

CAPÍTULO 3. POTENCIAL PARA EL DESARROLLO DE RECURSOS HÍDRICOS

3.1. Potencial para el Desarrollo de Aguas Superficiales

3.1.1 Cuenca del Río Bogotá

Como se muestra en el Capítulo 1, la demanda de agua para el año 2000 alcanzó $2,35 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$ ($27.22 \text{ m}^3/\text{s}$), lo que equivale a un volumen anual de $857,8 \times 10^6 \text{ m}^3$. Esto es equivalente al 80% de la descarga promedio anual ($1,070 \times 10^6 \text{ m}^3$) de los ríos en la cuenca. Si se considera el flujo residual necesario o ecológico, la cantidad utilizada ya ha excedido la cantidad disponible de recursos hídricos incluso para años de flujos promedio. De acuerdo a la CAR, el flujo residual equivale al 25% del flujo promedio anual.

(1). Actualidad del Desarrollo de Aguas Superficiales

Para un uso efectivo de los recursos hídricos, en especial para aprovechar la alta descarga de los ríos durante la temporada de lluvias, se han construido un total de 9 presas y estanques de sedimentación, principalmente aguas arriba (parte norte) de la Cuenca del Río Bogotá. Ocho de esas 9 instalaciones se ubican dentro de la cuenca y la restante, el embalse de Chuza, se localiza fuera de la cuenca sobre el área de los Cerros Orientales. La localización y el tamaño de estas presas y lagunas de sedimentación se muestran en la Figura-2.311.

Las presas pueden controlar el volumen de descarga a los ríos mas no pueden solucionar el problema de escasez o carencia de descarga para satisfacer la demanda de abastecimiento. Por esta razón se implementó un proyecto para la conducción de una gran cantidad de agua desde el Embalse de Chuza, ubicado fuera de la cuenca del Río Bogotá. Durante los últimos 12 años, desde 1988 al 2000, el flujo promedio anual del embalse fue de $36,89 \times 10^9 \text{ m}^3$, excepto en 1997 cuando un accidente de gran escala ocurrió dentro del túnel de conducción de agua. Este valor es equivalente a un tercio de los recursos hídricos superficiales generados anualmente en la cuenca del Río Bogotá bajo condiciones naturales. El proyecto de conducción de agua anteriormente mencionado, alivió en gran parte el problema de escasez de agua en la cuenca. Desde entonces, no se han presentado mayores problemas de escasez de agua dentro del sector de abastecimiento excepto para la demanda de agua de uso agrícola.

Sin embargo, teniendo en cuenta la tendencia de crecimiento económico y poblacional de Bogotá y considerando el aumento en la calidad de vida de la gente, se espera que se desarrollen nuevos recursos hídricos después del año 2028. Para poder solucionar este problema, el Acueducto tiene un plan para introducir una mayor cantidad de agua desde afuera de la cuenca, expandiendo la capacidad del Sistema Chingaza y los otros sistemas.

