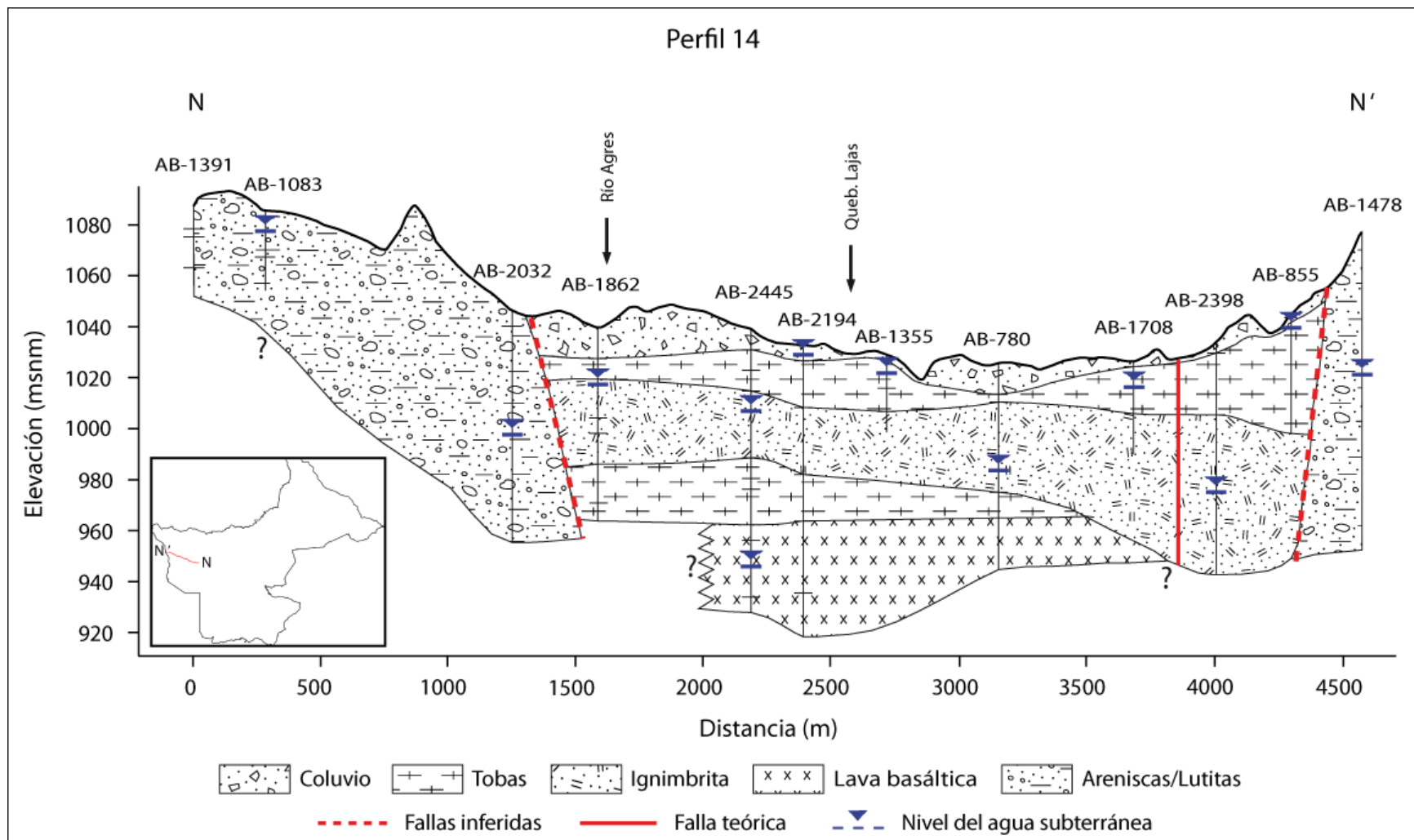
Este tercer nivel, según la información obtenida de dos de los pozos analizados presenta los caudales (Q) y transmisividades (T) que se muestran en el Cuadro 9.

**Cuadro 9: Caudales y transmisividades de la Unidad de lavas fracturadas por cantón.**

<b>Cantón</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/d)</b>	<b>T (m<sup>2</sup>/d)</b>	<b>Pozos</b>
San José	203,90	1075	AB-1279
Curridabat	2586,82	-	AB-187

A pesar de la poca información obtenida para este nivel, se puede apreciar que en el sector de Curridabat posee un caudal importante; sin embargo difiere en gran medida con el caudal obtenido en el cantón central de San José.

En el sector oeste del área de estudio se complica el análisis de los niveles productores ya que existe una interacción fuerte entre las rocas sedimentarias correlacionadas con la Formación Pacacua y los materiales volcánicos que rellenan el Valle Central (Figura 18). Esta interacción provoca que no exista un nivel de agua definido, ya que los materiales se encuentran muy fracturados, producto de su enfriamiento característico y también del fracturamiento secundario producto del fallamiento que afecta la zona y el cual se mencionará posteriormente.



**Figura 18: Perfil 14.**



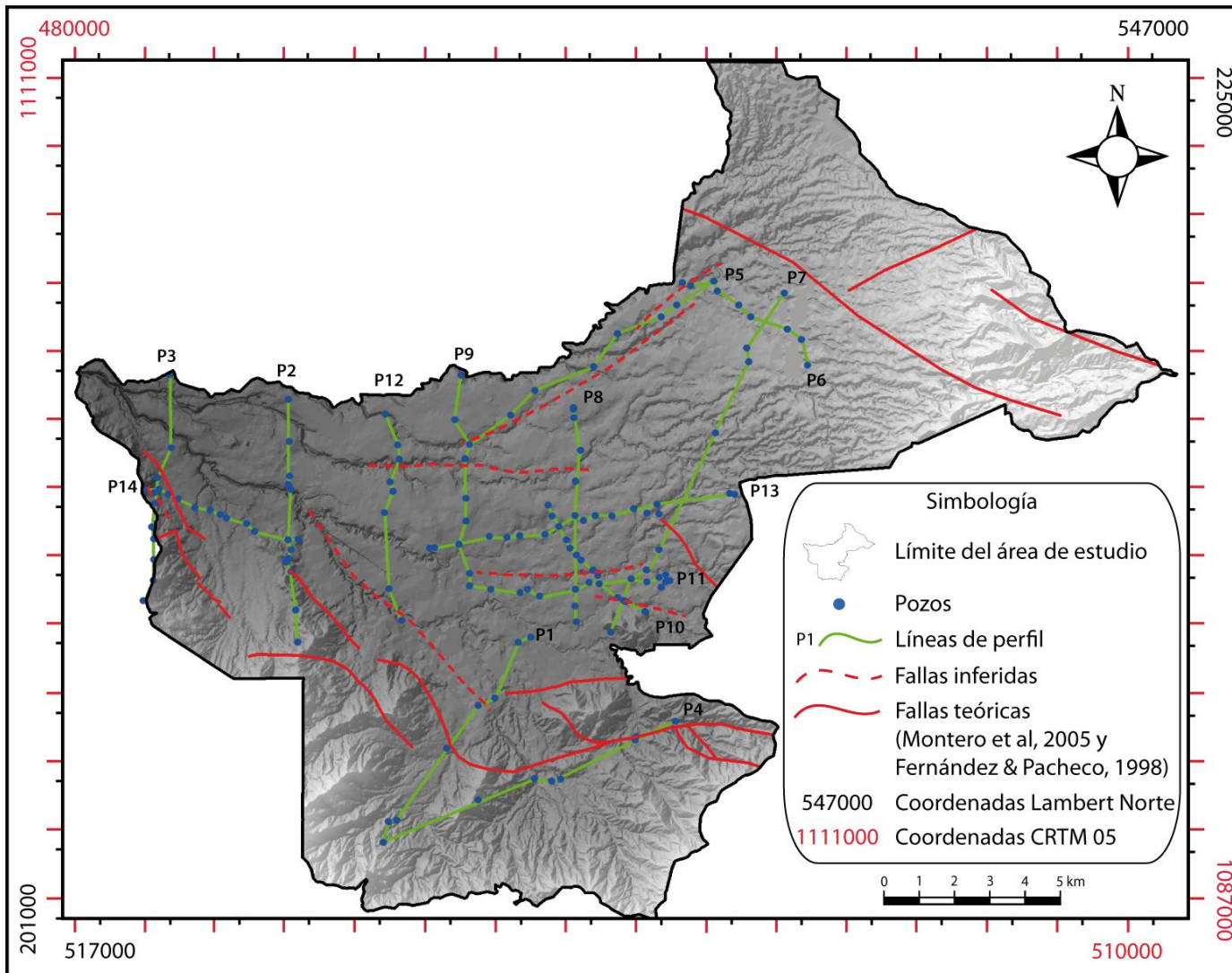
### **3.3 Influencia de las estructuras geológicas en la hidrogeología**

Los tres niveles de agua obtenidos para el área de estudio se encuentran afectados por fallas en varios sectores de dicha área (Figura 5, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16 y 18), como es el caso de algunos tramos de los ríos Tiribí, María Aguilar, Cañas, Macho, Torres y las quebradas San Francisco y Rivera, las cuales, por lo analizado en los perfiles poseen componentes gravitacionales, sin embargo, geomorfológicamente no se observan indicios del tipo de falla que representan, más allá de una aparente alineación en ciertos sectores de dichos ríos y quebradas.

Un ejemplo de este fallamiento se observa entre los pozos AB-2014 y AB-2416 que se encuentran en el perfil 8 (Figura 12), en el cual se aprecia un ascenso de las capas de tobas y lavas; las cuales se elevan aproximadamente 30 m con respecto al nivel que poseen las mismas en otros pozos cercanos. De igual manera, en el perfil 9 (Figura 13) en la Quebrada Rivera se registra un desplazamiento de aproximadamente 50 m en las capas de lahares y lavas que se encuentran en el lugar.

Por otra parte, en los sectores oeste y sur del área de estudio es apreciable que algunas de las fallas que afectan esta zona podrían ser producto del contacto entre los materiales sedimentarios y los volcánicos (Figura 5, 7 y 18). Estas fallas son nombradas por Fernández & Montero (2002) como: falla Escazú y falla Belo Horizonte.

La ubicación del fallamiento inferido en los perfiles y las fallas teóricas tomadas de Montero *et al.*, (2005) se presenta en la Figura 19.



**Figura 19: Mapa de fallas teóricas e inferidas.**

## 4 Modelo hidrogeológico

Debido a las dificultades y limitantes en la información para realizar un mapa hidrogeológico completo para cada nivel de agua dentro del área de estudio, se presentaron los modelos hidrogeológicos de los sectores que muestran datos congruentes para cada uno de los niveles interpretados.

Posteriormente se analizará a manera de resumen la interacción que se presenta entre las tres unidades hidrogeológicas interpretadas en el denominado Sistema Acuífero San José.

### 4.1 Extensión de las unidades hidrogeológicas

Los mapas de extensión de las unidades hidrogeológicas (Figura 20 y 21) reflejan la zona correspondiente a cada nivel, obtenida a partir de los expedientes de pozos adquiridos de la base de datos del SENARA, junto con la información de fallas teóricas tomadas de Montero *et al.* (2005) y Fernández & Pacheco (1998), así como las fallas inferidas con base en los perfiles realizados sobre los niveles interpretados anteriormente en la presente investigación.

Cabe resaltar que solo fue posible realizar el modelado hidrogeológico para las unidades de piroclastos y de brechas lávicas. En el caso de la Unidad de lavas fracturadas, la información obtenida fue insuficiente para realizar el modelo, debido a que solo dos pozos cortaban este nivel, por lo que los datos existentes eran muy pocos para interpretar adecuadamente dicha unidad.

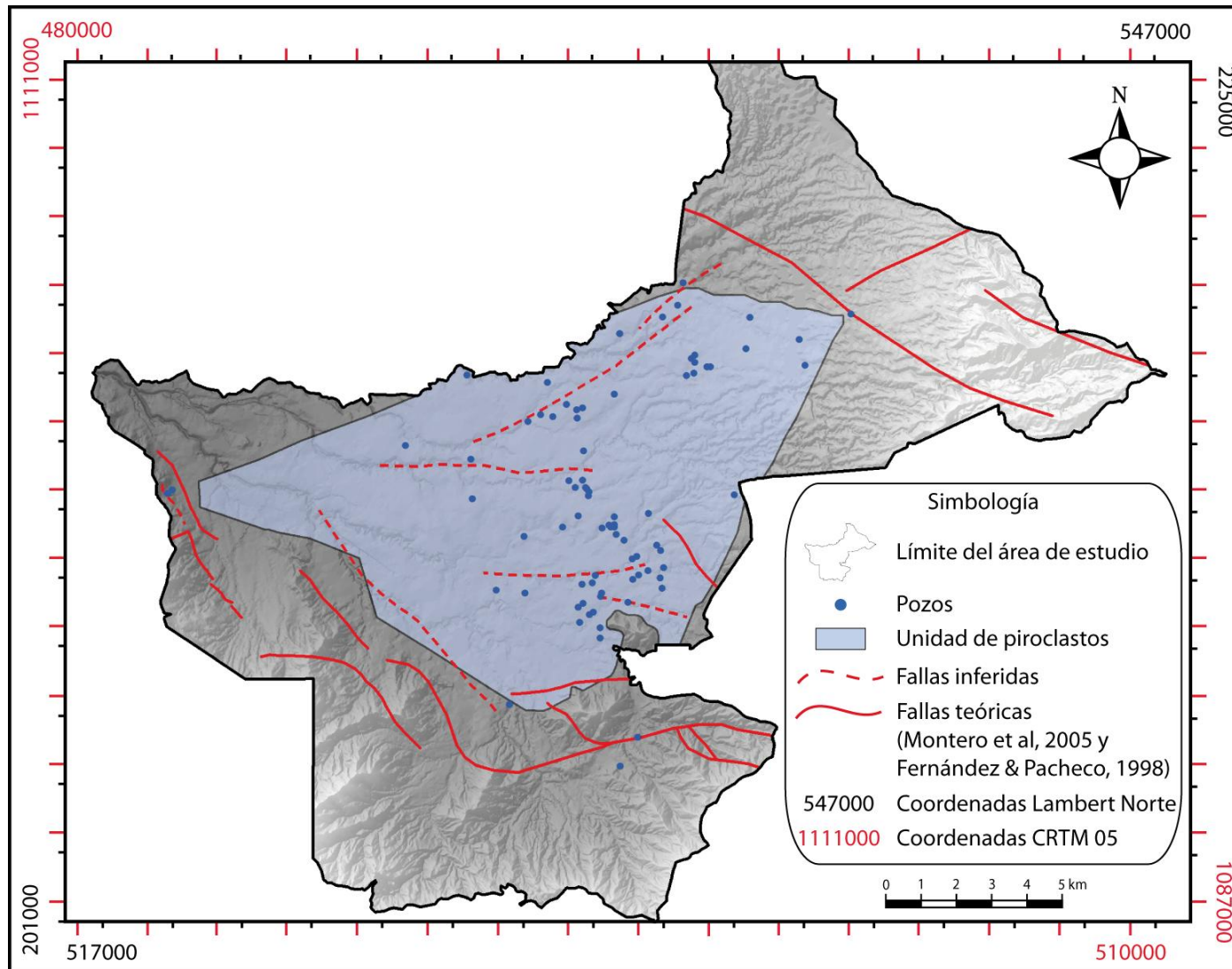
### 4.2 Equipotenciales

Con los datos de elevación de los niveles piezométricos del agua subterránea obtenidos de algunos de los pozos registrados en la base de datos del SENARA y las áreas elaboradas anteriormente, se realizaron los mapas de equipotenciales de la Unidad de piroclastos y la Unidad de brechas lávicas.

