

**ASENTAMIENTOS EN EL SECTOR
DE SOLANDA
FASE DIAGNÓSTICO**

INFORME HIDROGEOLÓGICO

ÍNDICE

1. ANTECEDENTES	4
1.1 OBJETIVO Y ALCANCES	4
Objetivos Específicos	5
1.2 METODOLOGÍA	5
1.3 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	6
2. CLIMA	6
3. GEOMORFOLOGÍA	7
4. GEOLOGÍA LOCAL	7
5. HIDROGEOLOGÍA	11
5.1 Comportamiento y Dirección del Sistema de Flujo del Agua Subterránea	11
5.2 Modelo Hidrogeológico Conceptual	16
6. CONCLUSIONES	27
7. BIBLIOGRAFÍA	28

FIGURAS

Figura 1	Ubicación del área de estudio	6
Figura 2	Columna estratigráfica de la cuenca del sur de Quito (Tomado de Peñafiel, 2009).	9
Figura 3	Perfil estratigráfico de la cuenca del sur de Quito (Metro de Quito, 2013).....	10
Figura 4	Flujo de aguas superficiales y delimitación de las cuencas hidrológicas de la zona de estudio.	11
Figura 5	Pluviosidad de Quito y Áreas circundantes (Tomado de FUNEPSA, 2013).	12
Figura 6	Drenajes del año 1960, basados en la interpretación de fotografías aéreas	13
Figura 7	Índice de vegetación en las cuencas hidrogeológicas de estudio.	14
Figura 8	Zonas con suelos húmedos en las cuencas hidrogeológicas de estudio	15
Figura 9	Modelo conceptual del Acuífero Sur de Quito (EVREN_b, 2012).....	16
Figura 10	Modelo Hidrogeológico para la cuenca sur-centro-norte de Quito. ...	19
Figura 11	Modelo teórico del flujo de las aguas subterráneas.....	20
Figura 12	Distribución geográfica de las cargas hidráulicas de las aguas subterráneas de las microcuencas que influyen en la zona de estudio.	21

Figura 13	Comparación del gradiente hidráulico en secciones E-O y N-S.....	22
Figura 14	Comparación de las isoclinas del gradiente hidráulico en la zona de estudio.	23
Figura 15	Radio de influencia del abatimiento del nivel freático (Eminec.ecuanor, 2018)	25
Figura 16	Gráfica de los abatimientos generados por la extracción del agua (Eminec.ecuanor, 2018)	26

ANEXOS

Anexo 1 Permeabilidades

Anexo 1.1 Ubicación de sondeos

Anexo 2 Abatimientos

1. ANTECEDENTES

La ciudad de Quito se ha caracterizado por tener depósitos de suelos relativamente jóvenes por lo cual a lo largo de su historia geológica, estos suelos se consolidan generando una deformación lenta de tipo secundario, que provocan una subsidencia del terreno. A mismo tiempo la ciudad posee accidentes geográficos muy marcados, atravesada por una intensa red de quebradas, en donde la demanda de territorio para el crecimiento urbano ha provocado que estas quebradas sean rellenadas generando terrenos inestables. Dentro de estas quebradas se han construido redes de alcantarillado que asume la evacuación de aguas servidas y de aguas de lluvias, por el cual en épocas de intensa pluviosidad están sometidas a fuertes presiones hidráulicas, generando en algunas ocasiones su ruptura, y esto a su vez desencadena el desarrollo de erosión subterránea que puede provocar subsidencias en la superficie.

De acuerdo a este contexto la ciudad se posee un riesgo en generar fenómenos asociados con el suelo por lo que se requiere estudios geológicos geotécnicos que permitan caracterizar los suelos que prevalecen en la cuenca de Quito.

En el sector de Solanda al sur de Quito, los fenómenos de subsidencia comenzaron décadas atrás con una lenta consolidación del suelo, debido a las propias características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas. En los últimos años la percepción y evidencia aparente de las deformaciones en la superficie de los suelos se han agudizado generando daños importantes en las viviendas, posiblemente corresponda a causas externas que estén generando una aceleración o reactivación de los procesos de subsidencia de los suelos. Dentro de las posibles causas se consideran diversos mecanismos de deformación que puedan estar generando los asentamientos en la superficie, dentro de los cuales son la inestabilidad de terrenos en zonas de rellenos donde anteriormente eran quebradas, incremento de esfuerzos inducidos por cargas externas, erosión subterránea, o extracción del agua, entre otros.

Dentro de este marco, el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito y la Secretaría General de Seguridad y Gobernabilidad mediante el convenio suscrito el 23 de julio del 2018 para la primera etapa de la "ACTUALIZACIÓN DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE QUITO", adjudicó a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y Escuela Politécnica Nacional, las investigaciones geológicas, geofísicas y geotécnicas.

Dentro de esta coyuntura la Secretaría General de Seguridad y Gobernabilidad, solicitó a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, la evaluación diagnóstico de los fenómenos de asentamientos en el Sector de Solanda, que generan una gran densidad de daños estructurales importantes, provocando problemas para la población de dicho sector.

1.1 OBJETIVO Y ALCANCES

Ejecutar la investigación geológica-geotécnica para generar microzonas geotécnicas en la ciudad de Quito, que estarán sujetas a un comportamiento sísmico. Esta investigación se encuentra dentro del Proyecto de Actualización de la Microzonificación Sísmica de Quito. Por lo tanto este informe está supeditado a un alcance de estudio regional dentro de ello se definirá las potenciales causas que estén generando la agudización de los fenómenos de deformación y daños a las estructuras en el sector de Solanda.

Objetivos Específicos

- Recopilar información disponible de investigaciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas, en el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, especialmente información generada por el proyecto de la Primera Línea del Metro de Quito y Secretaría General de Seguridad y Gobernabilidad e información general de libre acceso.
- Realizar un análisis diagnóstico hidrogeológico.
- Cartografiar los drenajes naturales que cursan en el sur oeste de la cuenca de Quito.
- Modelar el flujo de las aguas subterráneas en el sur de Quito

1.2 METODOLOGÍA

En esta sección del presente informe se hace una descripción de la metodología empleada, específicamente en lo que concierne a la recopilación de la información disponible y la elaboración del informe que identifica el comportamiento de los sistemas de flujos subterráneos identificados y su incidencia en los fenómenos de deformación del suelo en la zona de estudio.

Revisión y Recopilación de Información Existente

La recopilación, selección y análisis de la información disponible, la cual puede dividirse en diferentes categorías: topografía, geología, meteorología, hidrología, hidrogeología, etc.

a) Geología y Topografía

La información topográfica consistió en información geográfica digital disponible en el geoportal “Gobierno Abierto de Quito” y de información digital que otorgó la Secretaría General de Seguridad y Gobernabilidad, del cual se utilizó para el análisis el mapa geológico de Quito, el mapa Geomorfológico de Quito, y fotografías aéreas de la zona de estudio del año 1960. Dentro de la información también se utilizaron informes técnicos de consultorías contratadas por la Secretaría General de Riesgos, del Metro de Quito, de la EMAAP-Q y de proyectos de investigación de pregrado.

b) Meteorología

Se recopilaron datos pluviométricos y climatológicos de estudios realizados en la zona de estudio. Los datos comprendieron las principales variables climatológicas como: precipitación y evapotranspiración potencial, infiltración, etc. Con este tipo de información se pretende determinar los principales componentes para la determinación la obtención de la recarga hídrica potencial.

c) Hidrogeología e Hidrología

La información hidrogeológica consistió en el inventario de pozos que pudiesen existir en la zona de estudio; además de la recopilación de informes hidrogeológicos de manera de contar con los datos básicos para la realización de la caracterización hidrogeológica. Obtención de datos que determinen el comportamiento del sistema de drenaje superficial (escurrimiento) y su interacción con el medio físico, además de la relación existente con los flujos subterráneos presentes en la zona de estudio, e incluir la información existente sobre la red hídrica subcuencas, ríos, quebradas, etc.

Esta fase consistió en el análisis e interpretación de los resultados obtenidos la recopilación de la información existente, de manera que pudo establecerse el modelo conceptual hidrogeológico que indicó la dirección del sistema de flujo subterráneo de la zona para lo cual se utilizó el software libre acceso de modelación de aguas subterráneas Model Muse de Modflow del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), además de realizarse el correspondiente análisis de la recarga hídrica potencial de la zona.

1.3 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en el Sur del Distrito Metropolitano de Quito, en la parroquia de Solanda, la misma que se encuentra inmersa dentro de las microcuencas del río Machángara y del río Grande, hacia el noreste éste último río se junta al río Machángara para formar un solo drenaje, el cual caracteriza al nombre de la subcuenca del río Machángara a la que pertenece la zona de estudio. Abarca una extensión territorial de 720m² aproximadamente y con una elevación que varía entre 2849 a 2857msnm (Figura 1).

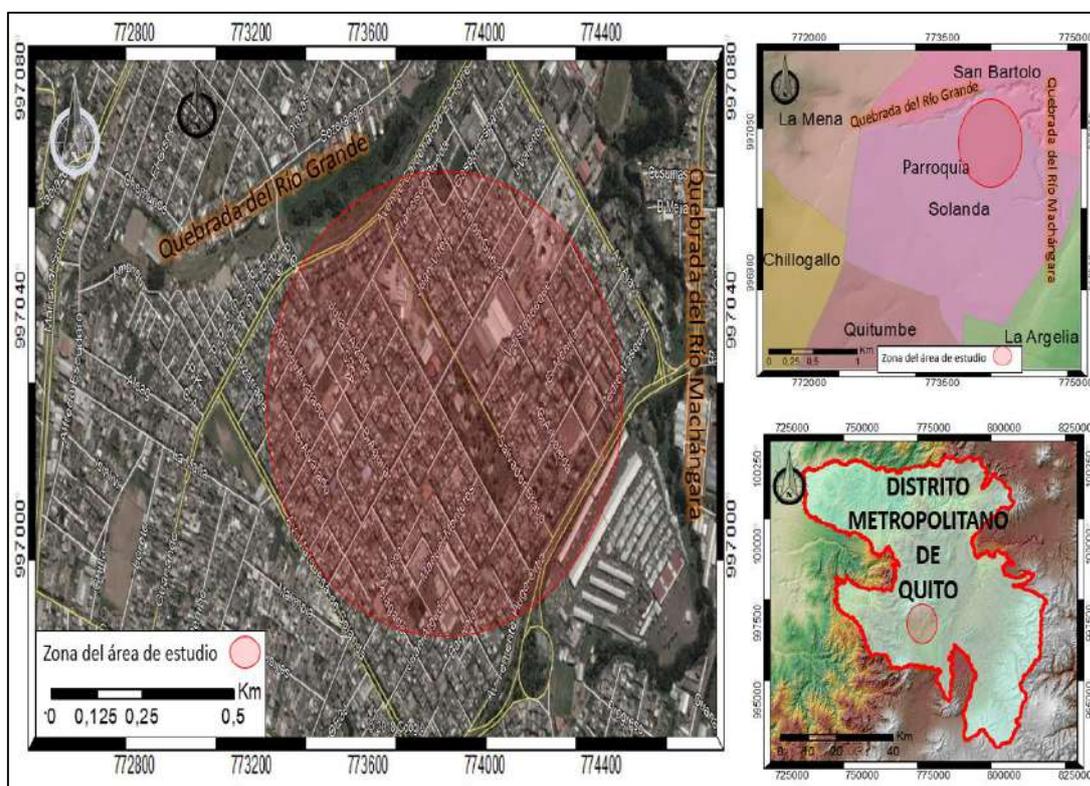


Figura 1 Ubicación del área de estudio

2. CLIMA

El área de estudio se identifica como un clima semi-húmedo a húmedo, presentando las siguientes características: precipitación pluvial promedio de 1200 a 1400mm (Figura 6) y teniendo una temperatura promedio de 14°, datos que son característicos por las condiciones topográficas que presenta la zona, cuya elevación se establece que varía de los 2857 a los 2849msnm (EVREN_a, 2012; FUNEPSA, 2015).