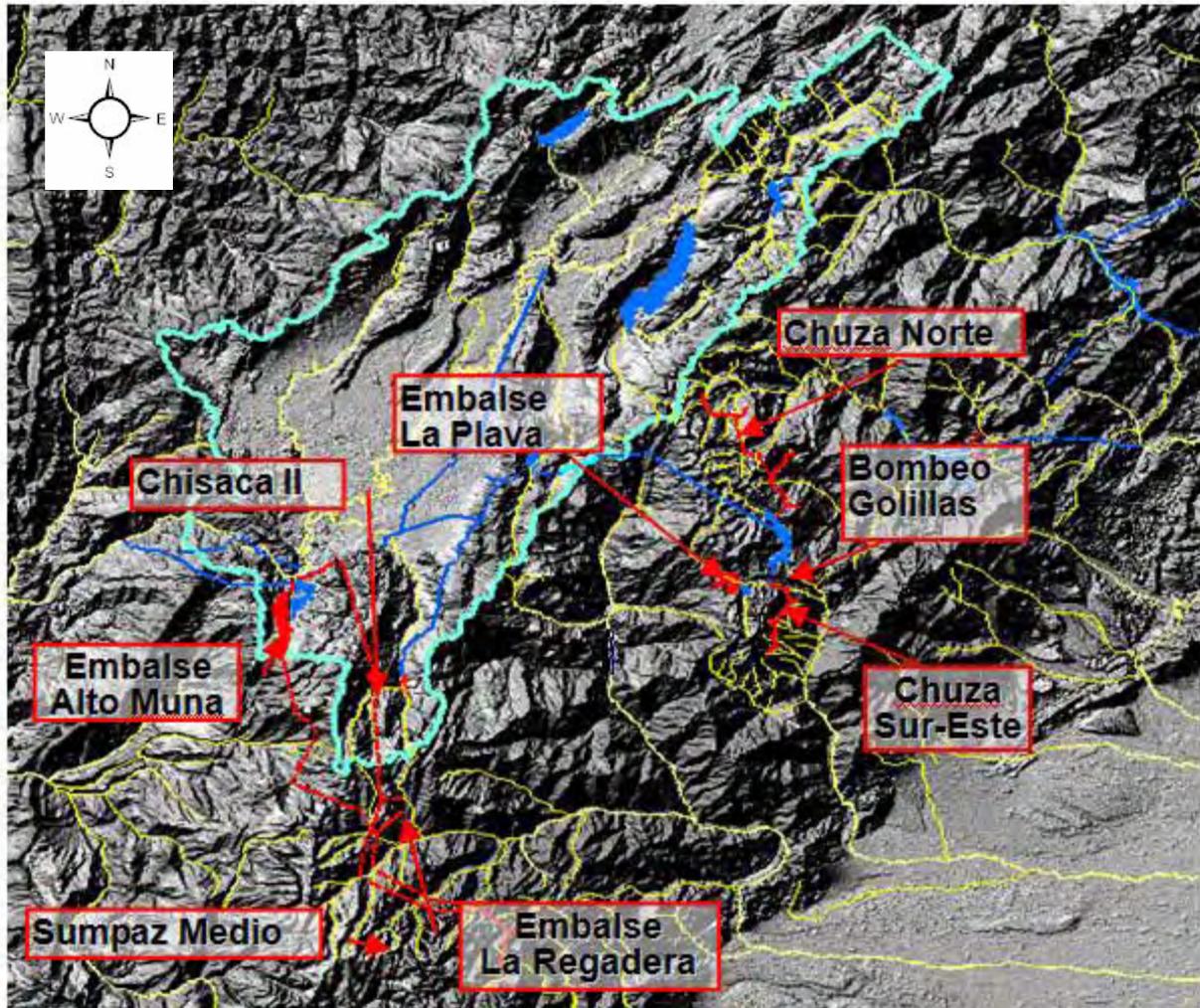


Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3- 1 Mapa de Ubicación de los Reservorios Existentes

3.1.2 Otras Cuencas de Ríos

De acuerdo al plan de expansión de abastecimiento de agua del Acueducto, se planea una expansión de las instalaciones en el área de la Represa de Chuza y en el área del Sumapaz, para garantizar el abastecimiento de agua. Los nombres y la ubicación de los proyectos se dan en la Figura-2.3-2.



Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-2 Plan de Expansión para Abastecimiento de Agua del Acueducto y Ubicación de Los Proyectos