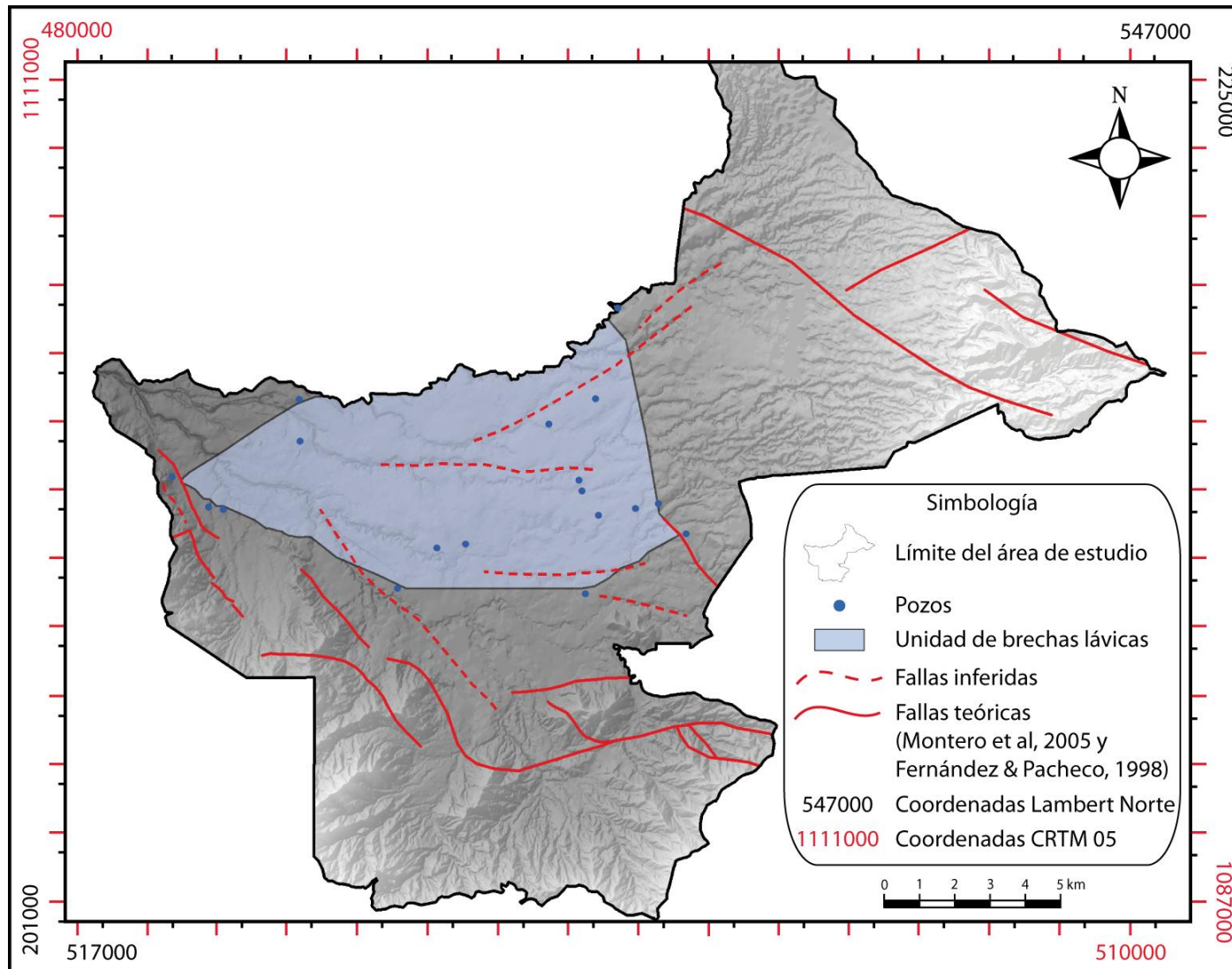
Debido a que no todos los pozos presentan la información de los niveles piezométricos, se realizó una selección de los que sí ofrecían esta información y que se ajustaban a la realidad de cada nivel.

Estas equipotenciales se realizaron utilizando diferentes métodos de interpolación existentes en el programa Surfer 10. Cada método puede ofrecer una representación distinta de los datos, las diferencias entre dichos métodos son los algoritmos matemáticos utilizados para computar los pesos durante la interpolación.

El método de interpolación que generó los mejores resultados en función de la cantidad y distribución de los datos fue el método de “Triangulación e interpolación lineal”, ya que su algoritmo crea triángulos dibujando las líneas entre los puntos de los datos.



**Figura 20: Extensión interpretada de la Unidad de piroclastos.**



**Figura 21: Extensión interpretada de la Unidad de brechas lávicas.**

Los puntos originales se conectan de tal manera que ningún borde del triángulo se cruza con otros triángulos. El resultado es un mosaico de caras triangulares encima de la magnitud de la reja.

Cada triángulo define un nivel encima de los nodos de la reja que quedan dentro del triángulo, con la inclinación y elevación determinadas por los tres puntos originales de los datos que definen dicho triángulo (Entombo, 2013).

En la Figura 22 se puede observar que las equipotenciales de la Unidad de piroclastos poseen una dirección hacia el oeste en sector este y central del área de estudio y hacia el noroeste en el sur de dicha área, lo que indica que la fuente de recarga de dicho nivel proviene principalmente de los sectores de Coronado, Montes de Oca, Moravia y Goicoechea.

En el caso de la Unidad de brechas lávicas, se contaba con menos información para interpolar el área de estudio en comparación con la Unidad de piroclastos, sin embargo el comportamiento obtenido es muy similar (Figura 23), ya que se distingue que el flujo de agua procede del sector este del área de estudio.

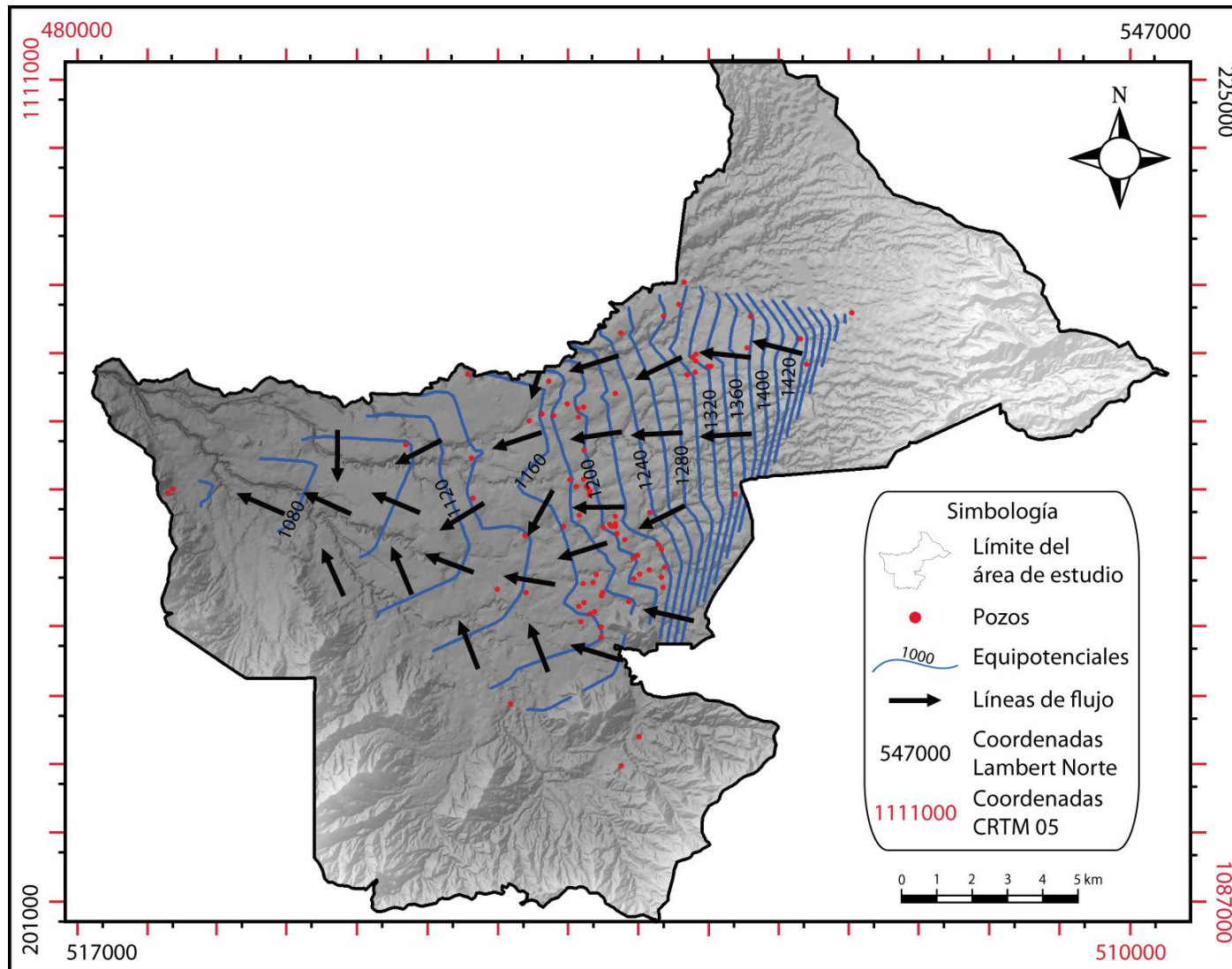
### **4.3 Patrón de drenaje**

Una vez realizadas las redes de flujo de los dos niveles, se aprecia la relación que posee principalmente la Unidad de piroclastos con respecto al patrón de drenaje que existe en el área de estudio; así como la afectación que provoca el fallamiento en dichos parámetros.

En el sector este y noreste del área de estudio (Moravia, Coronado, Montes de Oca y Zapote) se aprecia que los principales ríos que transitan por esta zona podrían comportarse de manera influente con respecto a la Unidad de piroclastos y la Unidad de brechas lávicas, lo que sugiere que estos ríos (R. Ipis, Queb. San Francisco, R. Torres y el R. Ocloro) podrían recargar en cierto grado a estos niveles. Por el contrario, el río Tiribí y el María Aguilar se comportarían de manera efluente en los sectores de Desamparados y Pavas, lo que significaría que la Unidad de piroclastos y la Unidad de brechas lávicas descargarían sus aguas en dichos ríos (Figura 24 y 25).

Estas observaciones se infieren al observar el comportamiento de las equipotenciales en los alrededores de los ríos mencionados, ya que se observa como las líneas equipotenciales se alejan (río influente) o se aproximan (río efluente) con respecto a los ríos. Esto concuerda con lo expuesto por Schosinsky & Vargas (2001) para el sector de Pavas y alrededores, en donde se menciona que el acuífero descarga sus aguas en este sector del área de estudio.

Con respecto a las fallas que se encuentran en la zona de estudio, se aprecia como las fallas que fueron inferidas con base en los perfiles realizados influyen en el desplazamiento del agua subterránea en cada uno de los niveles, ejerciendo un cierto alineamiento del flujo de agua en las zonas en donde se encuentran dichas fallas (Figura 24 y 25).