3. GEOMORFOLOGÍA

La cuenca de Quito es una depresión topográfica de dirección aproximada N-S, morfológicamente se divide en dos subcuencas: centro-norte y sur, separadas por el río Machángara y el domo El Panecillo. La formación de esta cuenca está directamente relacionada con la actividad del sistema de fallas inversas de Quito, de dirección N – NNE, cuya expresión morfológica es una serie de lomas alargadas situadas al este de la ciudad.

La zona de estudio pertenece a la unidad geomorfológica de cubeta escalonada de relleno Fluvio lacustre de Quito, en donde las condiciones topográficas prevalecientes de zona corresponden a una superficie plana, con una forma semi-rectangular con pendientes menores al 5% por lo que puede clasificarse como una pendiente baja, sin embargo las pendientes en las zonas de las quebradas pueden ser mayores a 30°, es por ello que se establece como condicionante para el drenaje natural existente, donde las quebradas en épocas de invierno, pueden llegar a transportar caudales moderados a intensos, dependiendo de la pluviosidad reinante.

4. GEOLOGÍA LOCAL

La ciudad de Quito ha estado determinada por una serie de eventos o fenómenos naturales como procesos tectónicos, fenómenos volcánicos y procesos erosivos fluviales, los cuales han influido en la disposición de los distintos estratos geológicos de origen volcánico predominantemente de los volcanes Atacazo y Guagua Pichincha, dichos depósitos se agruparon dentro de las formaciones Machángara y Cangahua (Fig. 2) (Villagómez D, 2003).

Formación Machángara

La Fm. Machángara está constituida por los miembros Volcánicos Basales y Quito.

El Miembro Volcánicos Basales está formado por avalanchas de escombros y lavas andesíticas intercaladas con depósitos piroclastos del Pichincha y Atacazo-Ninahuilca; los depósitos posiblemente superan los 80 metros de potencia, se le atribuye edad de Pleistoceno Medio.

El Miembro Quito está constituido por flujos de lodo intercalados con arena media a gruesa con pómez, presenta grano estrato decreciente y variación de facies en dirección oeste – este y sur – norte. Al oeste, el tamaño de grano de los sedimentos es grueso (facies aluviales – conglomeráticas), y hacia el este son depósitos finos (facies lacustres y palustres). Al sur, depósitos de debris flow y lahares son proximales y hacia el norte son distales. El espesor posiblemente supera los 300 m en el centro de la cuenca. En la edad atribuida para este miembro es Pleistoceno Superior (Peñafiel, 2009).

En la secuencia estratigráfica del sur de Quito, el Miembro Quito está dividida en la Unidad Volcano-Sedimentaria Guamaní y la Unidad Fluvio-Lacustre El Pintado (Figura 2 y Figura 3), se sugiere que entre las dos unidades existe un cambio transicional.

Unidad Volcano-sedimentaria Guamaní

Formada por depósitos de flujos piroclásticos poco compactos de buenas características hidrogeológicas, presenta al tope caídas de ceniza y oleadas piroclásticas mientras que a la base está formada por un depósito de tobas blancas, el depósito es altamente poroso y de baja densidad, además esta unidad contiene materia orgánica (Peñafiel, 2009).

Unidad Fluvio – Lacustre El Pintado

Conformada por depósitos de ambiente fluvial y lacustre. La base de la unidad está formada por brechas volcánicas intercaladas con areniscas finas y arcillas de espesores entre 0.3-1.0 metros. Sobreyaciendo este conjunto se encuentra una serie de estratos de arcilla y arena de color verde. El conjunto presenta gradación normal y líticos subredondeados, lo que indica un ambiente fluvial; el espesor no supera los 10 m de potencia con estratos individuales entre 0.2-0.5 metros. Al tope de esta unidad se han identificado una serie de turbas – paleosuelos y tobas que sobreyacen las arcillas y arenas de color verde. El conjunto tiene un espesor de 20 m; (Peñafiel, 2009).

Formación Cangahua

La Fm. Cangahua es considerada por varios autores como un producto de volcanismo, genéticamente corresponde a depósitos de toba alterada típicamente de colores amarillentos a marrones, intercalada con caídas de ceniza y polvo volcánico de origen piroclástico, pómez, paleosuelos y en ciertas ocasiones con flujos de lodos y canales aluviales. Generalmente la cangahua tiene una textura de limo arenoso, en ocasiones se observan finos niveles de costras calcáreas y limonita entre planos de estratificación o rellanando grietas de desecación. El espesor oscila entre los 14-40 m se ha calculado una edad de esta formación entre 10-120 Ka. De igual manera subdividen a la Fm. Cangahua en dos facies, la de coluviales y de cangahua propiamente dicha. Los materiales reconocidos en los primeros 15 metros de la zona de estudio se ubican en la parte superior de la secuencia que corresponde a la Unidad Fluvio-Lacustre El Pintado (EVREN, 2012; Peñafiel, 2009; EMAAP-Q, 2012).

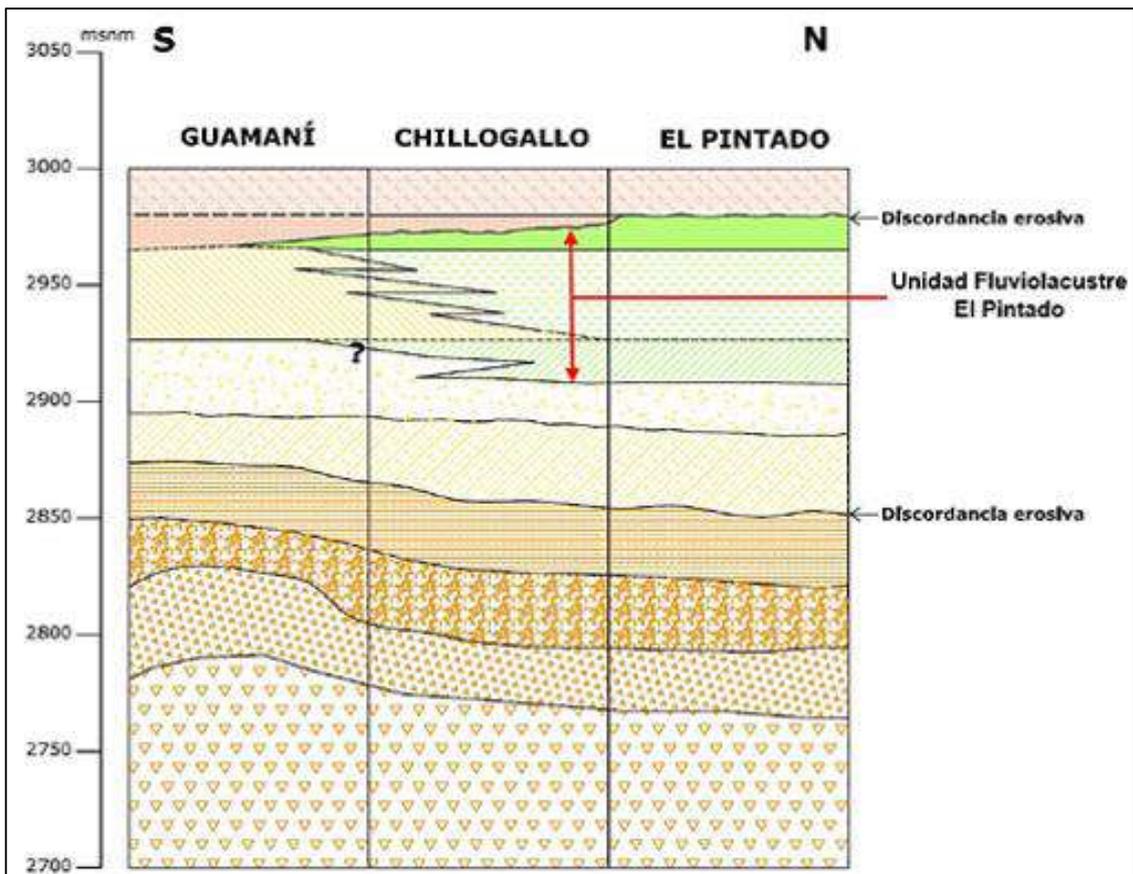
Depósitos La Carolina

En observaciones llevadas a cabo por Freire y Ríos (1985) en los alrededores del Río Grande (UTM: 733-709) se describen materiales finos de ambiente palustre y lacustre, depósitos de suelos pantanosos muy orgánicos intercalados con caídas de ceniza y pómez de diferente espesor, así como también fluviales finos, que corresponderían a los depósitos La Carolina. En este sector el espesor de la unidad es de alrededor de 14 m. Estimándose que llegaría a tener una potencia de hasta 10 m en la parte baja de la cuenca (EMAAP-Q, 2012).

La formación de estos depósitos en la cuenca Sur está condicionada a las características morfológicas de la misma, en donde el río Machángara representa un importante drenaje, que impide la acumulación de los sedimentos, pero a su vez formarían pequeños riachuelos asociados que drenan este sector, los mismos que en ciertas épocas del año tienen poco caudal y por lo tanto poca energía como para arrastrar una gran cantidad de sedimentos lo que permite su acumulación (EMAAP-Q, 2012; Alvarado, 1996).

Depósitos Aluviales

Comprenden cantos y aglomerados de origen volcánico entre sedimentos medios y finos. Estos depósitos están relacionados con la evolución de los drenajes actuales del valle del río Machángara y río Grande y se hallan hoy en día en proceso de formación. (EMAAP-Q, 2012).



			LITOLOGÍA
FORMACIÓN CANGAHUA Holoceno (0.01 Ma)			<ul style="list-style-type: none"> Cangahua (Acuitardo) Coluviales
FORMACIÓN MACHÁNGARA Pleistoceno Tardío	Mb. Quito	U. Fluvio - Lacustre El Pintado	<ul style="list-style-type: none"> Turbas, paleosuelos y tobas Niveles de arcilla verde y cenizas Brechas, arcillas y areniscas finas
		U. Volcanosedimentaria Guamaní aprox. 410 - 70 Ka.	<ul style="list-style-type: none"> Cenizas y oleadas piroclásticas Flujo piroclástico "block and ash" (Acuífero) Toba blanca
FORMACIÓN MACHÁNGARA Pleistoceno Tardío	Mb. Volcánicos Basales	U. De Basamento	<ul style="list-style-type: none"> Flujos de lodo proximales y distales Avalanchas de Escombros (Acuífero) Brecha volcánica soldada Flujos de lava andesítica

Figura 2 Columna estratigráfica de la cuenca del sur de Quito (Tomado de Peñafiel, 2009).