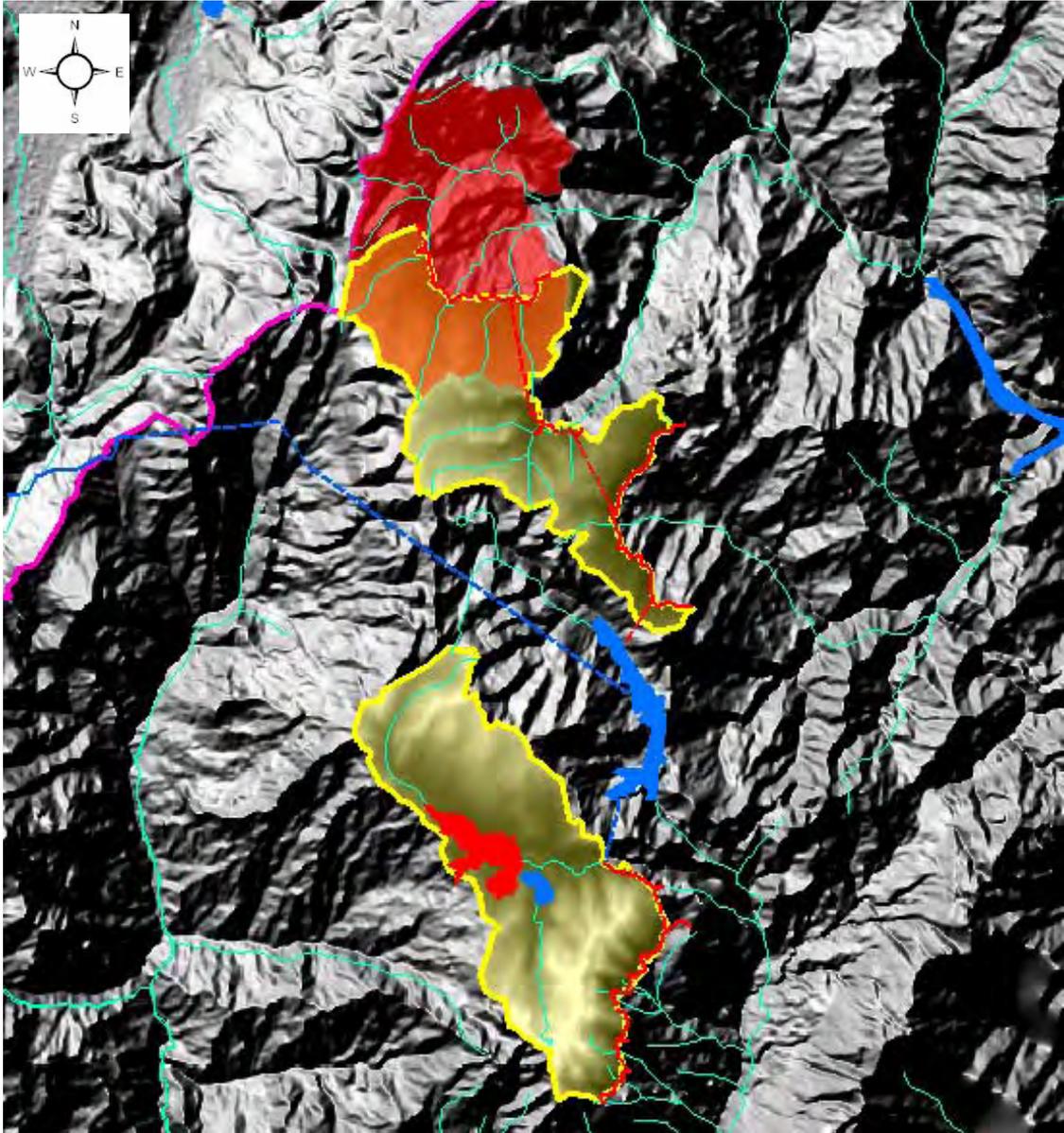
(1). Plan de Expansión de Chingaza

El área de captación en el proyecto de expansión de Chingaza se ubica completamente por fuera de la Cuenca del Río Bogotá. El plan consiste en la expansión de dos instalaciones: aumento en la capacidad existente de captación de las instalaciones al norte del Embalse de Chuza y una expansión similar en las instalaciones del sur. Las áreas de captación de ambas instalaciones se muestran en la Figura-2.3-3.