**Figura 22: Equipotenciales de la Unidad de piroclastos.**

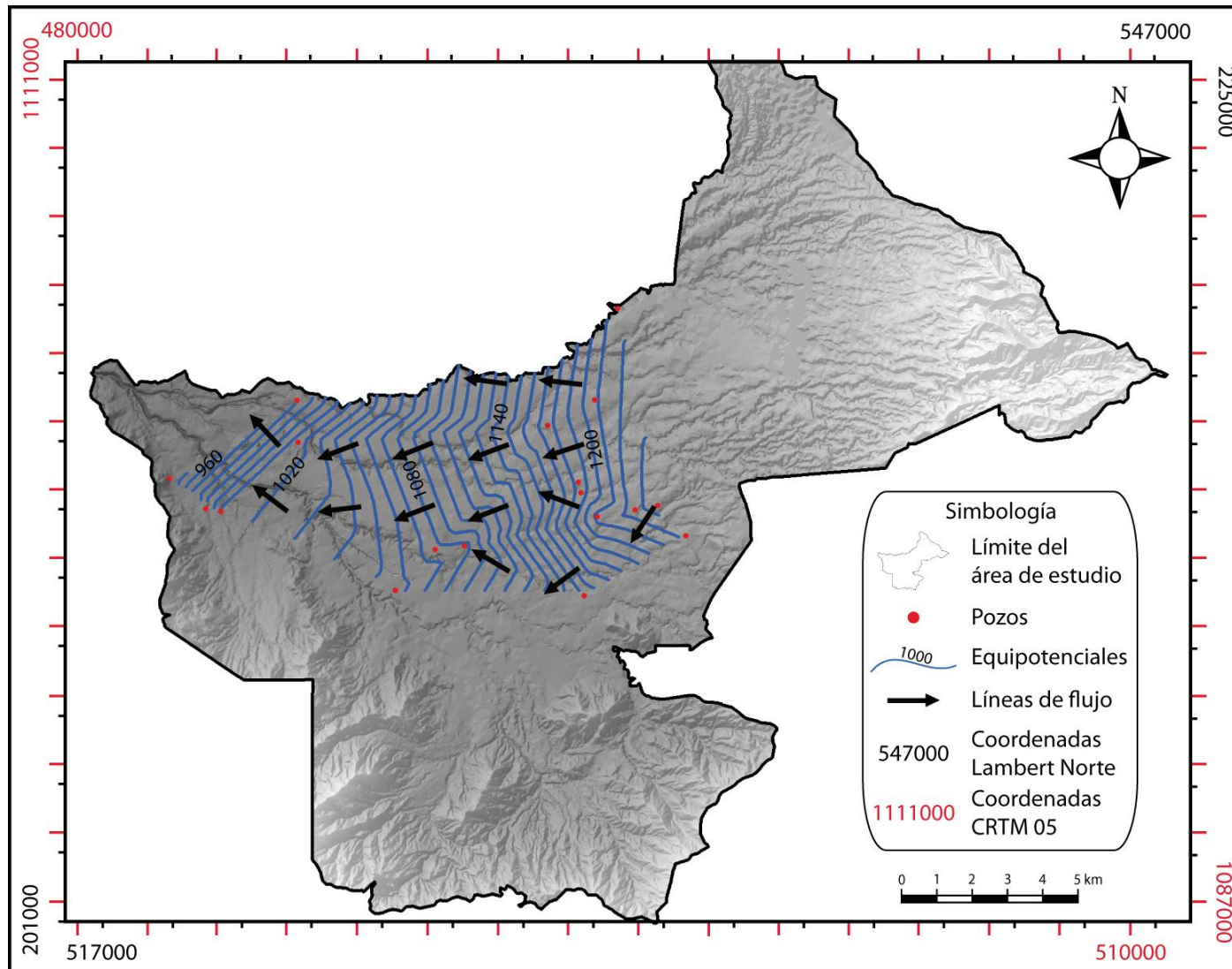
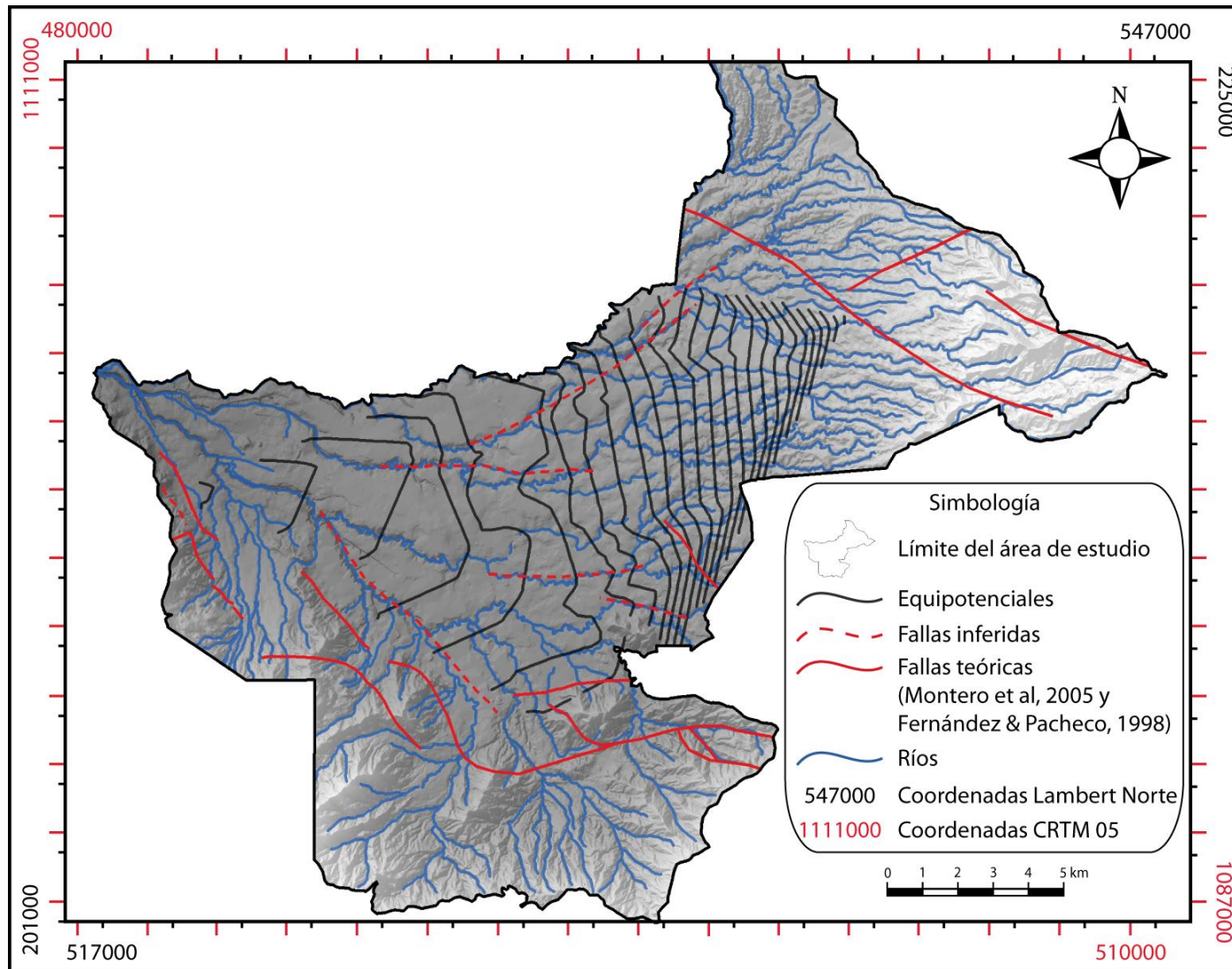
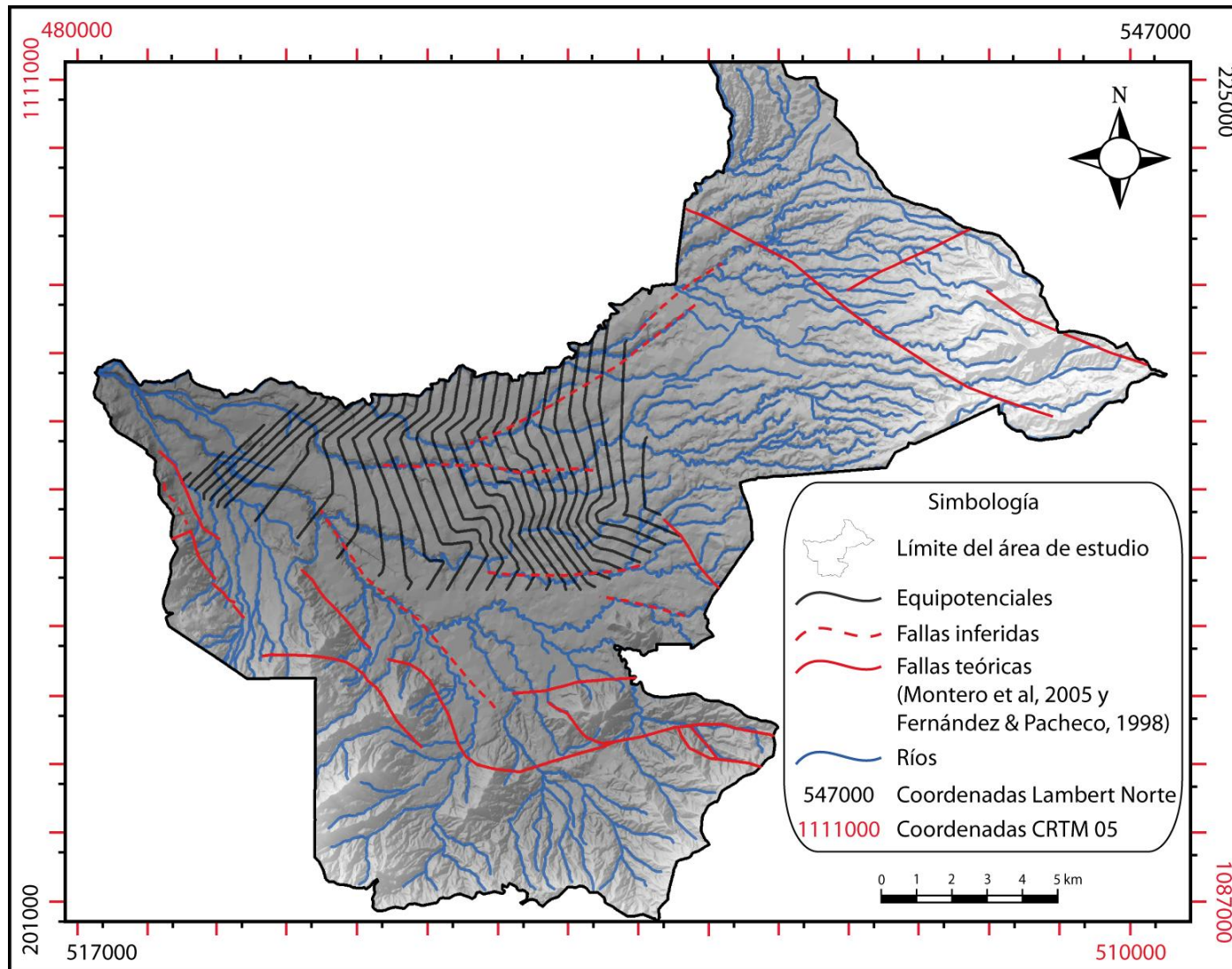


Figura 23: Equipotenciales de la Unidad de brechas lávicas.





**Figura 24: Patrón de drenaje y fallas que afectan a la Unidad de piroclastos.**



**Figura 25: Patrón de drenaje y fallas que afectan a la Unidad de brechas lávicas.**

#### **4.4 Modelo conceptual del Sistema Acuífero San José**

Para obtener una visión más práctica de la situación real del sistema acuífero que abarca el área de estudio, se realizó en este apartado un resumen que permite simplificar o idealizar la naturaleza de dicho sistema desde un contexto geológico e hidrogeológico.

El área de estudio que comprende un sector de la margen izquierda del río Virilla fue investigada y analizada por medio de una serie de perfiles realizados con la información de pozos obtenidos de la base de datos del SENARA; dichos perfiles dieron como resultado la presencia de tres niveles (unidades) de agua en una secuencia de materiales volcánicos, los cuales conforman el Sistema Acuífero San José.

Al pretender definir el área correspondiente a cada unidad acuífera surgió la limitante de la información, ya que la mayor cantidad de pozos se encuentran en el sector urbano del área de estudio y son muy pocos y con escasa información, los pozos que se encuentran en las zonas rurales del área.

Es por esta razón que se presentan los modelos hidrogeológicos de los sectores que muestran la mayor cantidad de datos para cada uno de los niveles interpretados.

La Unidad de piroclastos se ubica entre varios materiales volcánicos de unos 70-80 m de espesor, siendo el material de mayor importancia la capa de lahares y cenizas que cubre gran parte del área de estudio. La parte superior de estos materiales están compuestos por una capa de arcillas las cuales actúan como acuitardos y le da un grado de confinamiento a la unidad hidrogeológica. Esta unidad origina un nivel de agua de bajo potencial y próximo a la superficie del terreno, además posee un espesor aproximado de 20 m.

La Unidad de brechas lávicas se encuentra separada de la Unidad de piroclastos por medio de capas de tobas, ignimbritas o de los mismos lahares mencionados anteriormente, los cuales actúan como acuitardos o acuícludos, dependiendo del contenido de arcilla que posean. Esta unidad se localiza en una capa de brechas lávicas y lavas densas fracturadas, las cuales poseen un espesor aproximado de 100 m y corresponde a uno de los acuíferos más importantes de esta zona. Esta unidad hidrogeológica posee un espesor aproximado de 35 m.

La Unidad de brechas lávicas se encuentra sobreyaciendo a una capa de tobas con un espesor de 20-30 m. Dicha capa funciona como capa sello, confinando el piso de dicha unidad y el techo de la Unidad de lavas fracturadas; la cual se encuentra en una capa de

lavas negras fracturadas que poseen un espesor aproximado de 150 m, sin embargo el espesor del acuífero es de 20 m e igualmente corresponde a uno de los acuíferos más importantes de la zona de estudio.

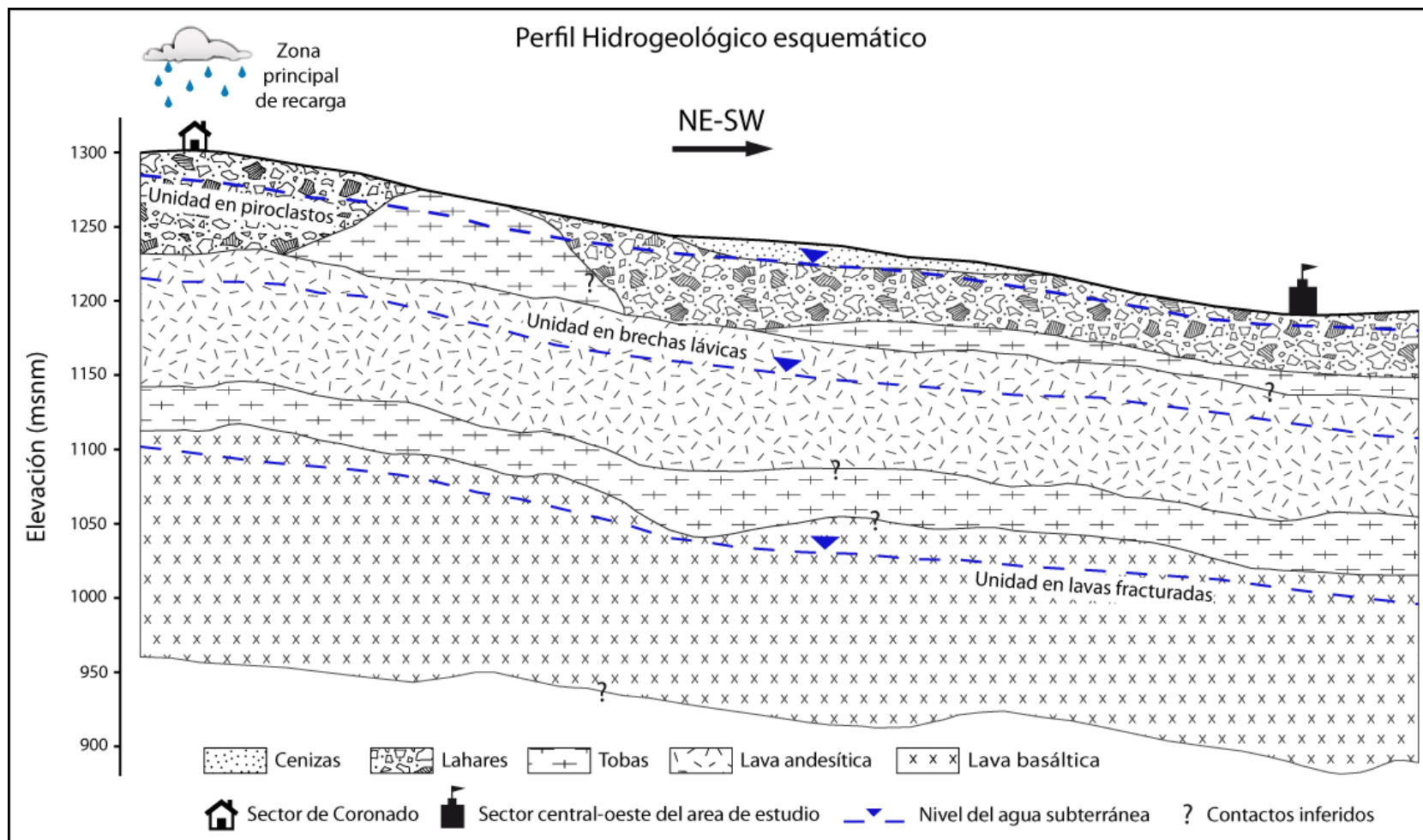
Con los perfiles realizados, se interpretaron una serie de fallas en varios sectores del área de estudio, que afectan tanto a la litología como a las equipotenciales de las unidades hidrogeológicas. Aunque no hay evidencia morfológica del tipo de falla que representan, se observan en profundidad desplazamientos cercanos a los 40-50 m entre los techos o pisos de las diferentes capas de materiales volcánicos.

En general las equipotenciales de las unidades interpretadas en el Sistema Acuífero San José poseen una dirección este-oeste, lo que sugiere que la recarga de las unidades hídricas proviene del sector de Coronado y alrededores (falda oeste del volcán Irazú). Esta última observación concuerda con lo expuesto por Ramírez (2007). Igualmente algunos de los principales ríos que se encuentran en los sectores de Moravia, Coronado, Montes de Oca y Zapote se comportarían de manera influente con respecto a la Unidad de piroclastos y la Unidad de brechas lávicas, por otro lado en los sectores de Desamparados y Pavas los principales ríos tendrían un comportamiento efluente. Cabe resaltar que conforme el río Tiribí profundiza su cauce; se convierte en una barrera hidrogeológica al suroeste del área de estudio.