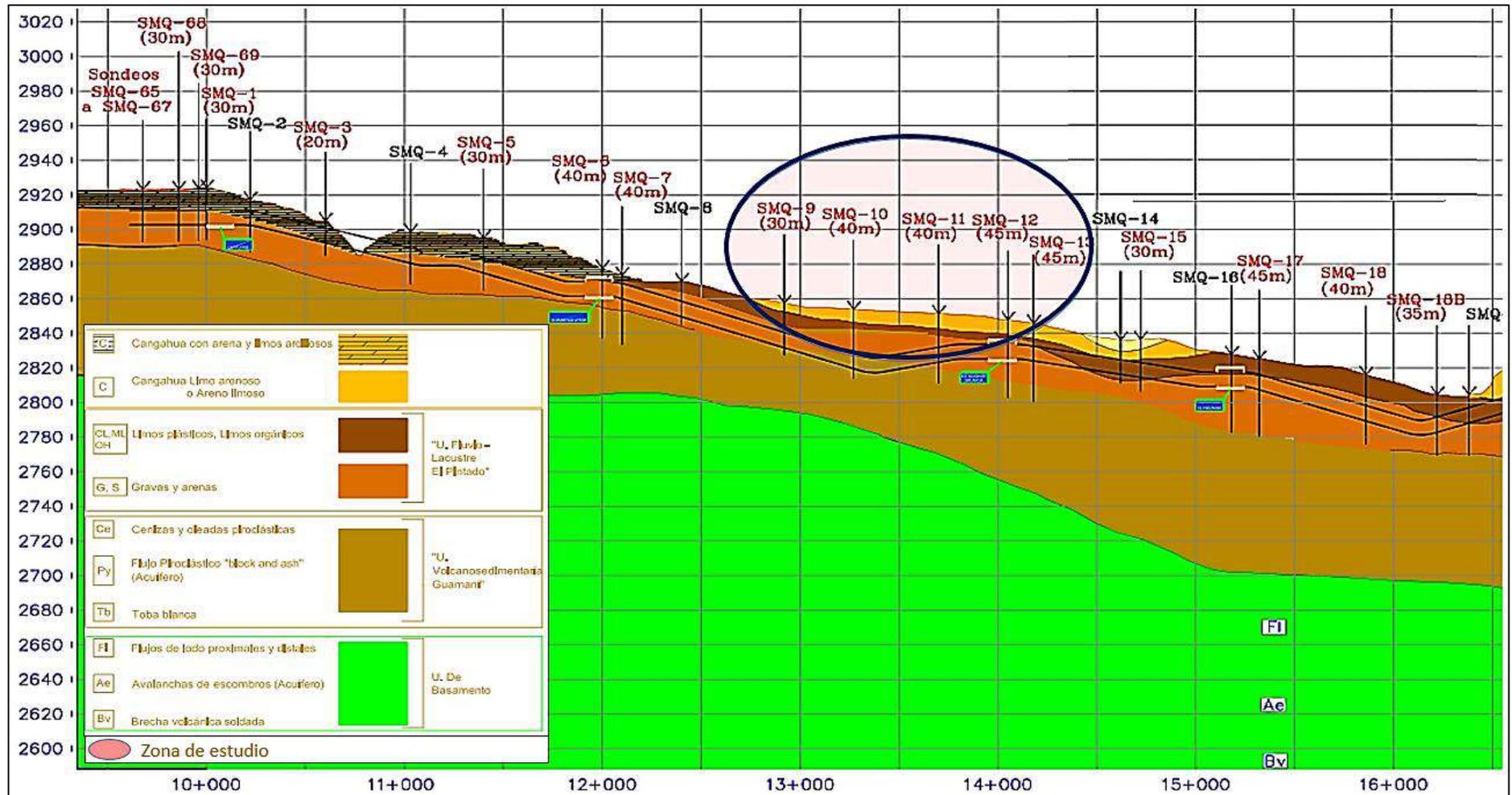


Figura 3 Perfil estratigráfico de la cuenca del sur de Quito (Metro de Quito, 2013).

5. HIDROGEOLOGÍA

En esta sección se contempla la descripción del contexto hidrogeológico de la zona de estudio y de su área circundante, además de describir las unidades hidrogeológicas presentes para establecer su correlación respectiva con las formaciones geológicas identificadas. Todo esto con el propósito de establecer el modelo conceptual del sistema de flujo subterráneo de la zona y su comportamiento con respecto a los flujos superficiales.

El sur de Quito se encuentra representado hidrogeológicamente por los yacimientos de Guamaní y El Pintado, que están limitados al este por la Loma de Puengasí que separa al sur de Quito con el Valle de los Chillos y al oeste por el macizo hidrogeológico El Cinto, al norte por el macizo rocoso El Panecillo y al suroeste por el complejo volcánico Atacazo-Ninahuilca. Entre los principales ríos que drenan el sur de Quito, tenemos al río Machángara y río Grande que nace en las estribaciones orientales del Atacazo (Figura 4).

5.1 Comportamiento y Dirección del Sistema de Flujo del Agua Subterránea

El comportamiento del flujo del agua subterránea de los yacimientos fluye a través de los materiales porosos saturados del subsuelo hacia niveles más bajos que los de infiltración, y la descarga del flujo subterráneo se produce hacia los drenajes superficiales localizados en las microcuencas de análisis, cuando se intercepta el nivel de saturación con el nivel topográfico.

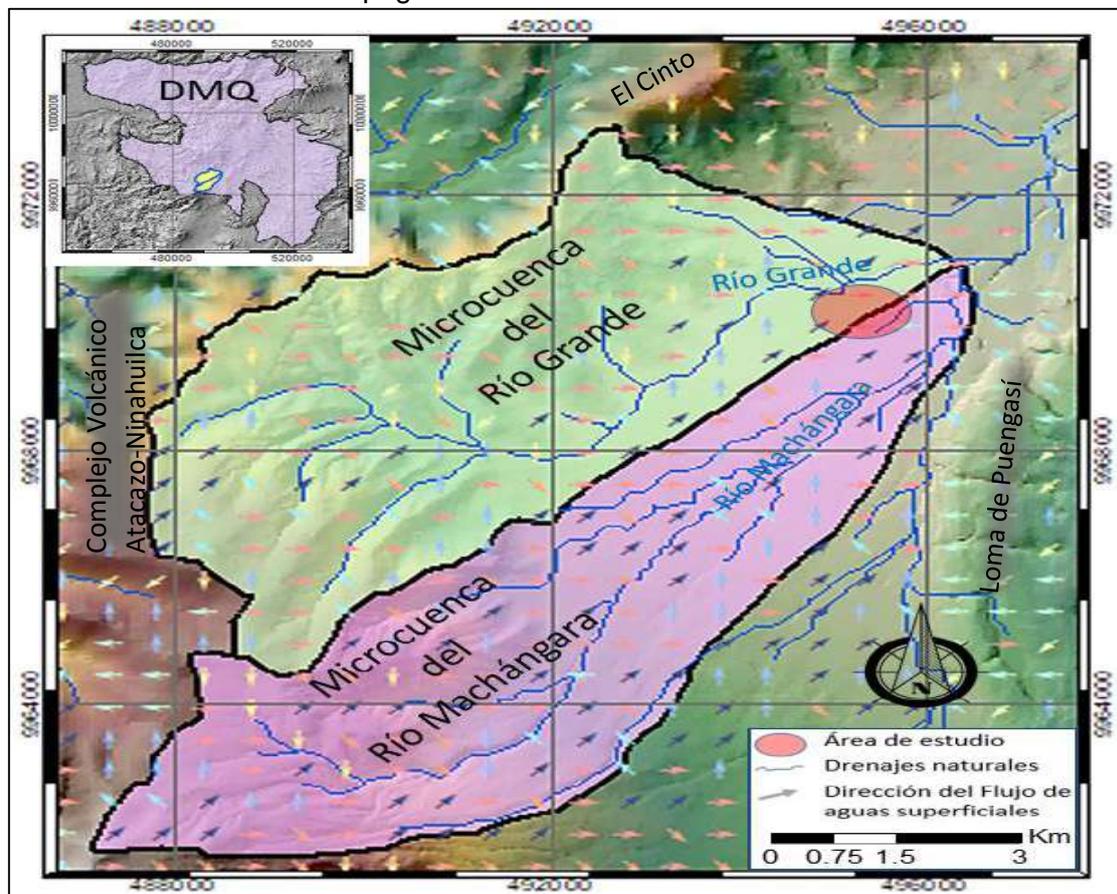


Figura 4 Flujo de aguas superficiales y delimitación de las cuencas hidrográficas de la zona de estudio.

La alimentación hídrica es una parte del ciclo hidrológico, el cual comienza con la precipitación (Figura 6), que es el origen de prácticamente toda el agua dulce, esta a su vez genera una parte de escorrentía superficial y otra parte entre el 18% al 30% se infiltra en el suelo (Tabla 1). Una pequeña parte de la infiltración es retenida por la vegetación y parte de ella vuelve a la atmósfera por la evapotranspiración. El excedente percola de la zona de raíces hacia abajo por la fuerza de gravedad y continúa su descenso hasta ingresar a un reservorio de agua subterránea.

En este contexto es importante analizar de manera holística todos los factores que influyen en la alimentación de las aguas subterráneas en la zona de estudio, de esta forma se evalúa las direcciones de los flujos de aguas superficiales, los cuales permitirán identificar las cuencas hidrogeológicas que influyen en el comportamiento hidrogeológico del presente estudio (Figura 5).

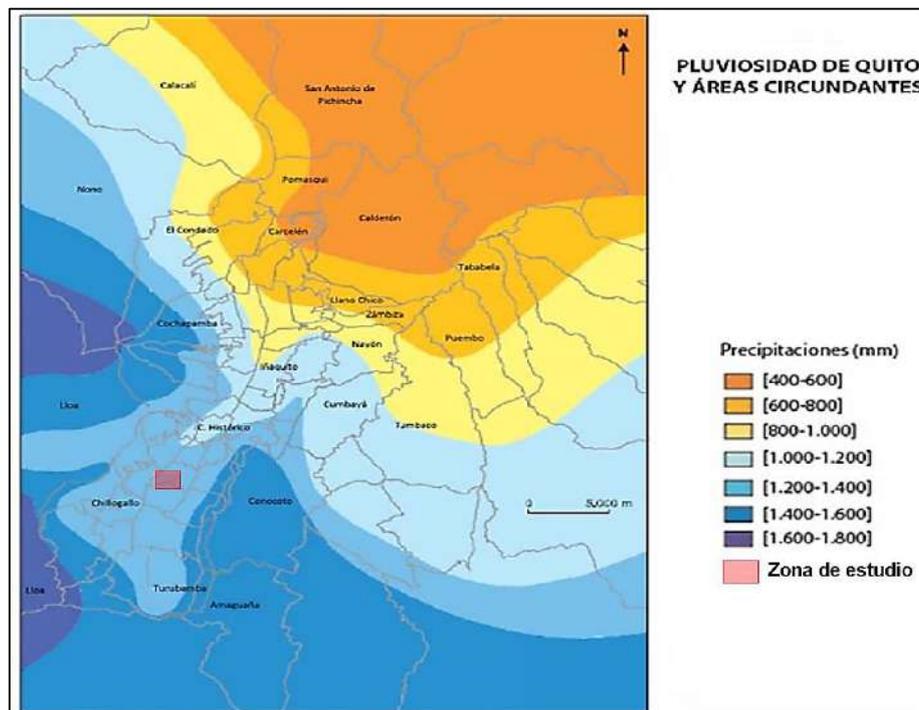


Figura 5 Pluviosidad de Quito y Áreas circundantes (Tomado de FUNEPSA, 2013).