La elevación promedio del terreno en el área de captación es de 3.393 m.s.n.m y el área total es de 223 km². Los datos de descarga del río en la parte norte del sitio planeado para el proyecto fueron recolectados y examinados a través de un análisis hidrológico. El área de captación medida por la estación de medición (en rojo en la Figura-2.3-3) yace dentro del área de captación del sitio planeado para el proyecto de expansión. El código de esta estación de medición es 3506711 (Sueva-Río Blanco). Sus datos durante 28 años (de 1971 a 1998) se utilizaron para calcular la descarga específica. El valor se calculó en 38,5 l/s/km². La cantidad de agua a ser desarrollada por este proyecto de expansión, por consiguiente, se calcula de la siguiente manera:

$$223 \text{ km}^2 \times 38,5 \text{ l/sec/km}^2 = 8,5 \text{ m}^3/\text{sec}$$

De acuerdo al Plan de Expansión de Chingaza, la cantidad de agua a ser desarrollada es de 6,13 m³/s, cantidad menor al valor estimado anteriormente, lo cual hace este desarrollo posible desde el punto de vista hidrogeológico.



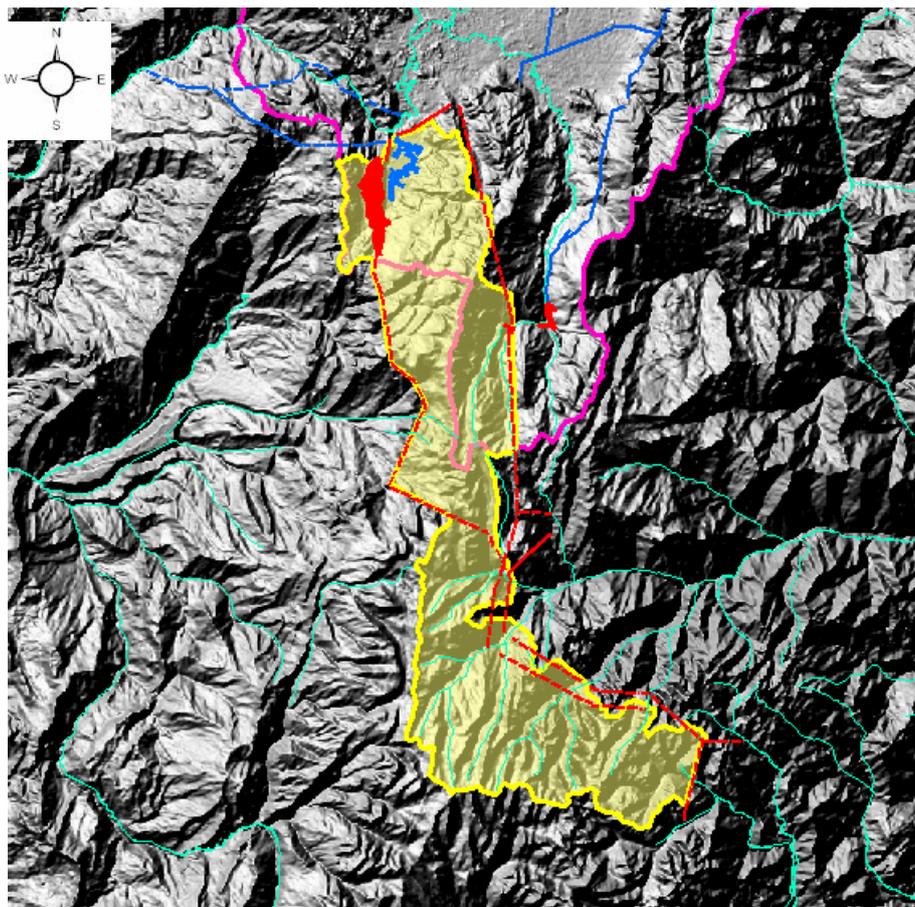
Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3- 3 Áreas de Captación Dentro del Proyecto de Expansión en el Oriente y el Área de Captación de la Estación de Medición

(2). Plan de Desarrollo en el Sumapaz

El objetivo del plan de desarrollo de recursos hídricos en el área del Sumapaz es aumentar la capacidad de abastecimiento de agua por medio del uso efectivo del agua superficial mediante la construcción de un embalse y sus respectivos canales de agua.