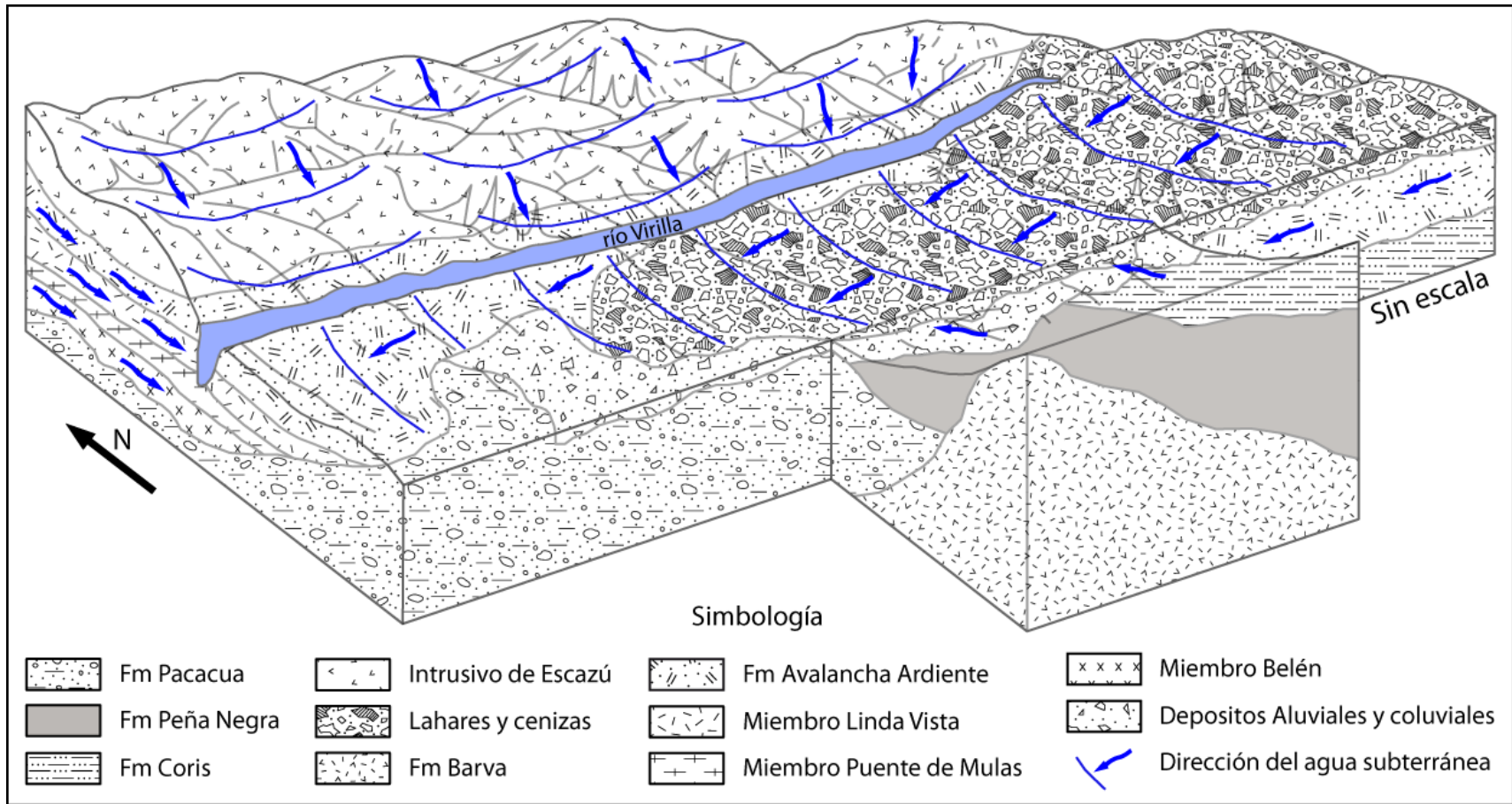
En la Figura 26 se representa gráficamente el modelo conceptual de la zona abarcada por el Sistema Acuífero San José.

Aunque no era un objetivo de la presente investigación, y a modo de referencia y comparación con lo realizado por Echandi (1981), se realizó un bloque diagrama que representa las unidades de roca que se encuentran en el sector norte del río Virilla con las unidades de roca presentes al sur de dicho río, así como los acuíferos o unidades hidrogeológicas que se encuentran en las litologías de ambos sectores (Figura 27).

Como es evidente y se ha mencionado anteriormente, la litología que impera a ambos lados del río Virilla es la misma; sin embargo, debido a la barrera hidrogeológica que conforma este río, las unidades acuíferas son distintas. Al norte del río Virilla la zona de recarga se encuentra en las laderas del volcán Barva, siendo la zona de descarga el mismo río Virilla; mientras que al sur de dicho río la zona de recarga se encuentra en las laderas del volcán Irazú, descargando igualmente en el río Virilla.



**Figura 26: Perfil esquemático del modelo conceptual hidrogeológico.**



**Figura 27: Croquis comparativo hidrogeológico al norte y sur del río Virilla.**

## 5 Vulnerabilidad de los acuíferos

Como se mencionó anteriormente, para calcular la vulnerabilidad de los acuíferos en la margen izquierda del río Virilla se utilizó el método GOD establecido por Foster (1987). Este método se realiza tomando en cuenta la ocurrencia del agua subterránea o grado de confinamiento del acuífero (G), el tipo de sustrato litológico que sobreyace al acuífero (O) y la profundidad del nivel del agua (D).

Debido a que el área de estudio posee rocas de tipo volcánico, sedimentario e intrusivo, se decidió realizar el método GOD solo para las zonas cubiertas por las rocas volcánicas recientes.

La razón de esta condicionante se centra en que las redes de flujo que se obtuvieron para el área de estudio se localizan en gran parte de lo que se conoce como el Área Metropolitana, zona que yace sobre estas rocas volcánicas.

Además las rocas de origen sedimentario que se encuentran en el área de estudio poseen condiciones adversas para la circulación del agua subterránea, ya que poseen un alto contenido de arcillas. El agua que se logra infiltrar posee un bajo caudal como se mencionó en el capítulo anterior, se encuentra a pocos metros de profundidad y en algunos sectores su volumen depende de la época lluviosa que impere en el momento por lo que no es un flujo constante.

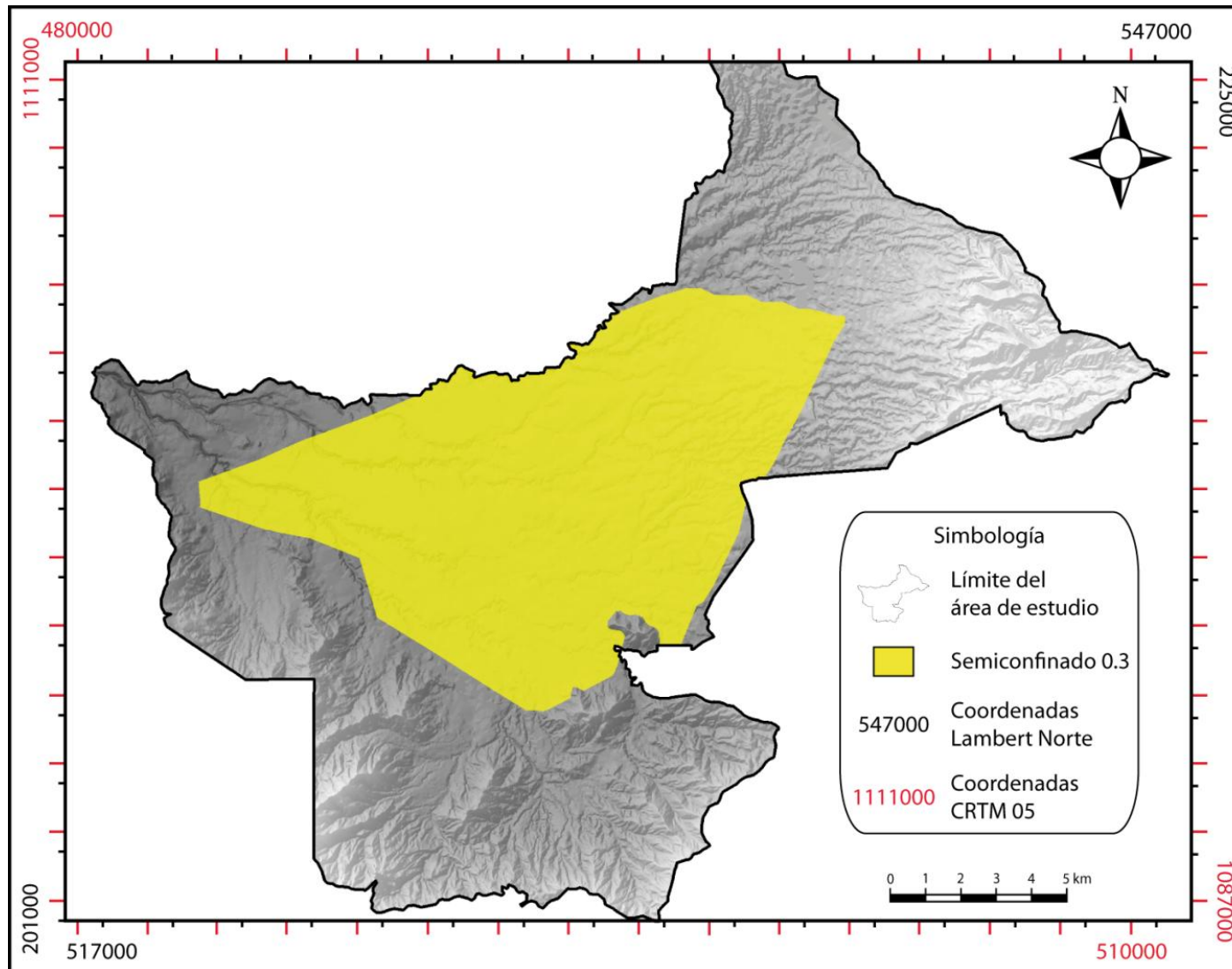
Por otra parte, también se consideró que existe poca información proveniente de los pozos obtenidos de la base de datos del SENARA para estas zonas.

### 5.1 Grado de confinamiento del acuífero

Para la determinación de la ocurrencia del agua subterránea o grado de confinamiento del acuífero se utilizó la información de algunos de los pozos provenientes de la base de datos del SENARA.

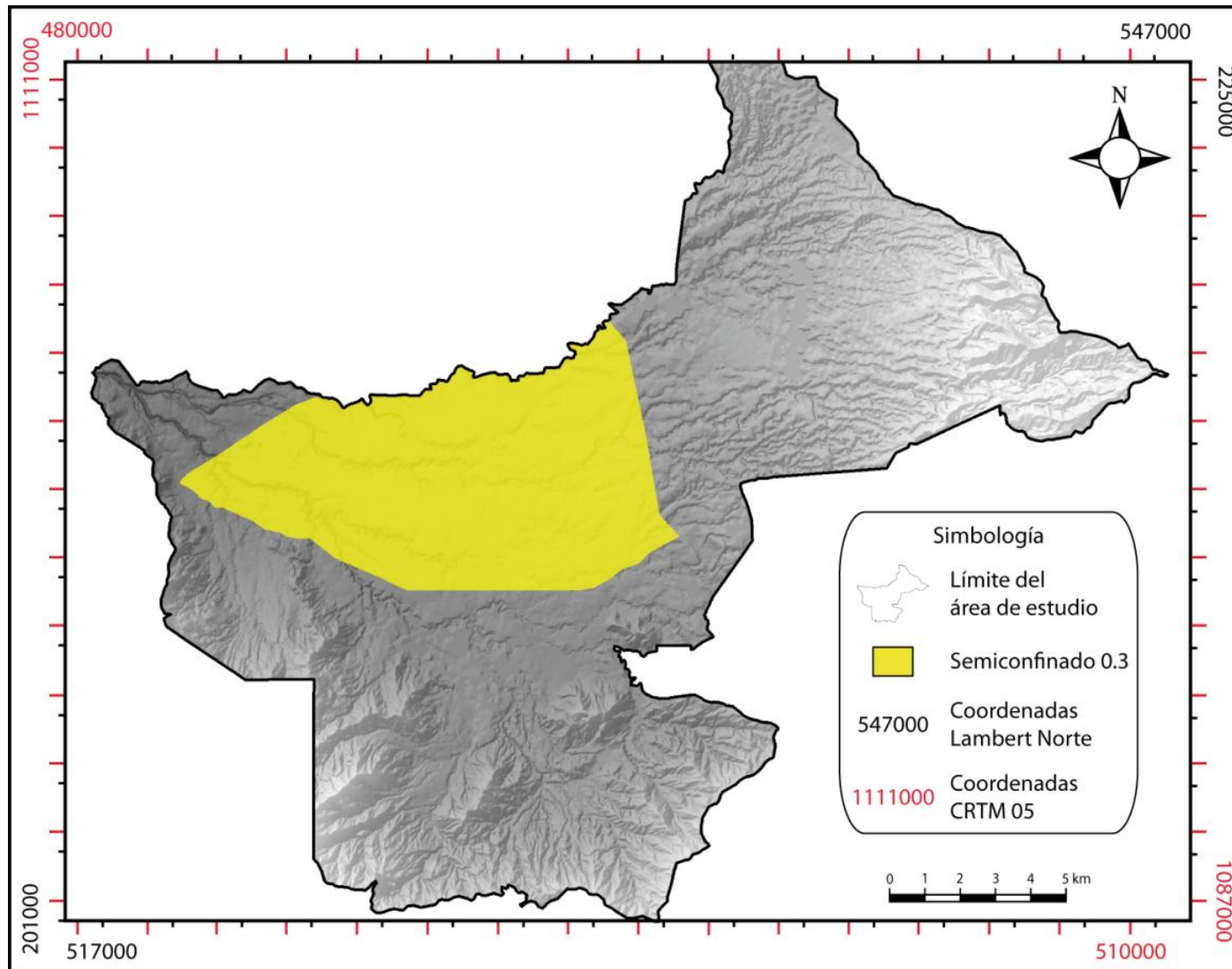
Del análisis de esta información, se obtuvo que la Unidad de piroclastos corresponde con un acuífero semiconfinado; ya que lo sobreyace una capa de arcillas dentro de los mismos materiales en los que se encuentra esta unidad, dichas capas funcionan como acuitardos, además, los pozos analizados presentan cargas de presión que oscilan entre 1 m y 30 m para este nivel. Por lo tanto utilizando el confinamiento del agua subterránea establecido por Foster (1987) y el cual se observa en la Figura 2, se estimó un valor de 0,3 para este primer nivel de agua subterránea (Figura 28).

La Unidad de brechas lávicas también corresponde con un acuífero semiconfinado, ya que las capas que lo sobreyacen (lahares, tobas y cenizas) actúan como acuitardos o acuicludos, dependiendo del contenido de arcillas que posean. Por esta razón se consideró un valor de 0,3 para la variable del confinamiento del agua subterránea en este nivel (Figura 29).