En base al estudio de drenajes naturales actuales, se evaluó la dirección de flujo superficial (Figura 5) que permite discretizar la información previa de las condiciones hidrológicas en las microcuencas que influyen en la zona de estudio, teniendo como direcciones predominantes, la dirección E-O y la dirección SSO-NNE, determinando que la mayor influencia en las condiciones hidrológicas provienen del flanco occidental de la cuenca de Quito y en menor o escasa influencia el flanco oriental, que son las fuentes de recarga principal de las aguas subterráneas, que para fines de simplificación del modelamiento, éste último no será considerado en el estudio.

Dentro de la caracterización cualitativa de la dirección del flujo superficial se puede analizar como fluctúa la escorrentía y las posibles zonas de infiltración, y por lo tanto de la alimentación de las napas subterráneas las mismas que son influenciadas por dos tipos de condiciones: las Precipitaciones (Figura 5) y las condiciones del terreno.

En el suelo, la humedad inicial juega un papel preponderante, cuando el suelo está seco, al comienzo de la lluvia, se crea una fuerte capilaridad al humedecerse las capas superiores, y este efecto, se suma al de gravedad incrementando la intensidad de infiltración y la cobertura vegetal del suelo. Por lo cual se realiza un análisis del índice de vegetación en las cuencas hidrogeológicas del estudio (Figura 7) y una identificación de suelos húmedos (Figura 8) mediante el procesamiento de imágenes satelitales.

Se puede apreciar que existe pequeñas áreas de acumulación de vegetación en la zona de estudio, que usualmente corresponden a áreas de recreación y quebradas, por lo que escasas áreas vegetativas provoca una menor retención del agua en superficie y un posible indicador de menor capacidad de infiltración y por la extensa área urbana que impermeabiliza los suelos, propicia el incremento de aporte de agua a la escorrentía superficial que termina siendo acarreada en la red de alcantarillado. La mayor humedad en la capa más superficial del suelo se identificó en zonas de mayor vegetación principalmente en áreas donde cursan los drenajes naturales, por lo cual son motivo de mayor énfasis en el estudio.

En este contexto se realiza un estudio de los drenajes naturales antes de la ampliación urbana con fotografías aéreas pertenecientes al año 1960 del Instituto Geográfico Militar y su modificación antrópica posterior en el año 2018, este análisis permitirá tener una mejor comprensión de los drenajes naturales antiguos (Figura 6) que puedan estar conteniendo suelos saturados en agua, además de suelos inestables debido a los rellenos antrópicos que generen efectos negativos en las estructuras subyacentes actuales. Los drenajes estaban inclinados hacia el noreste, apreciando que aguas abajo, los drenajes se vuelven difusos, en una planicie con depresiones no drenadas, como también se observó en el estudio de SGSG, 2017, demostrando que estas características son favorables para depositar suelos finos de alta plasticidad y suelos orgánicos.

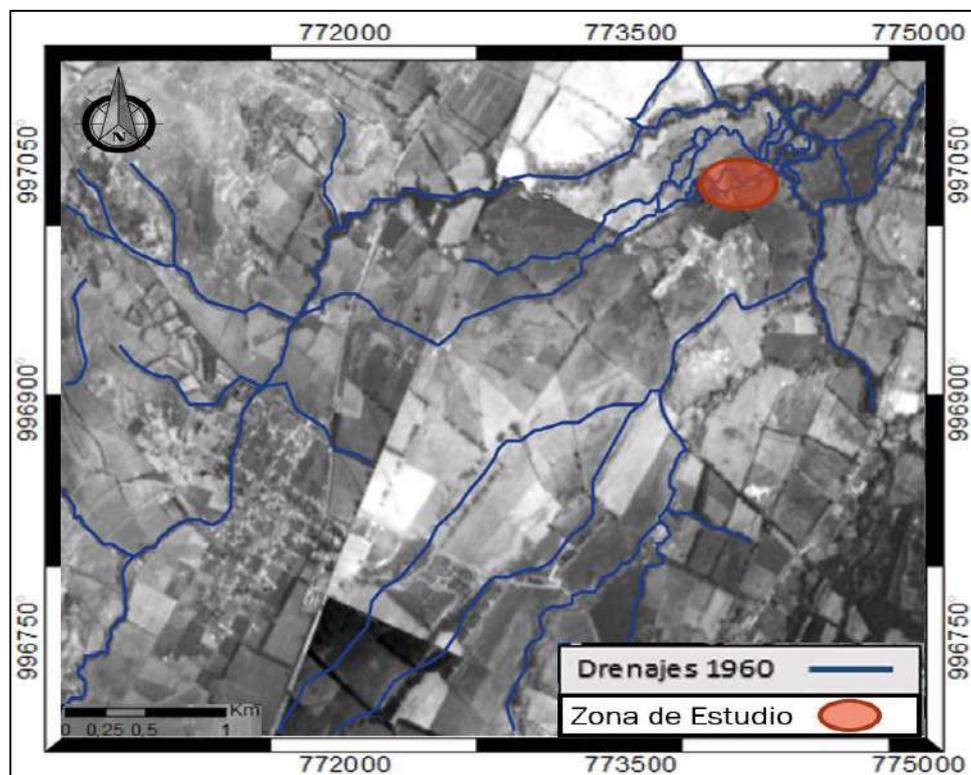


Figura 6 Drenajes del año 1960, basados en la interpretación de fotografías aéreas

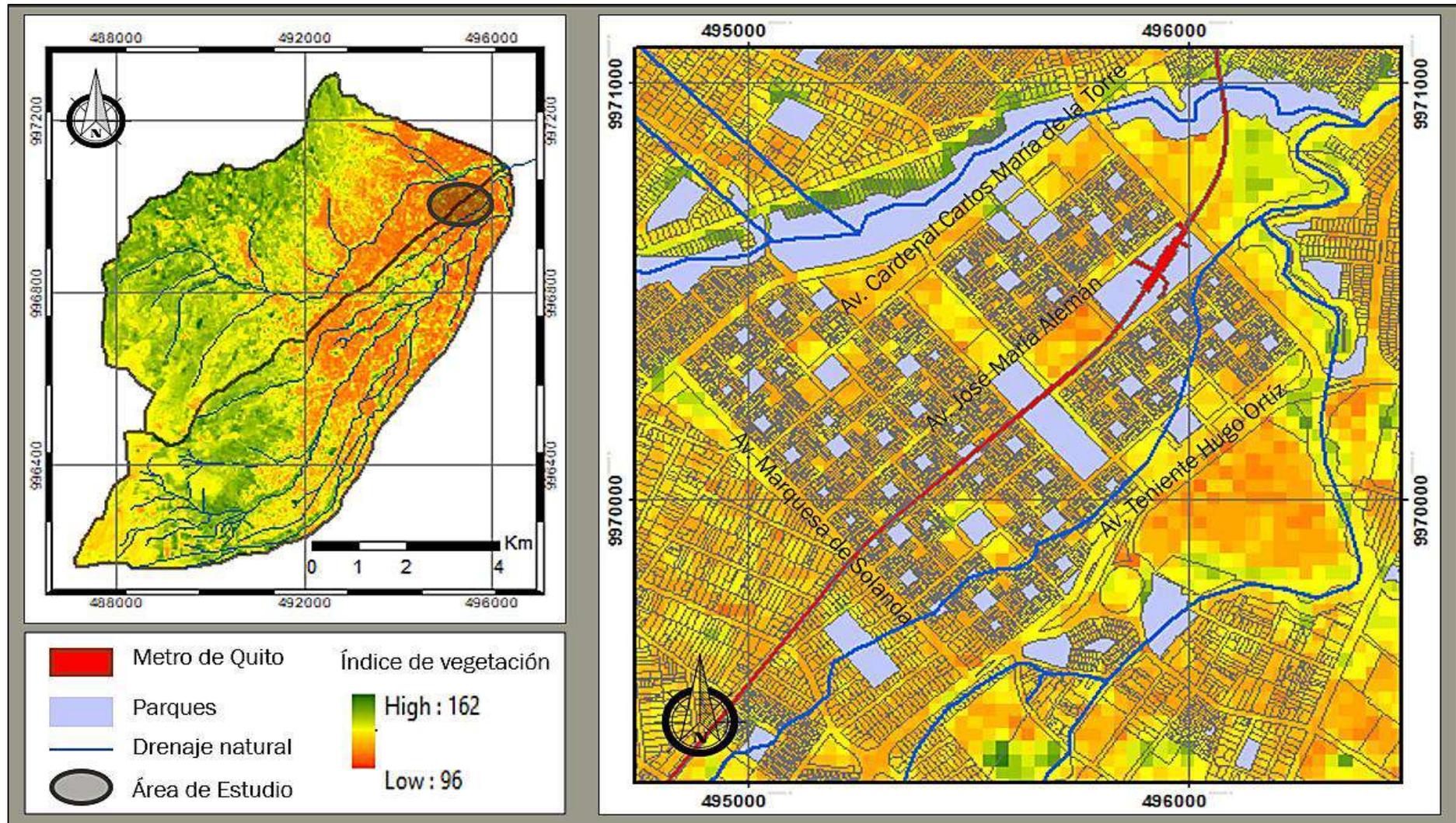


Figura 7 Índice de vegetación en las cuencas hidrogeológicas de estudio.