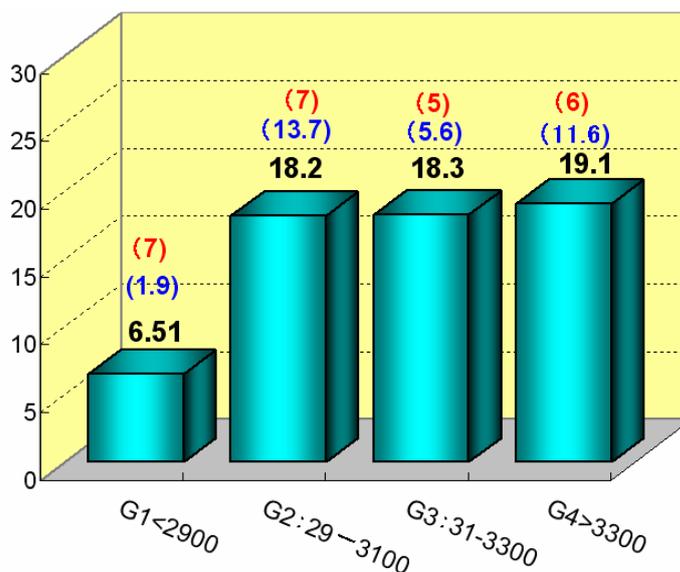
El área de captación involucrada en este proyecto se muestra en la Figura-2.3-4. Se localiza al sur de la cuenca del Río Bogotá. La mayoría de áreas de captación yacen fuera de la cuenca, excepto una pequeña parte. La elevación promedio del terreno en el área de captación es de 3.434 m.s.n.m y el área total es de 678 km². Un hecho hidrogeológico general en el área del Sumapaz es que a mayor altura se presenta una mayor precipitación. Esta relación también se puede aplicar a la Cuenca del Río Bogotá como se discutió anteriormente.



Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-4 Área de Captación Dentro del Proyecto de Expansión en el Sur

Con base en los datos recolectados en el presente Estudio JICA, se analizó la relación entre la descarga específica y la altitud como se muestra en la Figura-2.3-5.



Nota: Las figuras en negro son la descarga específica promedio para cada categoría de elevación en l/s/km², la figura en azul es la desviación estándar, la roja el número de muestras.

Fuente: Equipo del Estudio JICA.