**Figura 28: Grado de confinamiento de la Unidad de piroclastos.**





**Figura 29: Grado de confinamiento de la Unidad de brechas lávicas.**

## 5.2 Sustrato sobreyacente

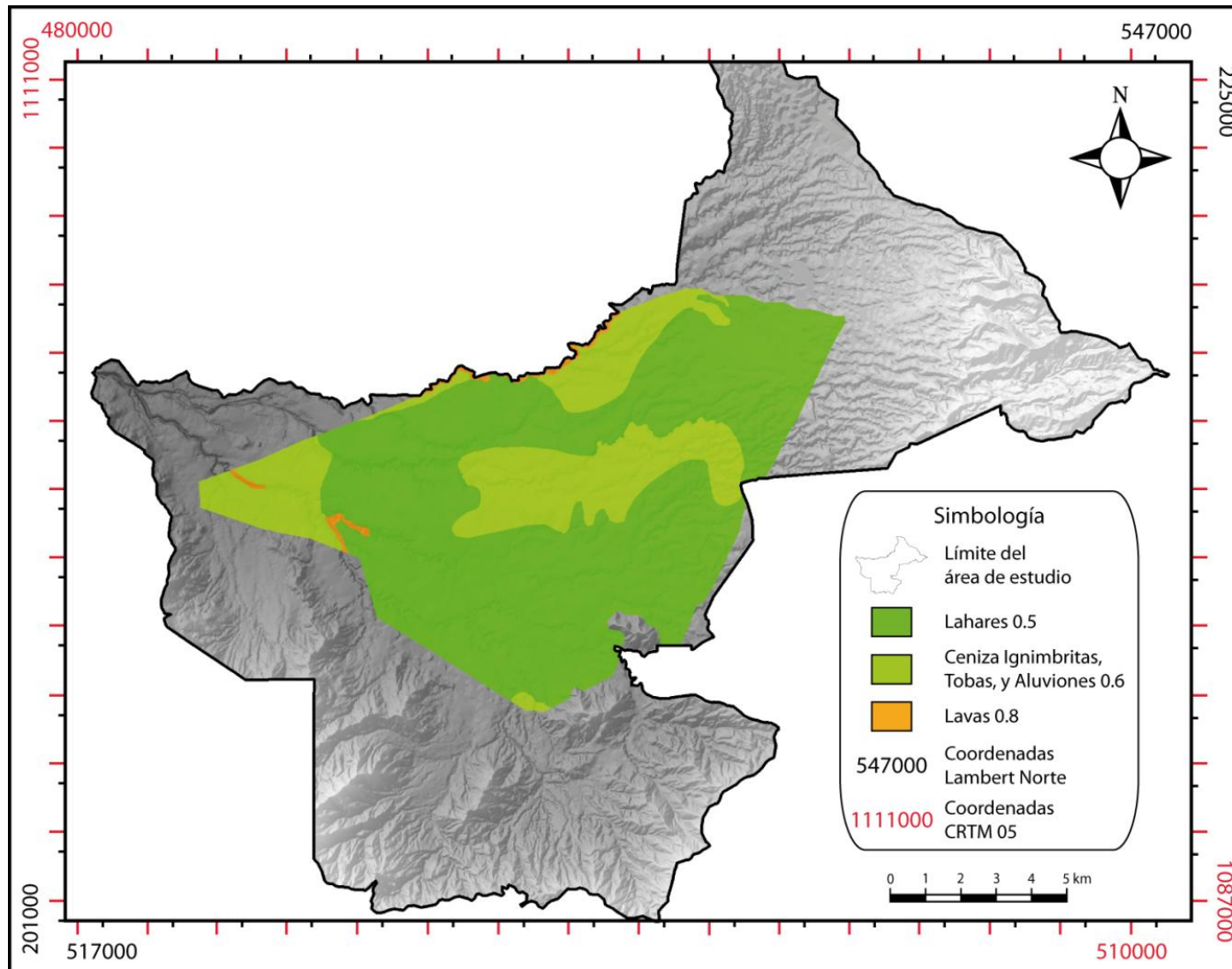
Para la determinación del sustrato litológico sobreyacente a cada nivel se utilizó de igual manera la información suministrada en los pozos obtenidos de la base de datos del SENARA y de la realización e interpretación de los perfiles hidrogeológicos mostrados en el capítulo anterior.

En el caso de la Unidad de piroclastos, las capas sobreyacentes están constituidas por lavas, tobas, ignimbritas, lahares, cenizas y aluviones; de los cuales los lahares se distribuyen en la mayor parte del área en la que se aplicara el método GOD, las tobas afloran en una pequeña parte en el norte y oeste del área, las lavas principalmente se encuentran en los cañones de los ríos María Aguilar, Tiribí y Virilla, las cenizas se localizan en el centro del área y los aluviones se observan en las principales localidades del sur y suroeste del área en cuestión (Desamparados, Alajuelita y Escazú).

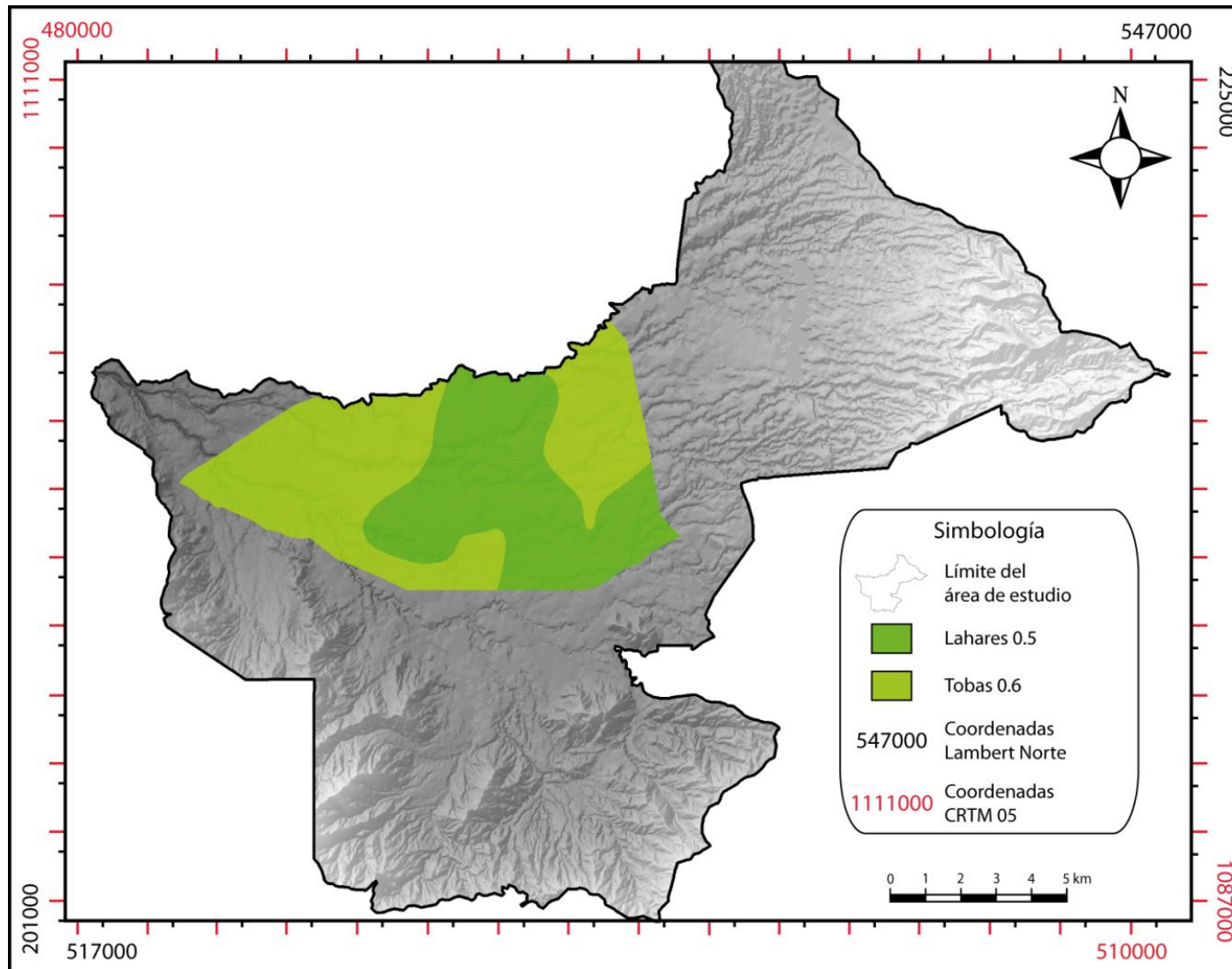
Para la realización del sustrato sobreyacente de la Unidad de piroclastos se utilizó la información litológica proveniente de los pozos y no la del mapa geológico existente para el área de estudio, debido a que en algunos sectores se observaron diferencias entre ambas fuentes de información.

La categorización para cada una de estas unidades litológicas se aprecia en la Figura 2, en donde se observa que las lavas recientes poseen un índice de 0,8, las tobas presentan un índice de 0,6, los lahares aunque no aparecen en la clasificación propuesta por Foster (1987), al poseer una matriz lodosa y por consiguiente arcillosa, se le asignará un índice de 0,5, las ignimbritas por su composición y similitud con las tobas serán asignadas con un valor de 0,6, las cenizas igualmente tendrán un valor de 0,6 y por último los aluviones son asignados con un índice de 0,6. La Figura 30 muestra la distribución espacial de estas unidades de roca y sus respectivos valores.

Las capas que sobreyacen a la Unidad de brechas lávicas se interpretaron a partir de los perfiles realizados, dando como resultado que la parte central del área analizada para este acuífero corresponde con una capa de lahares la cual está rodeada por tobas. De igual manera que para la Unidad de piroclastos, se asignará un valor de 0,6 a las tobas y 0,5 a los lahares. La distribución es mostrada en la Figura 31.



**Figura 30: Sustrato litológico para la Unidad de piroclastos.**



**Figura 31: Sustrato litológico para la Unidad de brechas lávicas.**

### **5.3 Determinación de la profundidad del agua**

Para la determinación de la profundidad del agua subterránea se utilizó la profundidad con respecto al nivel del suelo a la cual fueron detectados los distintos niveles del agua subterránea en varios de los pozos obtenidos en el SENARA con relación a la elevación geográfica de cada pozo dentro del área de estudio.

Esta relación se efectuó por medio del programa ArcGis, en el cual primeramente se realizó un Modelo de Elevación Digital (DEM) a partir de las curvas de nivel del área de estudio. Posteriormente se utilizaron las equipotenciales obtenidas para cada nivel y se realizó un DEM para cada una de ellas, de esta forma, y utilizando los parámetros establecidos por Foster (1987), se utilizó la herramienta “Map Algebra” y su aplicación “Raster Calculator” para establecer las condicionantes para cada rango de profundidad.

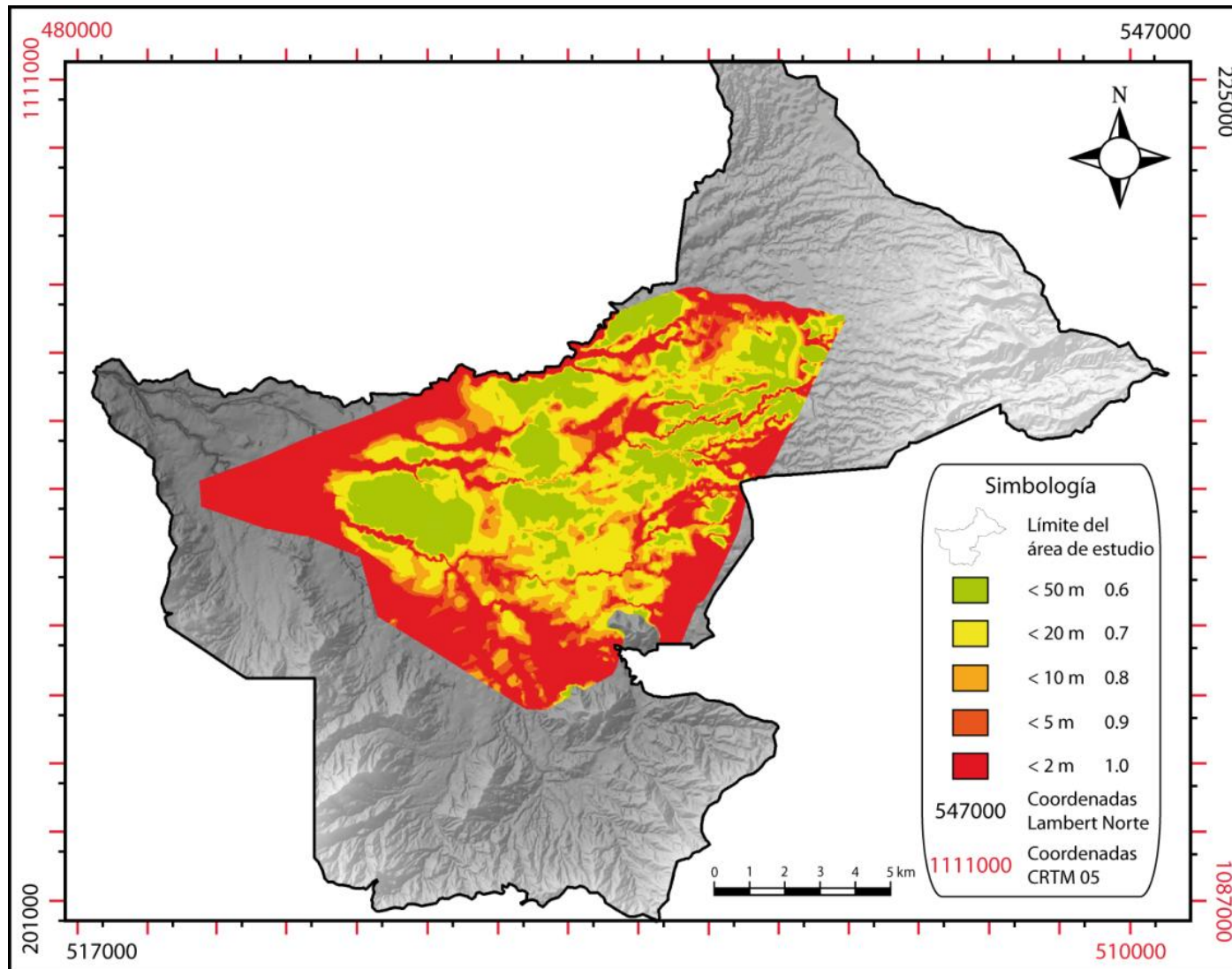
A partir de la fórmula utilizada se obtienen los siguientes mapas para la determinación de la profundidad del agua en cada nivel (Figura 32 y 33).