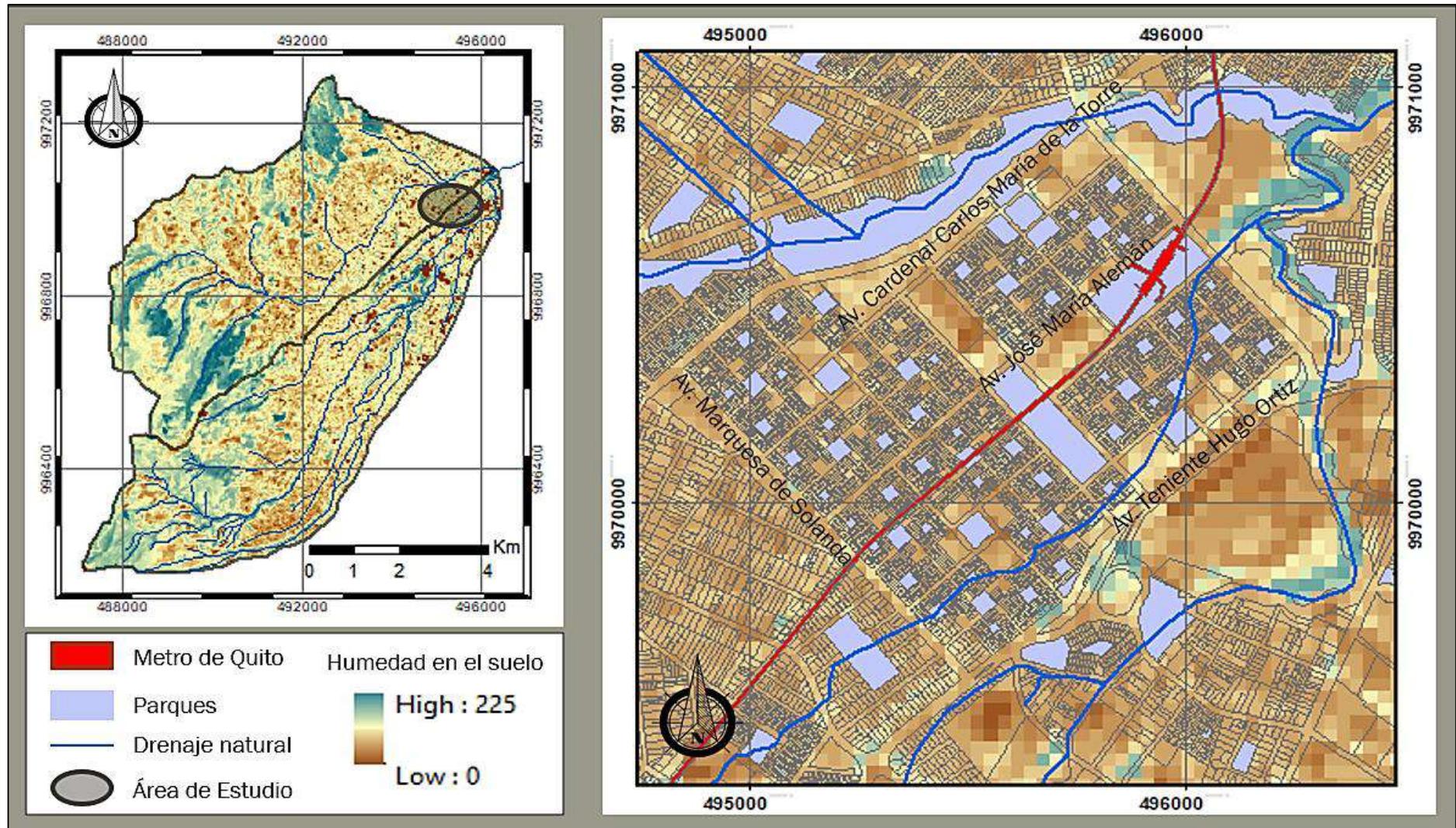


Figura 8 Zonas con suelos húmedos en las cuencas hidrogeológicas de estudio

5.2 Modelo Hidrogeológico Conceptual

El yacimiento de Guamaní y el Pintado conforman el recurso hídrico de la subcuenca del sur de Quito, en donde el modelo hidrogeológico conceptual establece la presencia de un acuitardo y dos niveles de acuíferos: el Nivel Acuífero Superior o Nivel A y el Nivel Acuífero Inferior o Nivel B (Figura 9).

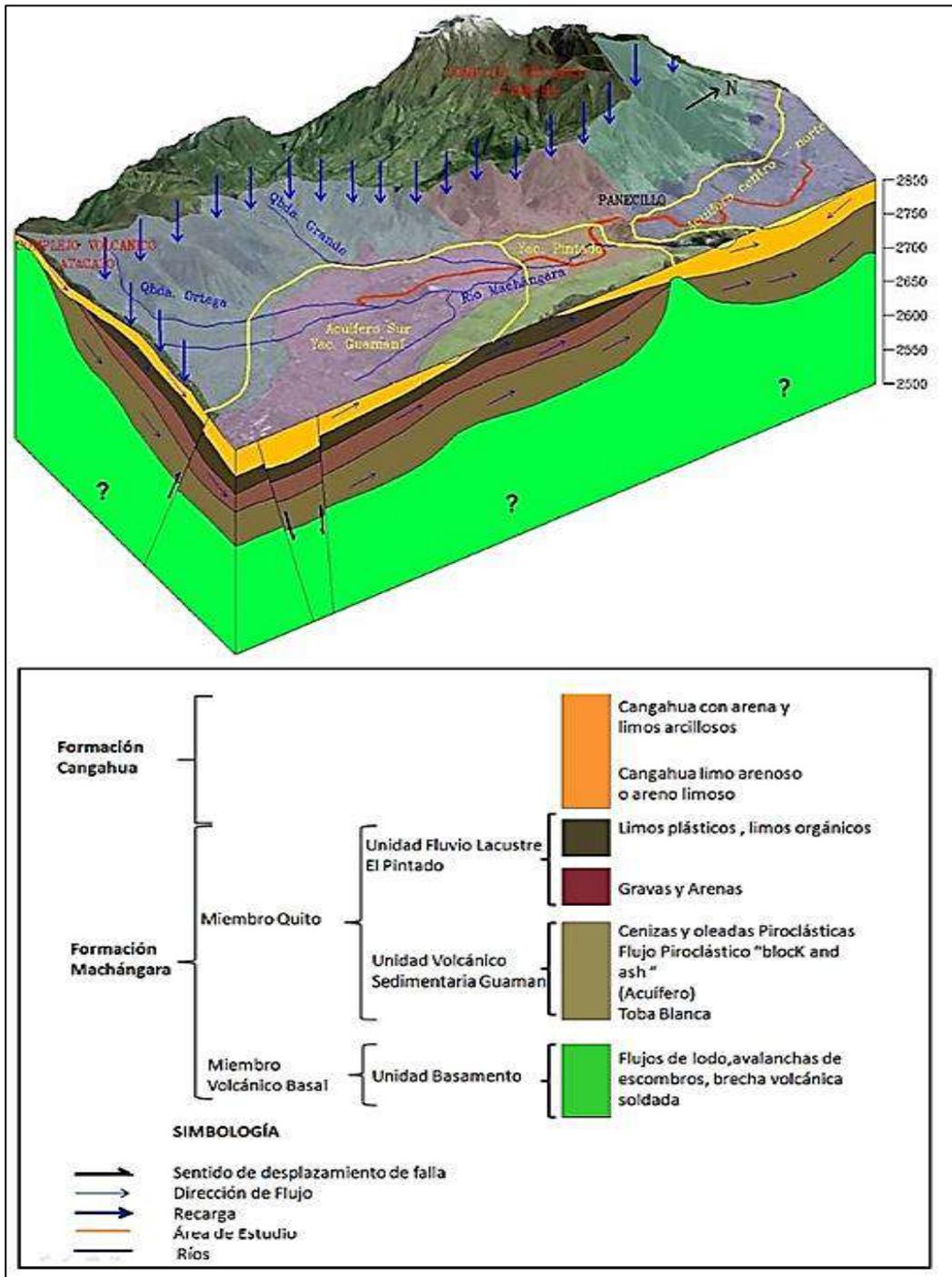


Figura 9 Modelo conceptual del Acuífero Sur de Quito (EVREN_b, 2012).

El suelo de la zona de estudio se caracteriza por tener una capa de características hidrogeológicas de acuitardo debido a las bajas permeabilidades que esta presenta (Tabla 1), a su vez geológicamente se le atribuye a los depósitos de la Formación Cangahua y depósitos La Carolina la misma que litológicamente presenta una mezcla de pequeños estratos y lentes de arena y grava de variadas dimensiones, material friable de diversos orígenes, como aluvial, eluvial y proluvial, este nivel está distribuido en diferentes profundidades entre 10 a 15m (Figura 10) (EVREN_a, 2012; EVREN_b, 2012).

Debajo de ésta capa subyace un depósito de sedimentos piroclásticos compuesto por bloques y gravas en una matriz areno limosa que corresponde al Miembro Quito de la Formación Machángara, con características hidrogeológicas de acuífero semiconfinado debido a la presencia de materiales confinantes y a la presencia de artesianismo, denominado Nivel A, la misma que se presenta a una profundidad superior a los 15m (Peñañiel, 2009; Metro de Madrid, 2013; EVREN_a, 2012; EVREN_b, 2012).

Un mejor detalle de las condiciones del flujo subterráneo puede presentarse mediante el perfil geológico (oeste-este) que se detalla en la Figura 10. La Formación Cangahua y el Miembro Quito están relacionados entre sí hidrogeológicamente, debido a que todos los sedimentos presentes tienen conductividades variables, ya sea en algunos sectores donde la alimentación del Nivel A, sea por infiltración (goteo) por parte del acuitardo o de forma directa a través de estratos intermedios menos permeables del acuitardo, lo que lo convierte en una zona aún más anisótropa para su estudio.

Tabla 1 Datos hidrogeológicos para las capas del acuífero del sur de Quito (Datos tomados de Peñañiel, 2009; Metro de Madrid, 2013; EVREN_a, 2012; EVREN_b, 2012).

Características	ACUITARDO	NIVEL_A	NIVEL_B
COTAS SUPERFICIALES (m)	2993-2865	2920-2810	Desconocido
ESPESOR MEDIO (m)	12	30	>50
LITOLOGÍA	arena arcillosa y limo	arena media a fina, mezcla de arena y grava	arena fina y mezcla de arena, arcilla y limo
FORMACIÓN GEOLÓGICA	Fm Cangahua y Depósitos La Carolina	Unidad Fluvio-Lacustre El Pintado.	Mb. Volcánicos basales de Fm. Machángara
CARACTERÍSTICAS	Acuitardo	Acuífero semiconfinado multicapa	Acuífero semiconfinado surgente, cuyo caudal artesianos es de 2l/s
Transmisividad (m²/día)	0.06-43	0.15-53	
Coeficiente de Almacenamiento	0.05-0.0001		
DIRECCIÓN DE FLUJO	Flujo N-NE, el agua fluye a la quebrada Sanguanchi	Flujo NNE-E	

Los factores que permiten el movimiento de las aguas subterráneas son la porosidad, permeabilidad o conductividad hidráulica y filtración dentro de cada acuífero. Se recopiló la información previa el cual define un sistema de acuíferos para el sur de Quito, dentro de los cuales se ha delimitado una capa con características de acuitardo y dos niveles de acuíferos semiconfinados (Figura 10) que se detallan para la zona de estudio en la Tabla 1.

Las permeabilidades de un acuitardo generalmente tienen valores menores a 10^{-1} y un acuífero con buenas características hidrogeológicas poseen valores de permeabilidad mayores a 1 (Custodio y Llamas, 1983), por lo cual los valores obtenidos en la zona de estudio (Anexo 1, Tabla 1 y Figura 10) no permiten esclarecer de forma clara las características del tipo de acuífero de cada nivel, por lo cual es indispensable realizarse un estudio que permita caracterizar de mejor manera las permeabilidades del sector, a través de pruebas de bombeo.

La principal zona de recarga de las aguas subterráneas provienen del flanco occidental del Complejo Volcánico Atacazo-Ninahuilca y El Cinto, cuyas aguas escurren en dirección oeste-este y suroeste-noreste, surgiendo parte de la descarga en los márgenes de los ríos Machángara y Río Grande.

Los parámetros hidrogeológicos a ser considerados dentro de la zona de estudio, son datos de investigaciones previas que corresponden al valle del sur de Quito y el flanco occidental para las microcuencas del Río Machángara y Río Grande respectivamente, de investigaciones de Peñafiel, 2009 y EVREN, 2012 (Tabla 1).

Tabla 2 Datos hidrológicos para las microcuencas que influyen en la zona de estudio (Peñafiel, 2009; EVREN, 2012).