Figura-2.3-5 Relación Entre la Descarga Específica y la Altitud

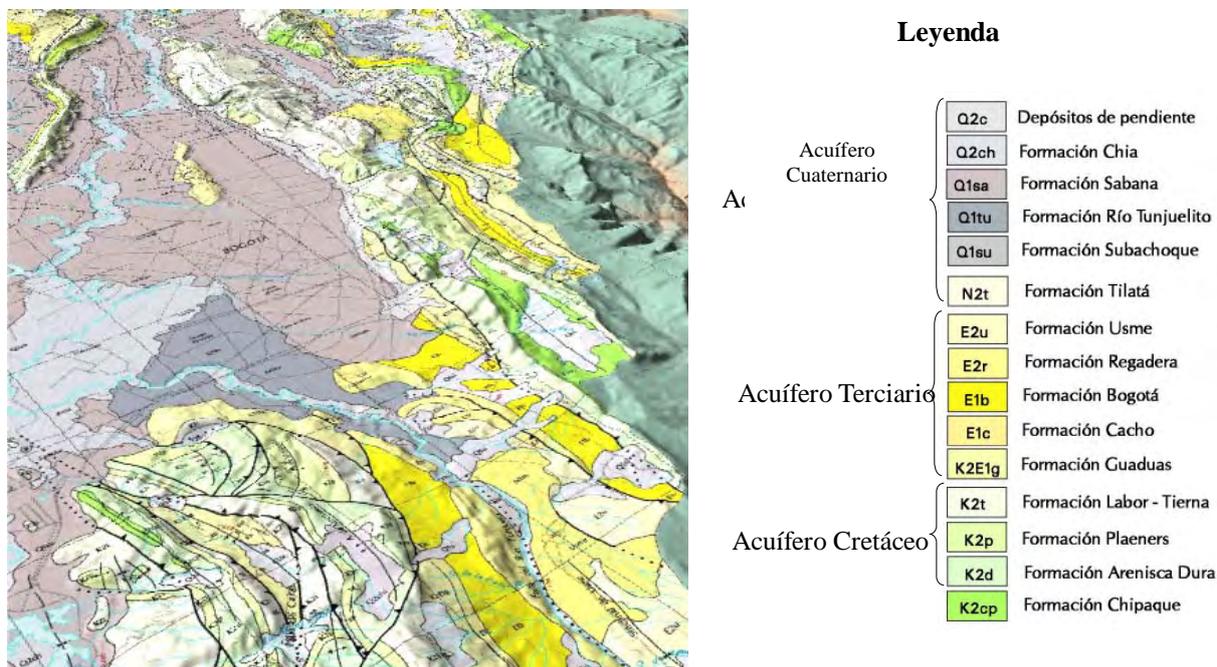
El Plan de Desarrollo en el Sumapaz fue evaluado usando la relación anterior. La cantidad de agua que podría ser desarrollada por la implementación del proyecto puede ser estimada multiplicando el área de captación por el valor de la descarga específica de la siguiente manera:

$$678 \text{ km}^2 (\text{área}) \times 19,1 \text{ l/s/km}^2 (\text{descarga específica}) = 12,95 \text{ m}^3/\text{s}$$

3. 2. Aguas Subterráneas

3.2.1. Distribución del Acuífero

De igual forma que las características topográficas dentro del Área de Estudio reflejan su geología, la distribución del acuífero también está estrechamente ligada con las características topográficas. El área de distribución del acuífero Cretáceo forma montañas empinadas generalmente. Por otro lado el área de distribución del acuífero Terciario forma piedemonte con una pequeña pendiente. En cuanto a el área de distribución del acuífero Cuaternario, ésta forma una planicie de baja altitud (Figura-2.3-6).



Fuente: INGEOMINAS arreglos por el Equipo de Estudio JICA.

Figura-2.3-6 Relación Entre la Topografía y la Distribución de los Acuíferos

El Acuífero Terciario se distribuye debajo del acuífero Cuaternario adyacente, quien lo recubre y a su vez, el acuífero Cretáceo se distribuye de forma continua debajo del acuífero Terciario. Esta relación se observa en el área montañosa.

Agua Subterránea en las Rocas (medios agrietados)

Las observaciones de campo de las pendientes de grandes excavaciones, túneles o minas, permiten caracterizar experimentalmente el flujo del agua subterránea dentro de la masa de rocas como se explicará a continuación. Estos hechos proveen sugerencias útiles acerca de las condiciones de almacenamiento local de agua subterránea en la masa de rocas, aunque el comportamiento del flujo regional puede ser a veces diferente del local.

- i) El agua subterránea fluye a lo largo de la grieta en la masa de rocas (Surgiendo de la grieta).
- ii) Algunas grietas proveen gran cantidad de agua, mientras otras no proveen cantidad alguna aunque se observan en el mismo plano de fractura y a la misma altura.
- iii) Se puede presentar una brecha entre el nivel de agua subterránea en ambos niveles de una falla, dependiendo de la permeabilidad de la falla, (ya sea para sellar un flujo o controlar la dirección del

flujo).

- iv) La zona de fractura a lo largo de la falla puede convertirse en la ruta principal de flujo de agua subterránea.
- v) El agua subterránea puede fluir fácilmente a través de una grieta abierta (grieta abierta = grieta de tensión en el sentido amplio, creada bajo condiciones de tensión).

Considerando estas características del agua subterránea en las masas de rocas del Área de Estudio, se asume el tipo de estrato y la estructura geológica con amplia capacidad de almacenamiento de agua, de la siguiente manera.