### **5.4 Análisis de resultados**

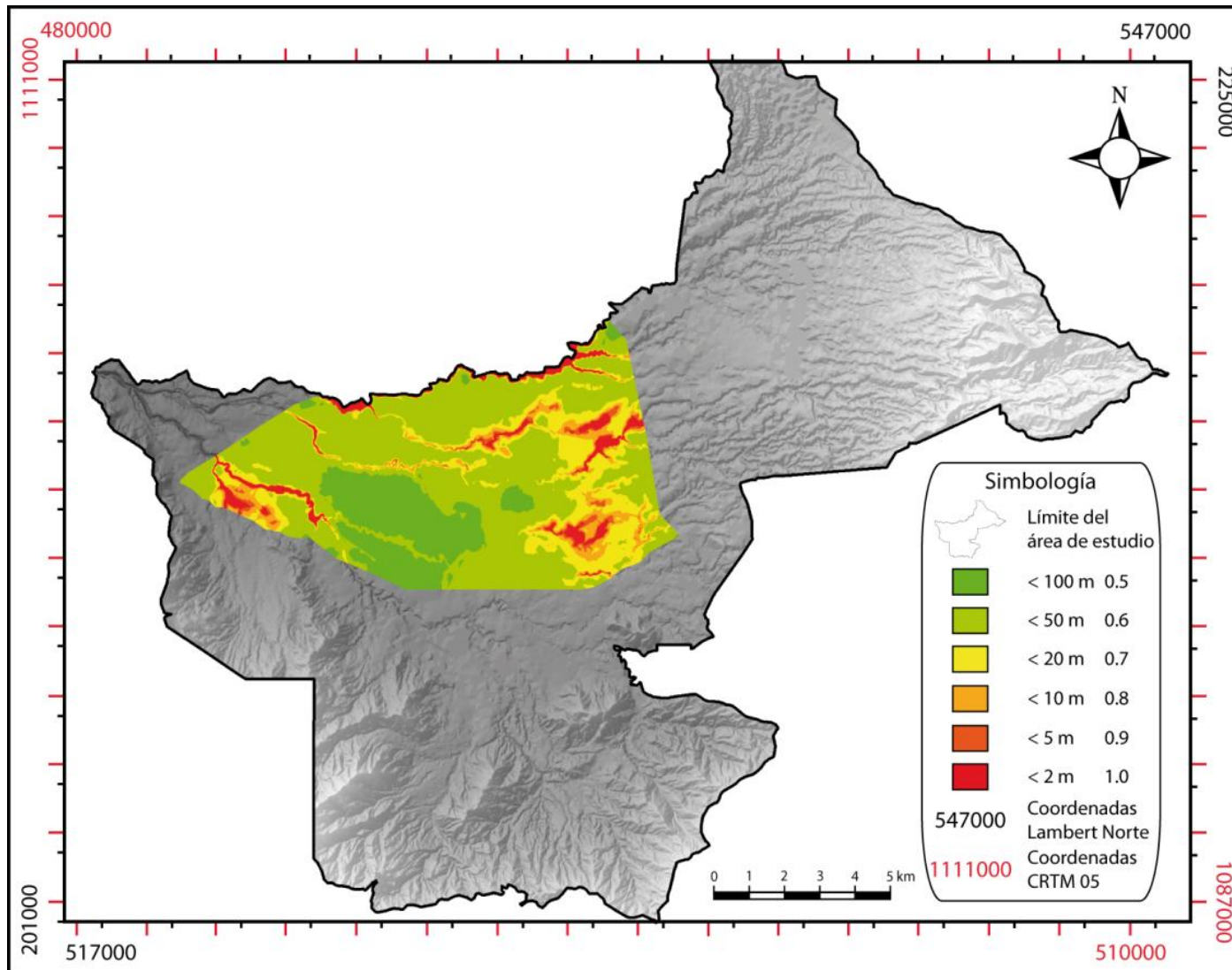
Los resultados de los mapas de vulnerabilidad para cada nivel se muestran a continuación, donde se evidencia que en el caso de la Unidad de piroclastos, al tener cierto grado de confinamiento, el índice de vulnerabilidad varía entre bajo y despreciable; exhibiendo una baja vulnerabilidad en las zonas en donde la profundidad del agua posee valores menores a los 20 m.b.n.s. y una vulnerabilidad despreciable en las áreas con profundidades que oscilan entre los 20 y 50 m.b.n.s. (Figura 34).

En el caso de la Unidad de brechas lávicas el índice de vulnerabilidad también dió como resultado una vulnerabilidad a la contaminación que oscila entre bajo y despreciable.

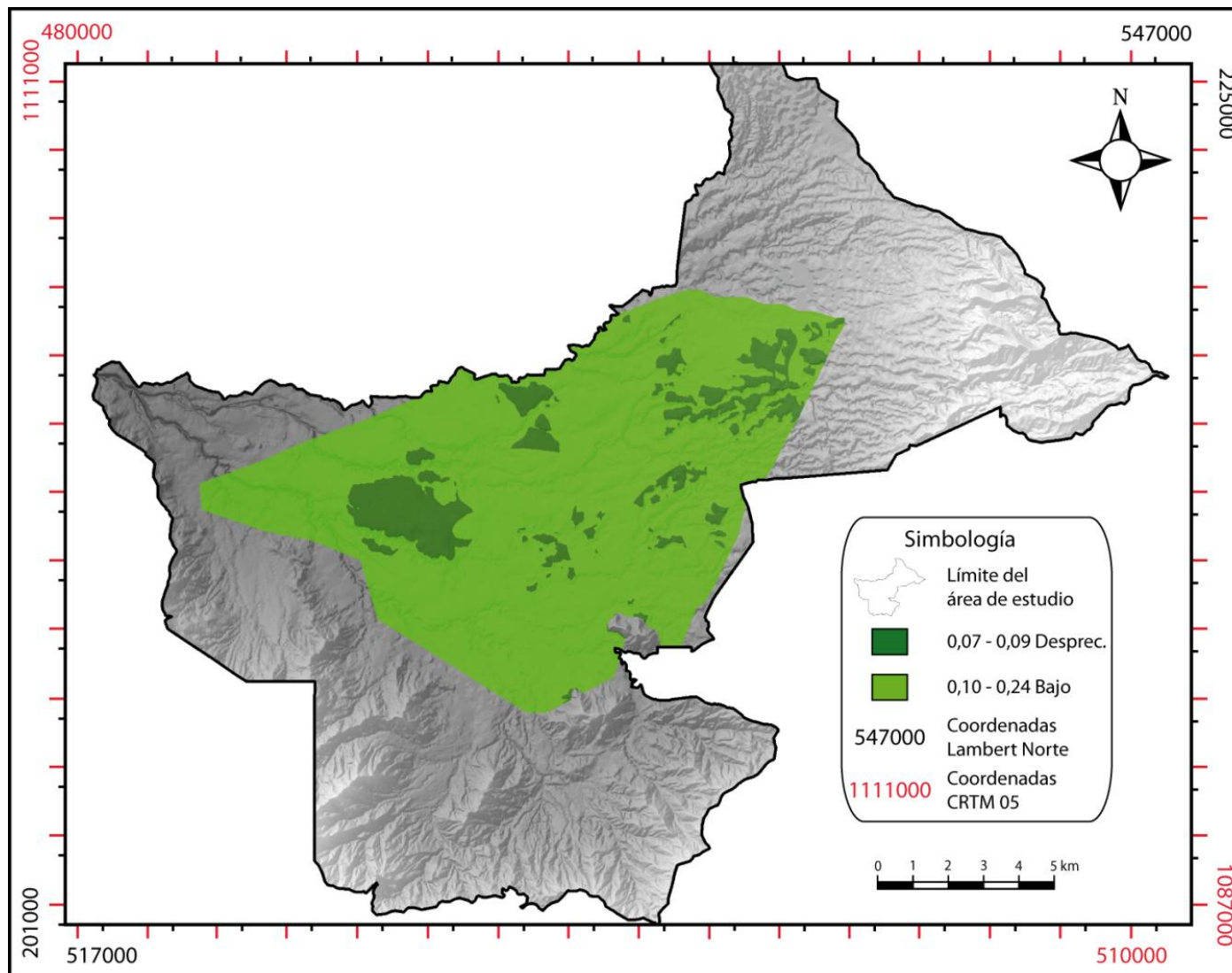
En esta unidad predominan las zonas con una vulnerabilidad baja y las áreas que presentan un nivel despreciable se asocian con algunos sectores sobreyacidos por tobas o con profundidades del agua subterránea que varían entre 50 y 100 m.b.n.s. (Figura 35).



**Figura 32: Determinación de la profundidad de la Unidad de piroclastos.**

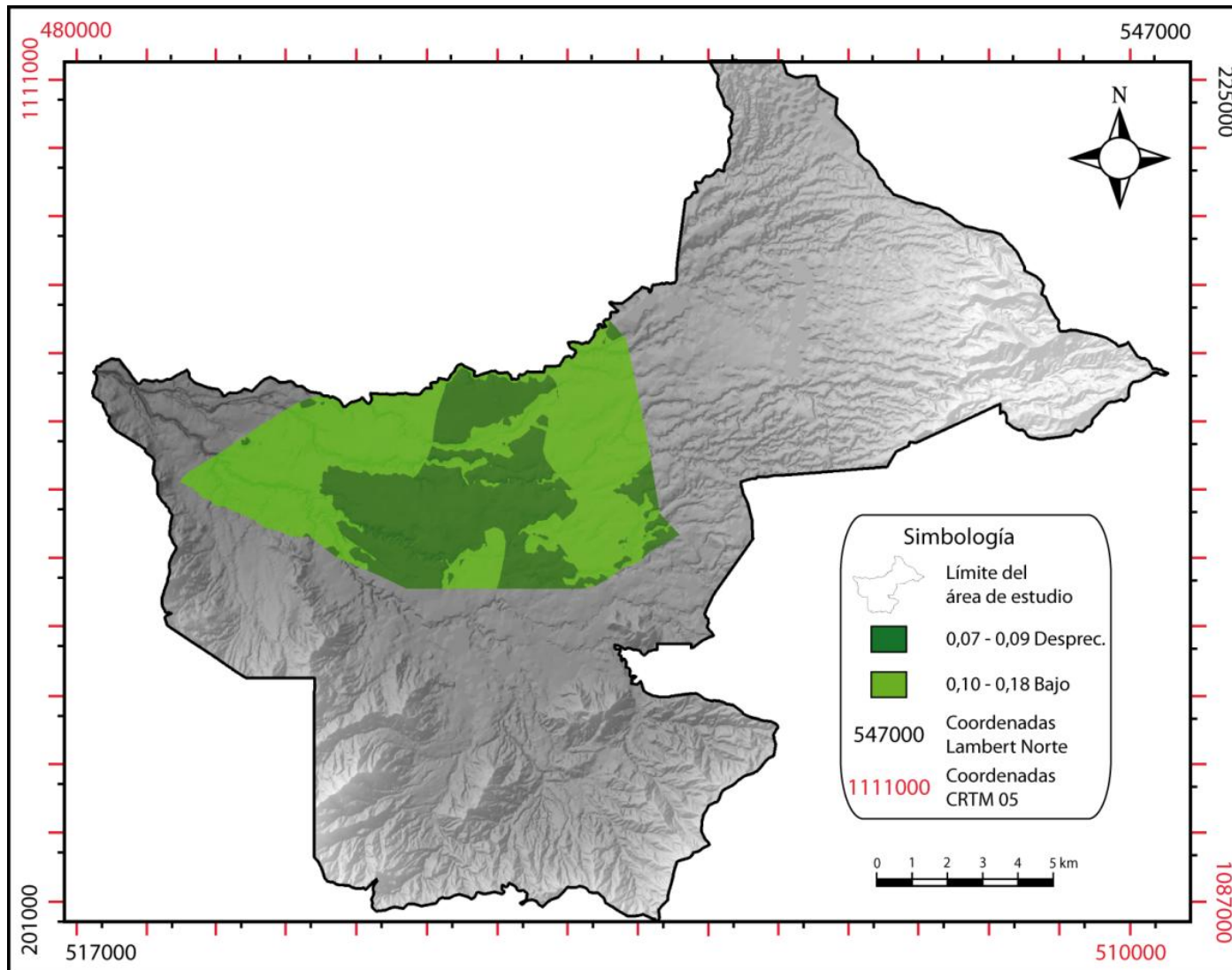


**Figura 33: Determinación de la profundidad de la Unidad de brechas lávicas.**



**Figura 34: Índice de vulnerabilidad a la contaminación en la Unidad de piroclastos.**





**Figura 35: Índice de vulnerabilidad a la contaminación en la Unidad de brechas lávicas.**

## 6 Conclusiones

Con esta investigación se obtuvo como resultado la presencia de tres niveles de agua en el sector metropolitano que se encuentra hacia la margen izquierda del río Virilla, los cuales conforman el Sistema Acuífero San José.

La primera unidad hidrogeológica de este sistema acuífero se denomina Unidad de piroclastos, la cual corresponde con un acuífero semiconfinado que se encuentra a una profundidad promedio de 10-15 mbns, posee una carga de presión que en algunos lugares sobrepasa los 20 m y circula en su mayor parte por una capa de cenizas y lahares.

El segundo nivel (Unidad de brechas lávicas) corresponde con un acuífero semiconfinado, con una profundidad promedio de 70-80 mbns, posee una carga de presión que oscila entre los 12 y 55 m y se extiende por una capa de brechas y lavas correlacionables con el Miembro Linda Vista, asociado en este trabajo a la Formación Lavas Intracañón.

El tercer y último nivel de agua interpretado se denomina Unidad de lavas fracturadas, esta unidad está conformada por un acuífero confinado, se encuentra a una profundidad promedio de 165 mbns, posee una carga presión aproximada a los 27 m y se encuentra en una capa de lavas correlacionables con el Miembro Belén, asociado en este trabajo a la Formación Lavas Intracañón.

La unidad hidrogeológica con mayor caudal y transmisividad corresponde a la Unidad de lavas fracturadas, mientras que la de menor caudal recae en la Unidad de piroclastos.

Debido a la poca información de los niveles piezométricos que presentaban los pozos analizados, no fue posible realizar las redes de flujo para toda el área de estudio en el caso de la Unidad de piroclastos y la Unidad de brechas lávicas; sin embargo, en el sector que si se obtuvo información, las redes de flujo presentaban una dirección Este-Oeste.

En el caso de la Unidad de lavas fracturadas fue imposible realizar las redes de flujo y por consiguiente el índice de vulnerabilidad; debido a que solo dos pozos alcanzaban esta unidad.

La gran mayoría de los ríos que se encuentran en el área de estudio se comportan de manera influente con respecto a los niveles de agua subterránea.

Se interpretaron una serie de fallas que afectan los ríos Tiribí, María Aguilar, Cañas, Macho y Torres y las quebradas San Francisco y Rivera, las cuales también afectan las redes de flujo de los niveles de agua.

La determinación de la vulnerabilidad en la Unidad de piroclastos y la Unidad de brechas lávicas se realizó con la metodología GOD, la cual busca establecer las características intrínsecas del acuífero y las capas sobreyacentes a éste, relacionadas con el transporte y la capacidad de atenuación de los contaminantes.

Estas dos unidades presentan condiciones de vulnerabilidad mínimas, las cuales varían entre bajo y despreciable, esto debido al grado de confinamiento que presentan dichos niveles acuíferos.

En el sector sur del área de estudio se encuentran presentes un conjunto de materiales sedimentarios y volcánicos de edad miocénica, con características que permiten el flujo del agua; sin embargo debido a la poca información existente no es posible definir adecuadamente la cantidad o extensión de los acuíferos presentes.

Es por esta razón que es importante promover la realización de perforaciones en los sectores con poca información, así como realizar estudios a partir de nacientes en los sectores montañosos para poder definir detalladamente la extensión, potencial de extracción y los tipos de acuíferos tanto en los sectores de rocas sedimentarias como en el Sistema Acuífero San José.

## 7 Referencias

- AGUERO, J., 2000: Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. – Escuela de Ingeniería Civil. San José, Costa Rica. 132 pág. + anexos. [Tesis de licenciatura].
- ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J, PETTY, R., & HACKETT, G., 1987: DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. EPA /600/2-87-036: 1-455 Oklahoma.
- ASTM, 2004: Standard Guide for Establishing Nomenclature for Groundwater Aquifers. Designation D-6106-97, 17 pág.
- AUGE, M., 1995: Primer Curso de Posgrado de Hidrogeología Ambiental. UBA: 1-65. Buenos Aires.
- CASTILLO, R., & KRUSHENSKY, R., 1977: Geologic map and cross section of the Abra Quadrangle, Costa Rica. – Miscellaneous Investigations Series Map I-992. Geological Survey.
- CIVITA, M., CHIAPPONE, A., FALCO, M., & JARRE, P., 1990: Preparazione della carta di vulnerabilita per la rilocalizzazione di un impianto pozzi dell'Aquedotto di Torino. Proc. 1st Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi." Vol. 2: 461-462. Marano sul Parnaro.
- CUSTODIO, E., & LLAMAS, M., 1976: Hidrogeología Subterránea. – Vol. 2. Barcelona.
- DENYER, P., & ARIAS, O., 1991: Estratigrafía de la región central de Costa Rica. – Rev. Geológica de América Central (12): 1-59. San José, Costa Rica.
- DENYER, P., MONTERO, W., ALVARADO, G., 2003: Atlas Tectónico de Costa Rica. – Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- DOERFLIGER, N., & ZWAHLEN, F., 1997: EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. In Gunay & Jonshon (Ed). Int. Symp. On karst water and environ. Impacts. Antalya, Turkey, 1997. Balkema: 117-123. Rotterdam.
- DÓNDOLI, C., 1954: Estudio geagronómico de la región oriental de la Meseta Central. Ministerio de Agricultura e Industrias, 180 pág.