(mm/año)	MICROCUENCAS				Promedio
	RÍO GRANDE		RÍO MACHÁNGARA		
Precipitación media anual		1404,3		1150,9	1277,6
Escorrentía Superficial	27%	379,161	27%	310,743	344,952
Evapotranspiración real	42,40%	595,4232	54,70%	629,5423	612,483
Infiltración natural	30,60%	429,7158	18,30%	210,6147	320,165
Infiltración antrópica	10%			78,916	7,892
Recarga		429,7158		210,6147	328,057
Descarga por vertientes					101,085

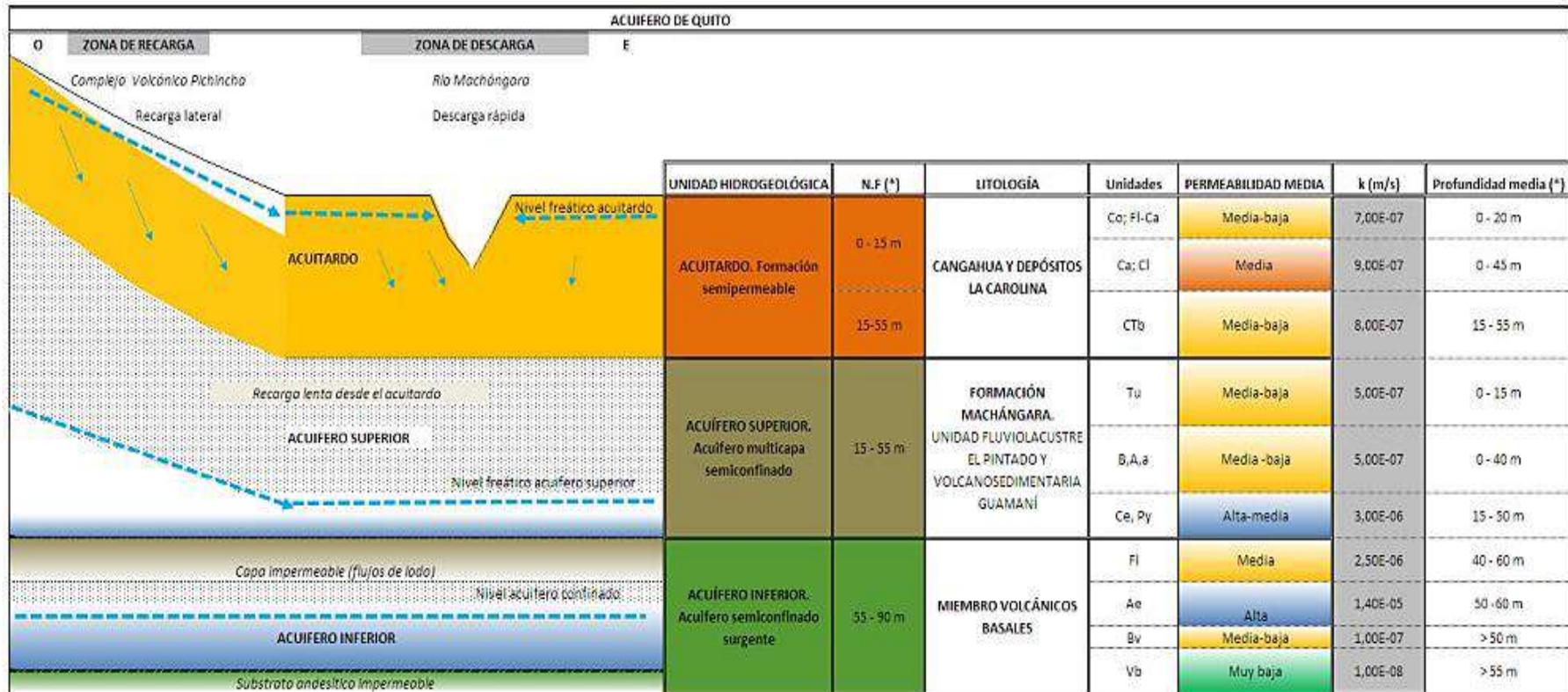


Figura 10 Modelo Hidrogeológico para la cuenca sur-centro-norte de Quito.

El flujo natural del agua subterránea se puede esquematizar mediante redes de flujo (Figura 11), teniendo en cuenta las características de un suelo homogéneo e isótropo. Los modelos matemáticos de sistemas de aguas subterráneas son representaciones matemáticas de los mismos que incluyen asunciones y simplificaciones. Dentro de esta simplificación se asume que existe una interacción entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas de las cuencas, existiendo una conexión entre la cuenca hidrológica y la cuenca hidrogeológica.

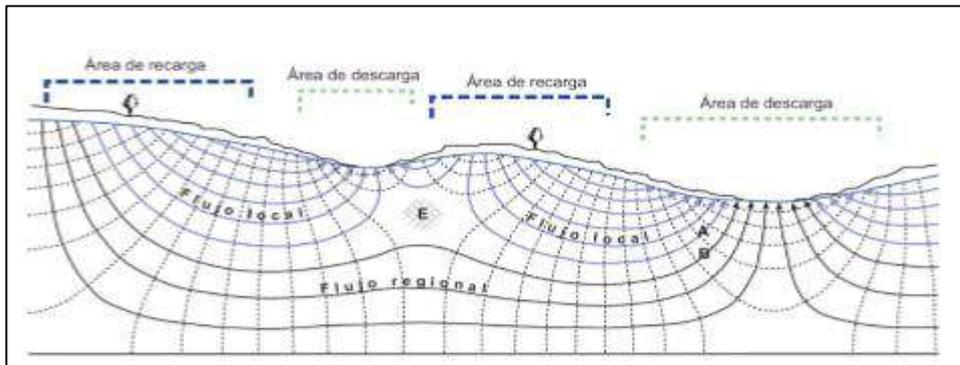


Figura 11 Modelo teórico del flujo de las aguas subterráneas

La dinámica del flujo en un medio poroso saturado se describe mediante la ley de Darcy, en el cual la velocidad del flujo a través del medio poroso es directamente proporcional a la gradiente de presión piezométrica o carga hidráulica. El agua que ha alcanzado la zona saturada, circulará por el medio (rocas porosas, fisuradas o sedimentos) siguiendo los gradientes hidráulicos regionales; es decir la pendiente hidráulica (el término involucra el concepto de que el agua se mueve desde una zona de mayor nivel energético hacia otra de menor valor). Dentro de este contexto se realizó un modelo en función de las cargas hidráulicas con condiciones de borde del año de 1960 y el año 2018, para poder tener un mejor entendimiento de los posibles comportamientos del agua subterránea bajo la mancha urbana del sur de Quito en la zona de estudio (Figura 12).

El potencial hidráulico en las cuencas de estudio posee un valor elevado hacia el extremo noreste, manifestando que el flujo de aguas subterráneas converge hacia ese sector, pudiendo provocar suelos saturados en agua, y una zona sensible a cambios del contenido de agua en el suelo.

En condiciones naturales se aprecia la distribución de cargas hidráulicas (Figura 12), la misma que exhibe una marcada diferencia en el área de recarga y descarga para ambas fechas, denotando que el flujo subterráneo en la actualidad presenta un dominio del componente vertical descendente de la carga hidráulica, y esto es una de las consecuencias del soterramiento de los drenajes naturales que permitían tener descargas de la infiltración del agua natural, y a su vez esto corresponde a la impermeabilización de las construcciones para la ampliación de la zona urbana, el cual crea una barrera al proceso hidrogeológico y por ende altera los niveles freáticos y las trayectorias de los flujos subterráneos.

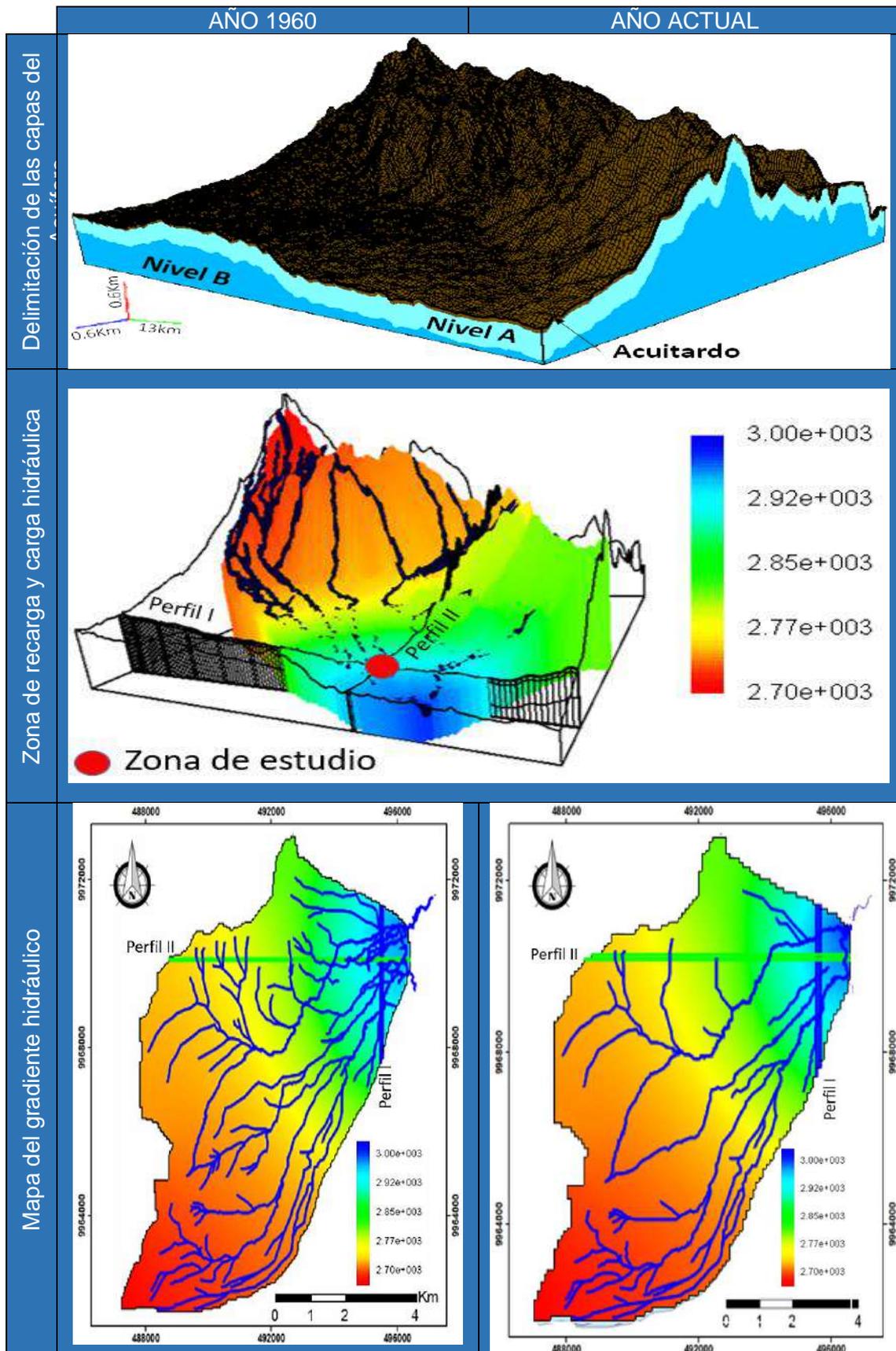


Figura 12 Distribución geográfica de las cargas hidráulicas de las aguas subterráneas de las microcuencas que influyen en la zona de estudio.