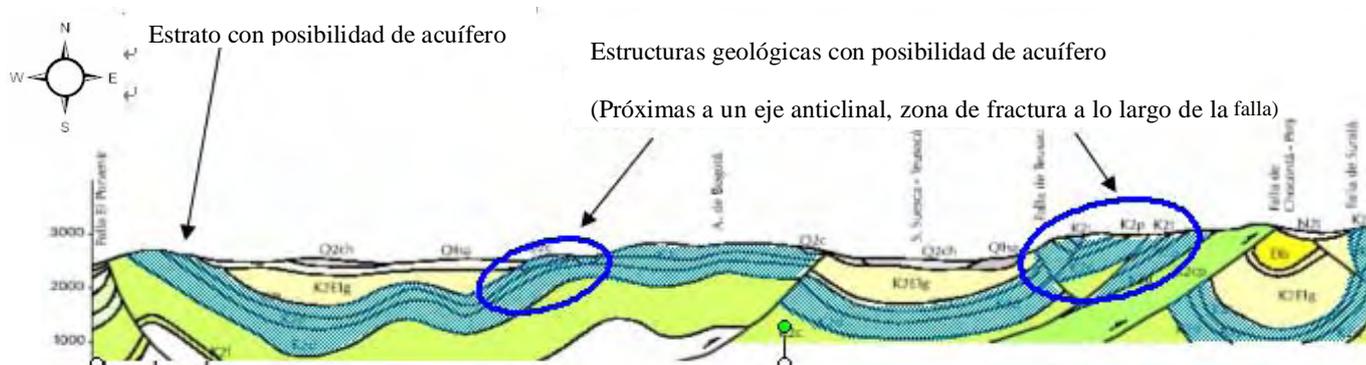
Estratos con Buenas Condiciones de Almacenamiento de Agua Subterránea

Un estrato que presente una gran cantidad de grietas, será un acuífero potencial, ya que el agua subterránea se almacena en dichas grietas. Las rocas cretácicas, agrupadas en arenisca, arcillositas, rocas de lodo, etc., se encuentran ampliamente distribuidas recorriendo el Área de Estudio. Las anticlinales y sinclinales con ejes en dirección NNE-SSW ó NE-SW se presentan repetidamente en el Área de Estudio. La arenisca es más susceptible a la formación de grietas, en caso de un movimiento estructural, dado que es más dura y frágil que las demás rocas.

Desde este punto de vista, las formaciones Arenisca Dura y Labor-Tierna pueden tener el potencial de convertirse en acuíferos dentro del Área de Estudio porque consisten principalmente de areniscas.

Estructuras Geológicas con buenas Condiciones para Almacenar Agua Subterránea

Generalmente, una zona de fractura a lo largo de una falla se conoce como la posición geotectónica donde se forman muchas grietas en una masa de rocas. Adicionalmente, una grieta abierta frecuentemente se desarrolla cerca de un eje anticlinal, lo que se considera como un excelente acuífero. Esta condición geológica es deseable para la existencia de un acuífero. Sin embargo, para que exista presencia de agua subterránea se necesita una cuenca de captación que pueda suministrar suficiente agua al acuífero. Dado que la cuenca de captación de agua subterránea (cuenca de agua subterránea) esta delimitada por la estructura hidrogeológica, el área de la cuenca de agua subterránea no es siempre la misma que la cuenca del río. Pero, a menudo ocurre que la cuenca del río es la misma cuenca de agua subterránea en zona montañosa que consiste en masa de rocas.



Fuente: INGEOMINAS.