- ECHANDI, E., 1981: Unidades Volcánicas de la vertiente norte de la Cuenca del río Virilla. – Escuela Centroamericana de Geología. San José, Costa Rica. 123 pág. + 1 mapa. [Tesis de licenciatura].
- ENTOMBO, M., 2013: Estudio de la exactitud de los modelos digitales del terreno (MDT). – Rev. Ciencia y Futuro Vol. 3. No. 4. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Cuba.
- FERNÁNDEZ, M., 1969: Las unidades hidrogeológicas y los manantiales de la vertiente norte de la cuenca del Río Virilla. 43 pág. San José, Costa Rica.
- FERNÁNDEZ, M., & PACHECO, J., 1998: Sismotectónica de la región central de Costa Rica. – Rev. Geológica de América Central (21): 5-23. San José, Costa Rica.
- FERNÁNDEZ, M., & MONTERO, W., 2002: Fallamiento y sismicidad del área entre Cartago y San José, Valle Central de Costa Rica. – Rev. Geológica de América Central (26): 25-37. San José, Costa Rica.
- FETTER, C., 1988: Applied Hydrogeology. – 2da Edition. 592 pág. + CD. New York.
- FOSTER, S., 1987: Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy. TNO Comn. On Hydrog. Research. Proceed. And Information # 38: 69-86. The Hague.
- FOSTER, S., & HIRATA, R., 1991: Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas: una metodología basada en datos existentes. 81 pág. Lima, Perú.
- LOSILLA, M., 1977: Aguas subterráneas de la cuenca del Río Virilla y zonas propuestas para su explotación, Costa Rica. – Escuela Centroamericana de Geología. San José, Costa Rica. 39 pág. [Tesis de licenciatura].
- MADRIGAL, C., 2004: Modelo conceptual hidrogeológico de la sección de acuíferos ubicados bajo el sitio de la casa de maquinas del proyecto hidroeléctrico Peñas Blancas, Costa Rica. – Escuela Centroamericana de Geología. San José, Costa Rica. 71 pág. + anexos. [Tesis de maestría].
- MALAVASSI, E., 1965: Reseña geológica del Valle Central de Costa Rica. – Informes técnicos y notas geológicas. 25 pág. San José, Costa Rica.
- MALAVASSI, E., & MADRIGAL, R., 1967: Reseña geológica del Área metropolitana de Costa Rica. – Informes técnicos y notas geológicas. 9 pág. San José, Costa Rica.

- MONTERO, W., BARAHONA, M., ROJAS, W., & TAYLOR, M., 2005: Los sistemas de falla Aguacaliente y Rio Azul y relevos compresivos asociados, Valle Central de Costa Rica. – Rev. Geológica de América Central (33): 7-27. San José, Costa Rica.
- PANIAGUA, S., 1975: Geología y aspectos hidrogeológicos generales del primer campo de pozos para el abastecimiento completo del agua del Área metropolitana de San José. – Escuela Centroamericana de Geología. San José, Costa Rica. 39 pág. [Tesis de licenciatura].
- RAMÍREZ, R., & ALFARO, A., 2002: Mapa de vulnerabilidad hidrogeológica de una parte del Valle Central de Costa Rica. – Rev. Geológica de América Central (27): 53-60. San José, Costa Rica.
- RAMÍREZ, R., 2007: Recarga potencial del acuífero Colima y Barva, Valle Central, Costa Rica. – 41 pág. SENARA. San José. [Informe interno].
- SCHOSINSKY, G., & VARGAS, A., 2001: Hidrogeología de un sector de la margen izquierda del río Virilla, Provincia de San José, Costa Rica. – Rev. Geológica de América Central (24): 93-102. San José, Costa Rica.
- SCHOSINSKY, G., VARGAS, A., & STIMSON, J., 2001: Orígenes de contaminación de aguas subterráneas en un sector de la margen izquierda del río Virilla, San José, Costa Rica. – Rev. Geológica de América Central (25): 85-92. San José, Costa Rica.
- SENARA & BGS, 1985: Mapa hidrogeológico del Valle Central de Costa Rica, escala 1:50000.
- WILLIAMS, H., 1952: Volcanic History of the Meseta Central Occidental Costa Rica. – University of California publications in geological sciences, 29 (4): 145-180.

# Anexos

## Anexo 1

### Pozos utilizados en la elaboración de los perfiles.

NUM_POZO	PROPIETARIO	USO	CAUDAL (l/s)	PROFUNDIDAD (m)	LONGITUD	LATITUD
AB-1005	A.DES.INT.DE CUCUBRES	Doméstico	0,90	32,00	528000	204450
AB-1028	ASO-PROVIVIENDA MATA PLATANO	Doméstico	1,50	70,00	534750	215170
AB-1034	STANLEY HEIL	Doméstico	1,00	51,00	518750	213400
AB-1056	RAFAEL MADRIGAL	Doméstico	3,00	29,00	533150	211750
AB-1083	ADELE SECEN GAM DE KISSLING	Doméstico	0,45	31,00	522580	212030
AB-1096	LADRILLERA SAN ANTONIO	Doméstico	0,50	60,00	531780	209340
AB-11	ORANGE CRUSH DE C.R.	Doméstico	1,26	35,05	527610	214410
AB-1103	AMERICAN EMBASSY U.S.A.	Doméstico	1,26	50,00	522600	214900
AB-1106	MARK JONES MONTGOMERY	Doméstico	0,80	60,00	522520	211380
AB-1117	I.N.A.	Doméstico	0,50	105,00	522570	216130
AB-1155	ATLANTIS COSTARRICENSE	Doméstico	1,78	35,00	530750	210100
AB-1177	I.N.V.U.	Doméstico	0,50	50,00	528360	210590
AB-1178	ASOC.ARTE Y CULTURA *	Doméstico	0,50	30,00	522660	211110
AB-120	BANCO DE SEGUROS	Doméstico	0,50	51,82	527650	212590
AB-1223	JUAN LUIS ARAGON KASLLY	Doméstico	0,50	41,50	529200	210500
AB-1225	HITO RINCON, S.A.	Doméstico	0,50	174,00	525480	213720
AB-1284	FALCON, S.A.	Industrial	1,30	60,00	528000	207200
AB-131	DOS PINOS	Doméstico	0,50	28,65	528820	212110
AB-1312	CONFECCIONES JINETE, S.A.	Industrial	1,00	31,00	527100	205950
AB-1320	INV. MUÑOZ Y NANNE, S.A.	Doméstico	1,70	59,00	531330	212750
AB-133	DOS PINOS	Doméstico	0,50	36,54	529170	212160
AB-1333	AUTOLAVADO DEL OESTE, S.A	Abandonado		79,00	525570	213450



NUM_POZO	PROPIETARIO	USO	CAUDAL (l/s)	PROFUNDIDAD (m)	LONGITUD	LATITUD
AB-1355	JOSE IGNACIO GONZALEZ H.	Doméstico	4,73	30,00	520350	212900
AB-1360	RAFAEL HUETE VAZQUEZ	Doméstico	1,89	32,00	535750	218550
AB-1373	LUIS DIEGO CASTRO B.	Doméstico	1,80	70,00	527750	210700
AB-1381	SAAS, LTDA	Doméstico	1,35	40,00	532790	211160
AB-1391	RICHARD JOHNSON MILLER	Doméstico	0,10	31,00	522870	212050
AB-1427	ARMANDO GONZALEZ FONSECA	Doméstico	1,26	60,00	533450	210850
AB-1460	DON TOMATE, S.A.	Riego	0,60	50,00	533800	219550
AB-1478	PROPIEDADES DE CABO SAN LUCAS S	Urbanístico	1,00	80,00	518526	213493
AB-1509	JAIME CASALLS ORGA	Doméstico	3,00	97,00	519240	214720
AB-1521	CONCRETERA NACIONAL	Doméstico	0,50		522650	213500
AB-1531	MEGA UNO S.A.	Varios	3,15	72,50	525450	210600
AB-155	M.URBINA.	Doméstico	0,63	67,05	530290	212430
AB-1583	CARLOS ORTIZ CASTRO	Doméstico	0,50	78,00	518850	213850
AB-1596	MAURO A. ARIAS JIMENEZ	Doméstico	0,50	100,00	525450	203800
AB-1604	COMPAÑIA LEOGAR S.A.	Industrial	0,50	82,00	522570	213650
AB-1606	SUR QUIMICA DE COSTA RICA	Industrial	2,00	162,00	525740	214390
AB-1608	FABRICA ROPA EL ACORAZADO S.A	Industrial	0,47	140,00	527320	215550
AB-1615	ANA VENEGAS ARCE	Doméstico	0,55	23,50	522800	209980
AB-163	F. FOURNIER	Doméstico	0,63	39,60	531000	212600
AB-1660	ALME SISTEMAS S.A.	Doméstico	3,00	63,00	518750	211450
AB-167	F. OREAMUNO.	Doméstico	1,26	36,58	531800	212730
AB-1684	COSTA RICA TENIS CLUB S.A.	Doméstico	0,50	152,00	525320	212835
AB-1696	INVERPOLY S.A.	Doméstico	1,26	85,00	531450	210750
AB-1708	LARVIC S.A.	Doméstico	0,31	36,00	519450	213220
AB-1757	PO JEN HSIAO	Doméstico	3,15	25,00	532350	210900
AB-176	CANADA DRY BOTLING CO.	Doméstico	0,44	12,19	526750	211800

NUM_POZO	PROPIETARIO	USO	CAUDAL (l/s)	PROFUNDIDAD (m)	LONGITUD	LATITUD
AB-178	C. BARRANTES	Doméstico	0,50	46,67	527750	211050
AB-1801	LA CRUZ BLANCA S.A.	Industrial	1,89	62,50	527500	216850
AB-1803	AUTOTRANSPORTES CARIBEÑOS S.A.	Doméstico	4,00	164,00	527745	214825
AB-1809	ASIATICA DE VENTAS S.A.	Doméstico	0,45	80,00	522620	213895
AB-1829	RODRIGO FALLAS ZUÑIGA	Varios	1,26	47,00	529600	205060
AB-1836	INST.MATERO INFANTIL CARIT	Industrial	5,15	120,00	527450	211900
AB-1862	CONSTRUCTORA ANED	Industrial	5,00	75,00	521390	212510
AB-187	AYA	Abast. Público	30,00	167,70	530920	211450
AB-1891	YUI-KEI FUNG	Doméstico	1,00	45,00	529130	209050
AB-1962	ISMAEL SANCHEZ SANCHEZ	Riego	2,20	60,00	532750	209950
AB-1972	INVERSIONES ASCAL S.A.	Doméstico	1,80	60,00	532420	212950
AB-2014	HUA HUI CHEN	Doméstico	1,46	70,00	530900	214650
AB-2019	DAVID PHILIP COPE	Doméstico	2,00	143,00	518740	210845
AB-2021	SERVICIOS PROF.DE CONSTRUCCION	Riego	2,36	80,00	522600	211490
AB-203	PRODUCTOS DE CONCRETO	Industrial	2,36	29,60	529740	210400
AB-2031	JOSAMBO S.A.	Doméstico	0,50	102,00	533340	210820
AB-2032	LA LAN S.A.	Doméstico	1,00	90,00	521620	212270
AB-206	MANSAC	Doméstico	2,99	124,00	530760	210600
AB-2069	JUAN M.MALAVASI MONTES DE OCA	Industrial	1,00	60,00	533650	218900
AB-207	MAGON	Industrial	0,94	30,48	531160	210800
AB-211	DORIS STONE.	Doméstico	0,63	73,15	532140	210260
AB-2111	BERTHIER EBI	Industrial	0,50	90,00	519200	216850
AB-2117	AYA	Abast. Público	40,00	300,00	529600	216400
AB-212	D. STONE.	Doméstico	1,26	24,38	532200	210240
AB-2145	WILLIAN RODRIGUEZ SOLIS	Doméstico	2,00	55,00	522850	209050
AB-2167	PROSEU S.A.	Doméstico	0,50	205,00	518450	210250

NUM_POZO	PROPIETARIO	USO	CAUDAL (l/s)	PROFUNDIDAD (m)	LONGITUD	LATITUD
AB-217	SENARA	Doméstico	3,90	66,75	529500	209200
AB-2175	RAFAEL CHOJUN YOUNG	Doméstico	1,00	70,00	528310	212132
AB-2184	EUROMOBILIA S.A.	Industrial	1,50	140,00	526605	211786
AB-2194	CECIFAC S.A.	Riego	3,00	113,00	520650	212770
AB-2252	SILVIA MARQUEZ BARRANTES	Doméstico	2,00	105,00	535400	218900
AB-2261	ASFALTOS OROSI,SIGLO XXI S.A.	Industrial	1,20	68,00	532800	210820
AB-2262	NELETTA S.A.	Riego	0,75	60,00	522660	211750
AB-2267	VISTAS DE ASERRI S.A.	Riego	0,60	43,50	525675	203850
AB-2270	CORP.FIDELIDAD CONTINENTAL CFC	Riego	1,50	150,00	518750	212060
AB-229	PRODUCTOS DE CONCRETO	Doméstico	0,50	48,80	532480	206200
AB-2326	CLUB GUARIA S.A.	Doméstico	1,50	72,00	530720	215600
AB-2358	AZAFRAN DEL NORTE S.A.	Doméstico	2,00	60,00	525820	209680
AB-2387	CORPORACION BETAMATIC S.A.	Doméstico	7,00	120,00	528480	207420
AB-2398	ADMINISTRADORA FIDUCIARIA ZMZ,S	Doméstico	1,00	60,00	519150	213350
AB-2411	CARILLANCA S.A	Riego		123,00	534030	219466
AB-2416	GLAXO SMITH KLINE	Industrial	3,80	110,00	530768	213763
AB-2445	APARTOTEL VILLAS DEL RIO S.A	Doméstico	1,50	60,00	520815	212660
AB-2457	INVERSIONES JENSEN SOCIEDAD ANÓ	Doméstico	1,00	100,00	525300	203200
AB-2476	COVADONGA PUNTO COM S.A.	Doméstico	1,00	40,00	531951	218064
AB-339	SOCIEDAD TOURNON	Doméstico	0,50	39,50	531275	217100
AB-341		Doméstico	0,50		535700	217240
AB-428	SENARA AQUASUB	Doméstico	0,50	131,06	531400	211000
AB-450	AYA	Abast. Público	9,50	45,70	534700	219600
AB-451	AYA	Abast. Público	9,50	39,62	534800	219300
AB-456	CARMELO MUSMANNI	Industrial		35,00	518700	212400
AB-481	CIA. TEXTILERA CENTROAMERICANA	Industrial		88,80	535150	213400

NUM_POZO	PROPIETARIO	USO	CAUDAL (l/s)	PROFUNDIDAD (m)	LONGITUD	LATITUD
AB-526	FRANK MANDELD	Doméstico	0,50	32,61	530700	215900
AB-536	JORGE CLARK	Doméstico	0,50	42,67	529400	210600
AB-546	CLUB UNION	Doméstico	0,50	45,72	527650	213250
AB-623	HOTEL TORREMOLINOS	Turístico		35,00	525700	214800
AB-651	PRODUCTOS POPULARES	Doméstico	0,50	43,00	533200	218550
AB-67	JUAN DENT	Doméstico	1,26	46,63	529980	213050
AB-698	LINDO Y CIA.	Doméstico	0,50	30,40	530800	209650
AB-699	AyA	Abast. Público	9,50	202,50	525350	215700
AB-722	ORLANDO ORTIZ	Doméstico	0,50	47,50	529900	212200
AB-724	JOSE M. BLANCH GODAHH	Doméstico	0,50	24,00	518800	213100
AB-780	FINCA BONITA S.A.	Doméstico	0,50	80,00	519920	212970
AB-815	ASOCIACION SAN MIGUEL ARCANGEL	Doméstico	0,50	41,00	530750	212750
AB-841		Doméstico	0,50	70,00	530800	211600
AB-855	LA TITICACA S.A.	Doméstico	0,50	45,00	518900	213500
AB-896	AyA	Abast. Público	15,00	73,00	533090	213086
AB-921	IMAS	Doméstico	2,00	70,00	530100	205000
AB-923	HOGAR DE ANCIANOS	Doméstico	0,60	40,00	535640	217640
AB-982	COMITE ACUEDUCTO QUEBRADA HOND	Doméstico	3,00	40,00	533620	206750
AB-983	ORNAFLOR S.A.	Riego		60,00	535300	213370
AB-986	AyA	Abast. Público	4,00	44,00	530350	205050
IS-322	HOSPITAL DE HUERFANOS	Doméstico	2,00	38,00	537375	217150
IS-504	A.S.E.C.C.S.S.	Varios		150,00	536700	219250

## Anexo 2

Gráficos de las pruebas de bombeo para la Unidad de brechas lávicas.