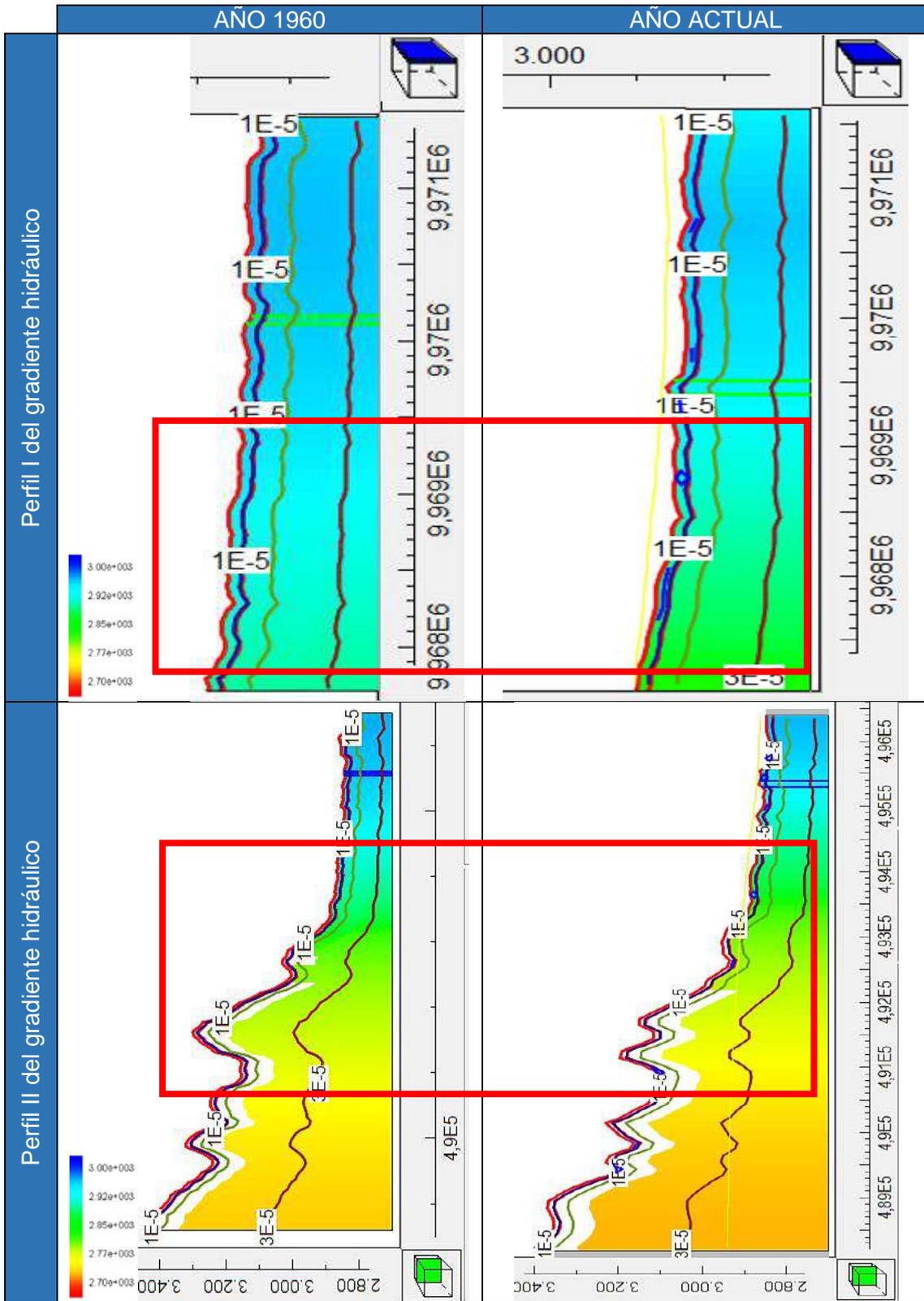


Figura 13 Comparación del gradiente hidráulico en secciones E-O y N-S

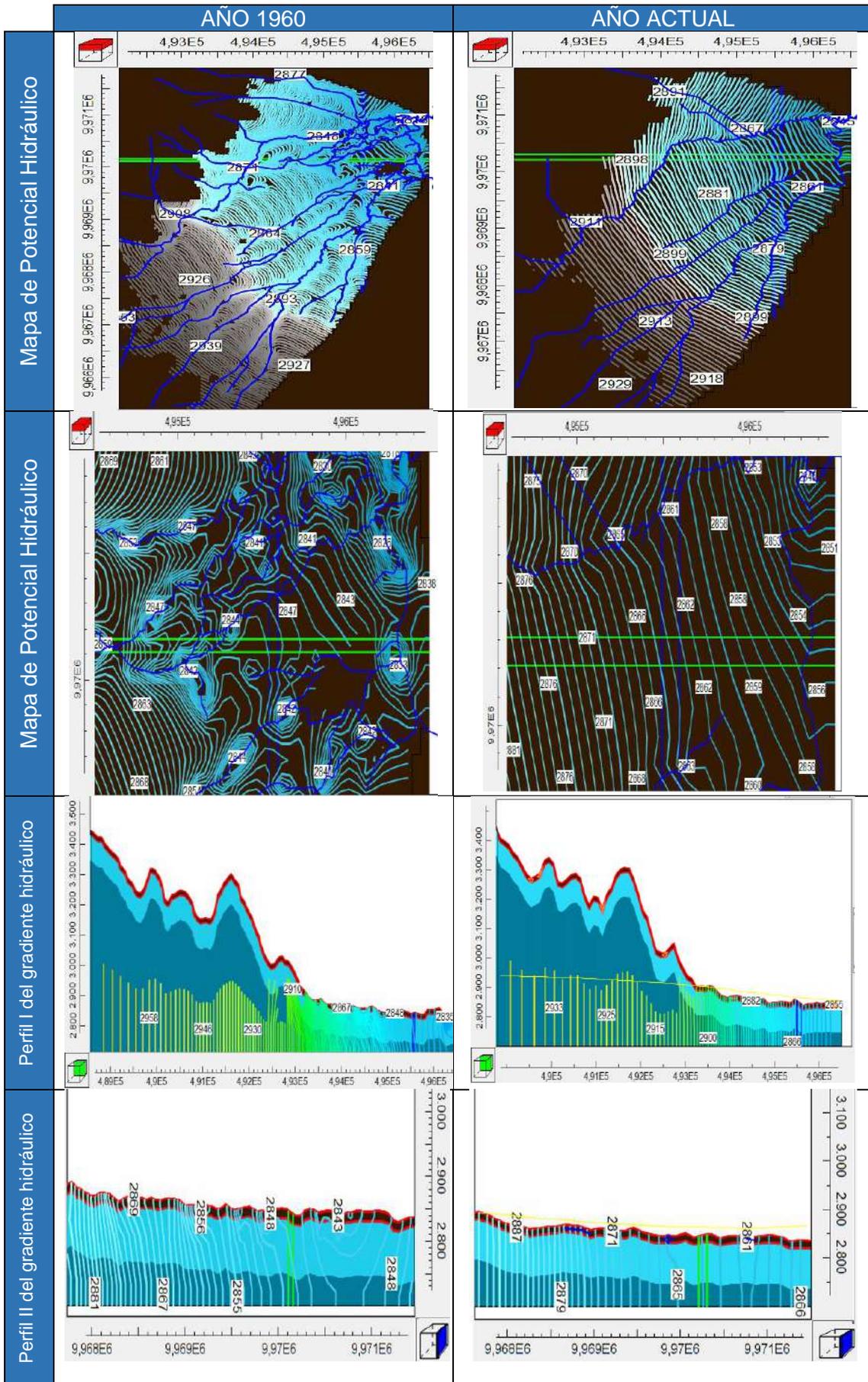


Figura 14 Comparación de las isolneas del gradiente hidráulico en la zona de estudio.

En el estudio del año 1960, se observa un mayor aporte a la recarga de las aguas subterráneas por infiltración natural (Figura 12, 13 y 14), debido a que existía una mayor área de recarga natural en la superficie, además se sumaba una recarga antrópica de agua, proveniente del regadío aplicado a los terrenos de cultivo que predominaban en las haciendas de aquel entonces, el regadío constituiría una fuente de alimentación artificial para las aguas subterráneas, que implicaría una posible saturación de agua en las capas más superiores de los suelos y por ende un incremento de potencial hidráulico, posteriormente con el tiempo se denota una ligera disminución del potencial hidráulico hasta la actualidad (Figura 12, 13 y 14), ésta descenso corresponde a la disminución del área de recarga natural debido a la impermeabilización de los suelos por las construcciones antrópicas en superficie y la eliminación de la recarga artificial; Al tener una disminución de las cargas hidráulicas en el suelo, se genera una disminución de la presión intersticial del agua en los poros y como consecuencia una compactación de los estratos que contenían el agua, lo que ha ocurrido a largo plazo.

El suelo, que como cualquier material, se deforma por variaciones de esfuerzos efectivos, que representan la diferencia esfuerzos totales (gravedad y cargas aplicadas) menos la presión de poros. En el caso de suelos saturados están ligados a los esfuerzos mencionados, en donde la presión de poros puede variar por el cambio en el nivel freático. Para el caso de suelos parcialmente saturados dependen de las variaciones del grado de saturación, mientras que para suelos secos, las deformaciones están directamente relacionados con las cargas aplicadas. Por lo tanto es importante analizar los factores que puedan estar incidiendo en los cambios del nivel freático y en la saturación de agua en el suelo.

En la actualidad el nivel freático tiene un ligero descenso de las condiciones analizadas en el año 1960, debido a la impermeabilización de las zonas de recarga superficiales, y simultáneamente existe el fenómeno de consolidación secundaria en el suelo que provoca una reducción del volumen del mismo ante un esfuerzo efectivo constante y es el resultado de la descomposición de la materia orgánica, y procesos de acomodación del esqueleto mineral por cambios físicos y químicos del suelo a largo plazo.

Este tipo de deformaciones en el suelo pueden generar daños importantes en tuberías soterradas de abastecimiento de agua potable y redes de alcantarillado provocando un dren artificial el cual dependiendo de las características que posea, éste dren actuará como influente, el cual aportará con agua al suelo o actuará como efluente, en donde el suelo drenará agua por medio de las tuberías o redes de alcantarillado, haciendo de la zona de estudio aún más compleja en el análisis de deformación del suelo, siendo necesario una investigación del estado actual de las tuberías y redes de alcantarillado que se encuentre en dicha área, considerando que la red de alcantarillado asume la evacuación de aguas negras y aguas de escorrentía, los cuales transportarían grandes cantidades de agua en épocas de alta pluviosidad, debido a que gran parte de las precipitaciones no se infiltra sino que escurre por la zona hasta su recopilación en las alcantarillas, debido a la gran impermeabilización antrópica de los suelos en superficie.

Ante estos factores que inciden en las deformaciones se suma el cambio raudo que puede generar el bombeo de agua sobre el nivel freático (Anexo 2), y su incidencia puede tener un radio de afectación relativamente grande (Figura 15).