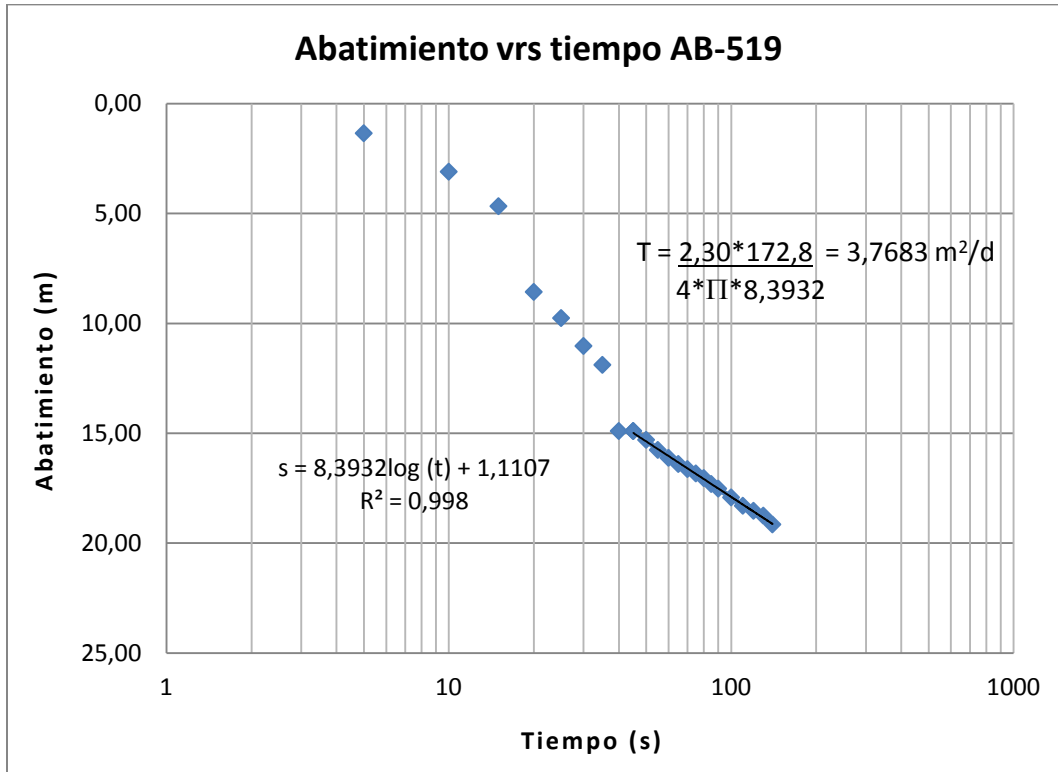
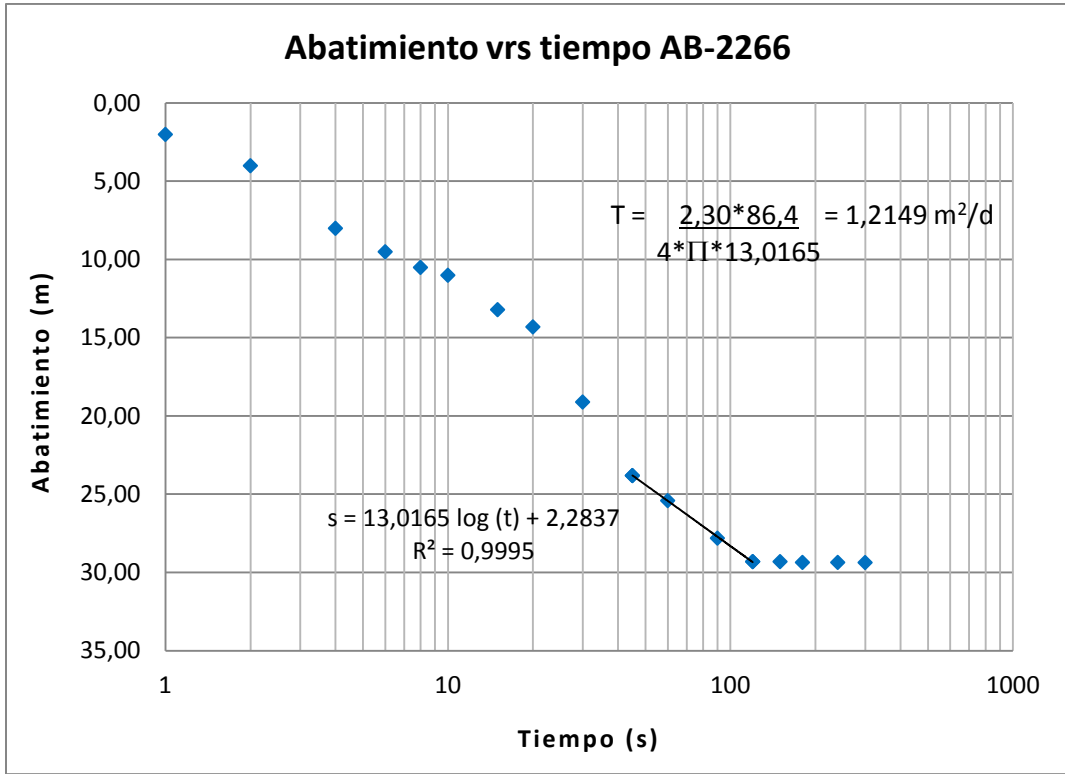
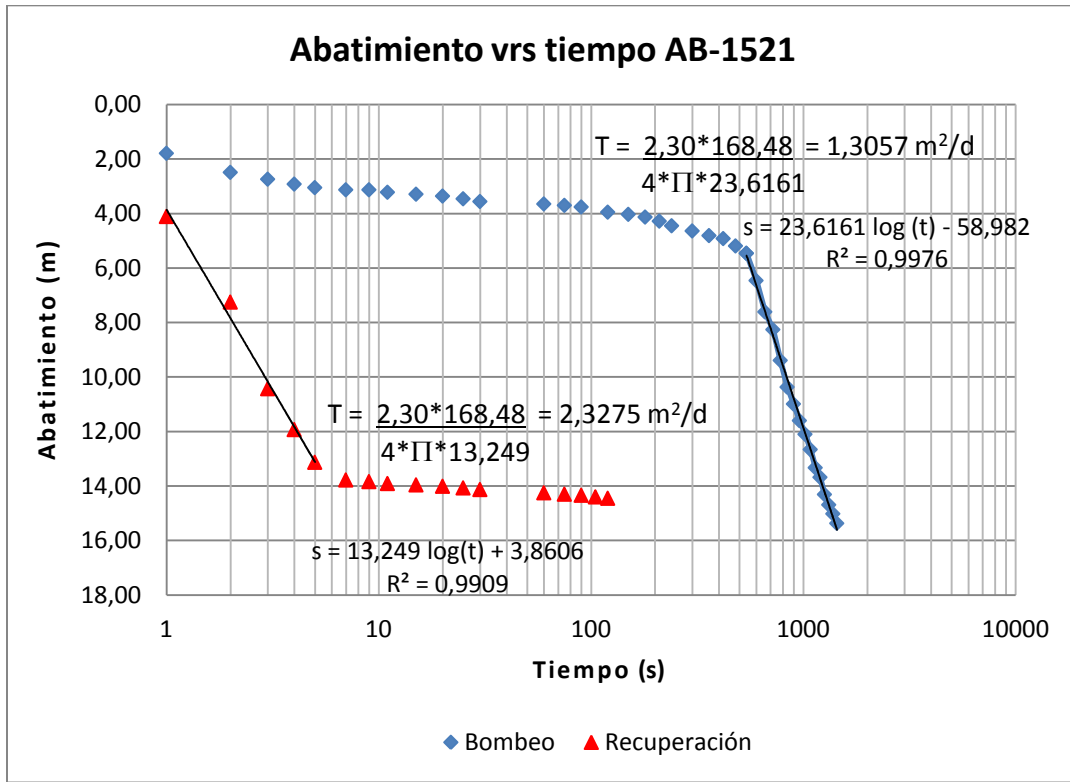


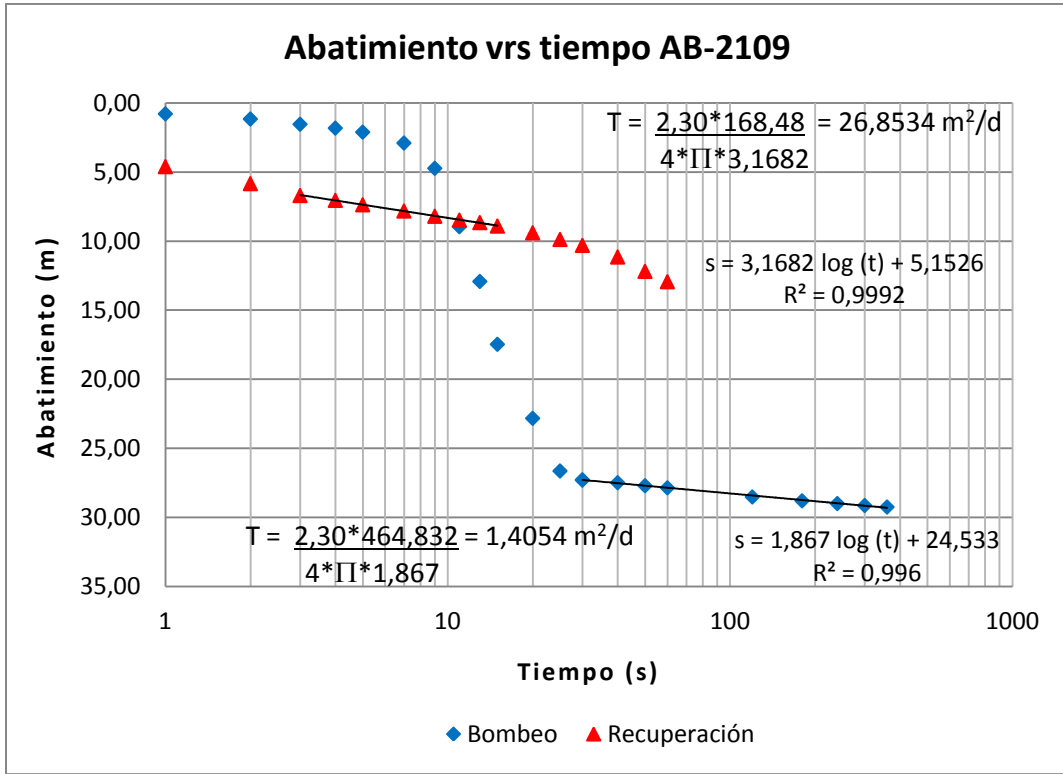
Gráfico de la prueba de bombeo del pozo AB-519.



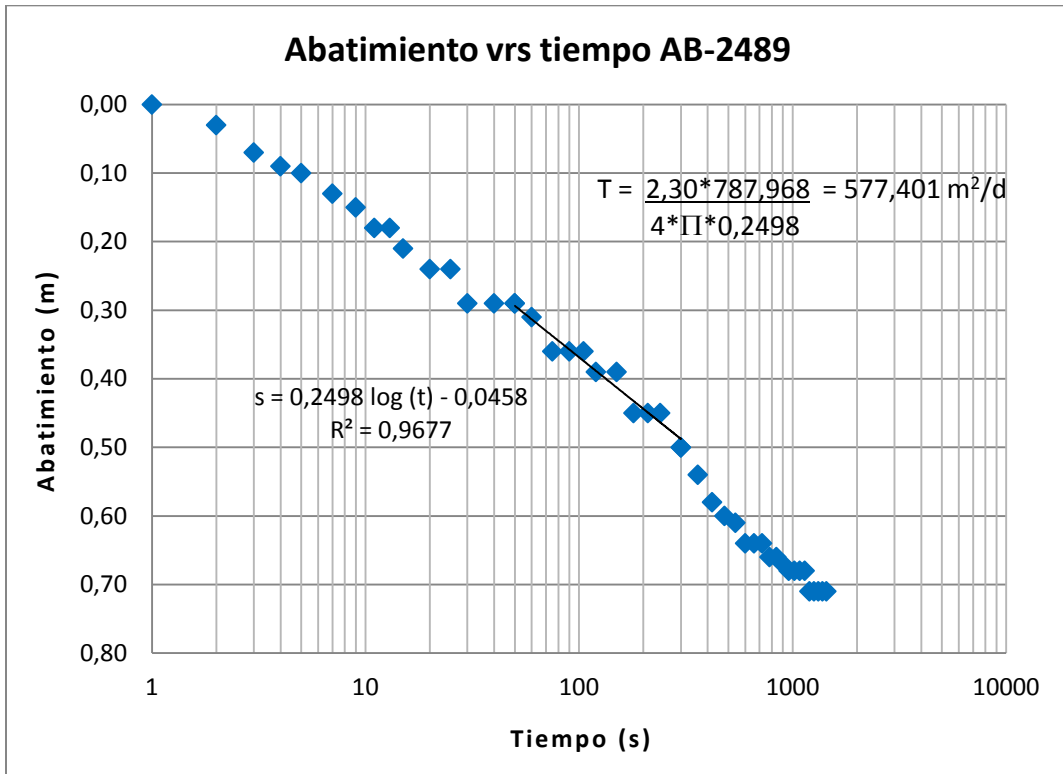
**Gráfico de la prueba de bombeo del pozo AB-2266.**



**Gráfico de la prueba de bombeo y recuperación del pozo AB-1521.**



**Gráfico de la prueba de bombeo y recuperación del pozo AB-2109.**



**Gráfico de la prueba de bombeo del pozo AB-2489.**