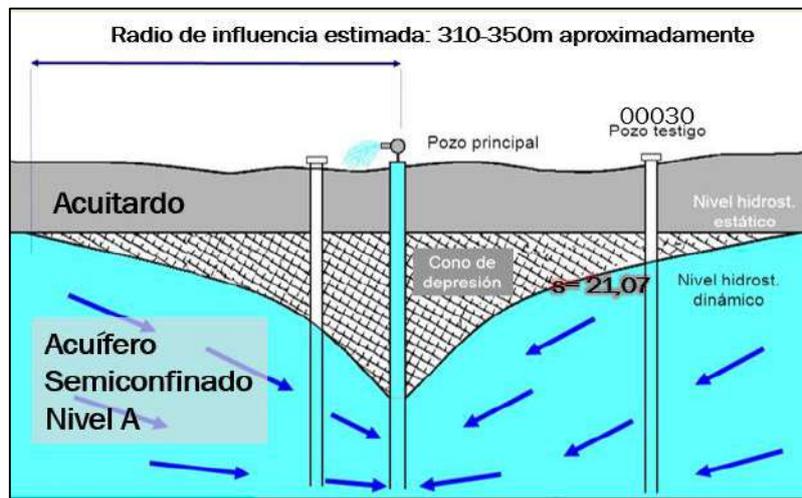
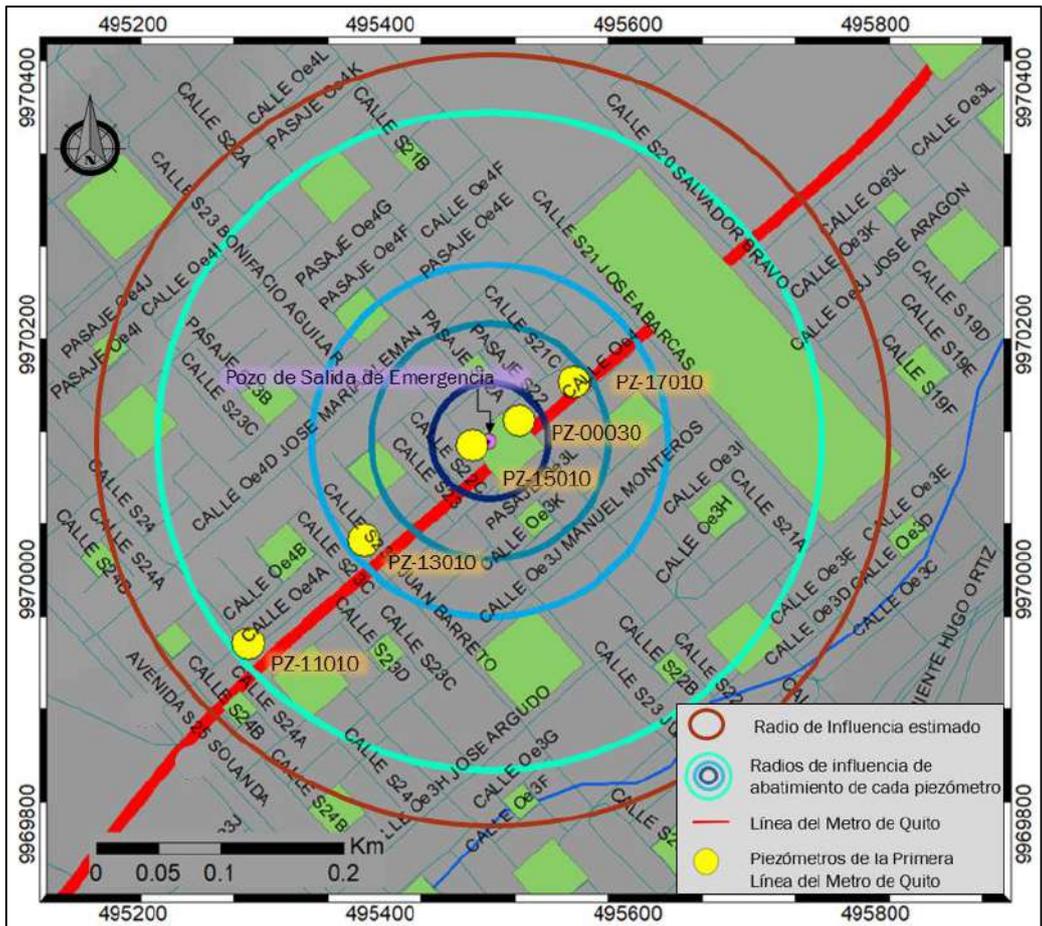


Figura 15 Radio de influencia del abatimiento del nivel freático (Eminec.ecuanor, 2018)

Los abatimientos generados en la extracción del agua en el pozo de salida de emergencia en la zona de estudio pueden ser afectados por la extracción del agua un pozo cercano, el cual tendría incidencia en el incremento del descenso del nivel freático. Los datos de abatimiento fueron obtenidos de las lecturas de los piezómetros instalados durante el proceso de la construcción de la Primera Línea del Metro de Quito (Anexo 2 y Figura 16).

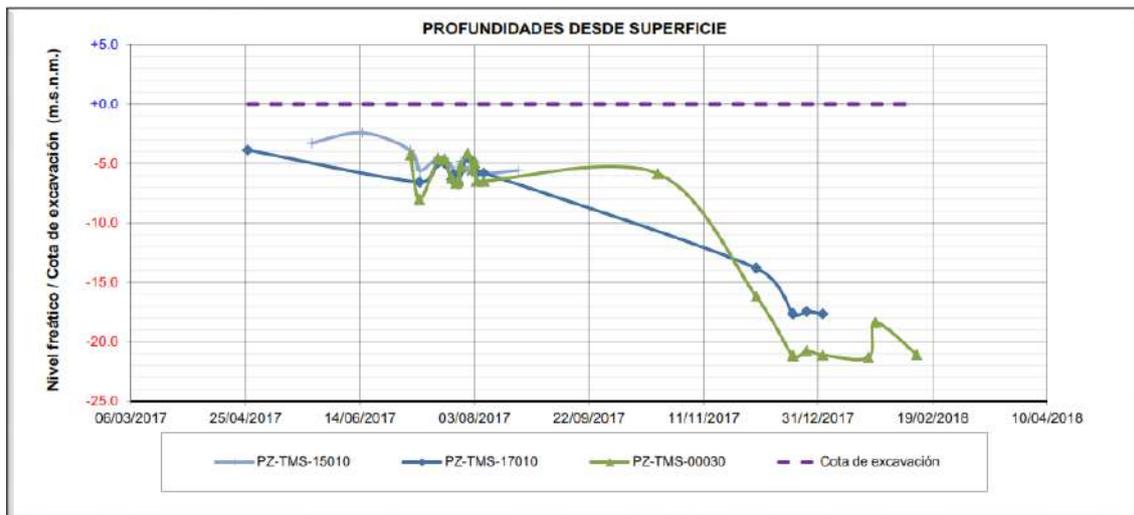


Figura 16 Gráfica de los abatimientos generados por la extracción del agua (Eminec.ecuanor, 2018)

Las deformaciones por extracción de agua se produce cuando el agua contenida en los poros, fluye a través del suelo saturado, partiendo de una condición hidrostática determinada por la posición inicial del nivel freático y hacia una condición final en donde el flujo de agua se detiene al alcanzar nuevamente el equilibrio hidrostático, en el cual se presenta un cierre gradual de los huecos que estuvieron rellenos por el fluido extraído, los estratos que contiene el agua, comienza a compactarse tan rápidamente como el agua pueda moverse.

Gran parte de la compactación se produce en el acuitardo que posee material de grano fino con estratos compresibles, y parte de este descenso no puede recuperarse con nuevos aportes de agua, lo que provoca una disminución permanente en el volumen de suelo. Un aumento de la velocidad en que se extrae agua podrá motivar un arrastre de la materia fina (matriz), o de toda aquella partícula susceptible de ser transportada por este incremento y generar daños en las estructuras por fenómenos a desarrollarse en el suelo por el efecto mencionado.

6. CONCLUSIONES

- La geología local puede establecerse como una secuencia de formaciones terciarias y cuaternarias, de origen volcánico con intercalaciones de sedimentos fluviales a aluviales. Las Formaciones terciaria comprenden a la Formación Machángara y las cuaternarias a la Formación Cangahua y los depósitos La Carolina.
- En la actualidad existe una dirección predominante SSO-NNE del flujo subterráneo, la mayor influencia en las condiciones hidrológicas provienen del flanco occidental y del valle del sur de la cuenca de Quito, los cuales controlan parte de los procesos hidrológicos de las microcuencas del Río Machángara y Río Grande, y que confluyen la zona de se unen los río principales de dichas cuencas.
- El modelo hidrogeológico conceptual, establece la presencia de un sistema de acuíferos semiconfinados superior e inferior de gran extensión, al cual sobreyace depósitos con características hidrogeológicas de acuitardo. Este modelo permite observar que Solanda, es una zona de alta sensibilidad a la modificación del sistema de aguas subterráneas, debido a las propias características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas, y por ende se necesita un mayor énfasis en el estudio y control adecuado de éstas modificaciones por influencia antrópica, que han provocado deformaciones en la superficie, que en los últimos años aparentemente se han agudizado generando daños importantes en las viviendas.
- Las zonas de relleno, donde antiguamente cursaban drenajes naturales, a más de generar terrenos inestables, pueden ser zonas localizadas donde los suelos tengan saturación de agua, y donde el flujo de aguas subterráneas aún pueda conservar rezagos de descarga que tenían de su anterior trayectoria natural.
- La disminución del nivel piezométrico debido a la impermeabilización antrópica de los suelos en superficie, genera una disminución de la presión intersticial del agua en los poros del suelo y como consecuencia una compactación de los estratos que contenían el agua, lo que ha ocurrido en Solanda en las últimas décadas.
- La compactación del suelo en los últimos años, pudo haber generado daños importantes en tuberías soterradas de abastecimiento de agua potable y redes de alcantarillado provocando un dren artificial el cual puede aportar o drenar agua del suelo, llegando a producirse erosión subterránea, por lo cual es necesario evaluar el estado actual de la red de alcantarillado y tuberías de la zona de estudio.

- El bombeo de agua puede provocar cambios abruptos en el nivel freático, provocando que los estratos que contiene el agua comiencen a compactarse tan rápidamente como el agua pueda moverse. Un aumento de la velocidad en que se extrae agua podrá motivar un arrastre de la materia fina (matriz), o de toda aquella partícula susceptible de ser transportada por este incremento y generar daños en las estructuras por fenómenos a desarrollarse en el suelo por el efecto mencionado.
- Es necesario enfatizar en estudios como pruebas de bombeo para conocer a profundidad las condiciones de permeabilidad, transmisibilidad, coeficiente de almacenamiento, espesores permeables, ya que estos parámetros permitirán entender el comportamiento hidrogeológico de dicha zona para optar soluciones para un óptimo drenaje y su distribución e integración en el medio.

7. BIBLIOGRAFÍA

Alvarado, A (1996) "Evolución Geológica Cuaternaria y Paleosismicidad de la Cuenca de Quito-Ecuador", criterios preliminares de las Formaciones en la cuenca de Quito y su evolución geológica.

Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983) Hidrología subterránea. Edit. Omega. Barcelona. 2 Tomos, 2359pp.

Eminec.ecuanor. (2018) Informe extraordinario de resultados numérico-gráfico en el tramo Morán Valverde-Solanda, PK 13+320 a 13+720

FUNEPSA (2015). Actualización de la Zonificación por Amenaza de Deslizamiento en el Distrito Metropolitano de Quito, Secretaria General de Seguridad y Gobernabilidad 246pp

Metro de Madrid. (2013). Estudio de Geología y Procedencia de Materiales

EMMAP-Q. (2012). Caracterización Hidrogeológica del Acuífero Sur de Quito.

EVREN_a. (2012). Modelo Conceptual. Estudio de Climatología, Hidrología, Hidrogeología, y Bombeo para el Proyecto Metro Quito. Entregable 1.

EVREN_b. (2012). "Modelos de Flujo Subterráneo mediante Métodos Numéricos e Impacto de Obras sobre hidráulica Subterránea". Estudio de Climatología, Hidrología, Hidrogeología, y Bombeo para el Proyecto Metro Quito. Entregable 2.