Figura-2.3-7 Estructura Hidrogeológica del Área de Estudio

3.2.2. Muestreo Geofísico

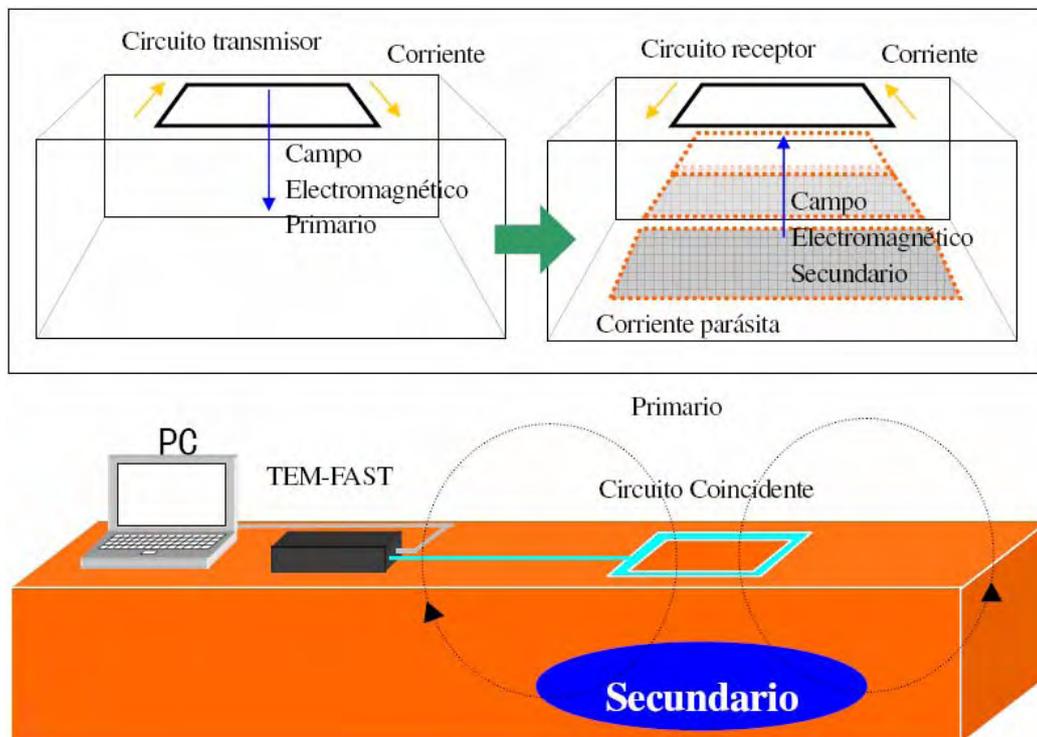
(1). Método Geofísico de Muestreo de Campo

(a) Teoría

El método TEM se empleó para el muestreo geofísico en el Área de Estudio. TEM es una técnica geofísica electromagnética (EM) que induce corrientes eléctricas en la tierra empleando la inducción electromagnética. Se crea un campo magnético de tiempo variable por medio de un circuito de alambre sobre la superficie del terreno. La Ley de inducción de Faraday establece que cambios en un campo magnético generarán un campo eléctrico, que a su vez generará una corriente eléctrica. De

esta manera, el campo magnético primario desde el circuito transmisor genera una corriente eléctrica secundaria en la tierra. Finalmente, se mide el campo magnético secundario producido por las corrientes eléctricas secundarias en la tierra.

A este método frecuentemente se le denomina como Exploración Electromagnética Transitoria (TEM) o exploración Electromagnética Tiempo-Dominio (TDEM). A este método se le denominará como TEM en el transcurso del presente estudio.



Fuente: Rowland B. French, Ph.D, R.G: Time-Domain Electromagnetic Exploration.

Figura-2.3-8 Exploración Electromagnética Tiempo-Dominio

(2). Ventajas de la técnica TEM

La técnica TEM ofrece varias ventajas frente a las técnicas tradicionales de corriente eléctrica directa (DC), técnica de resistividad y otras técnicas electromagnéticas. La TEM no requiere de un electrodo conectado a tierra, dipolos de transmisión larga, largos arreglos de electrodos, grandes generadores, ni de transmisores. La resistividad de la corriente eléctrica directa continua requiere de una larga distribución de electrodos, la cual típicamente es tres y cinco veces la profundidad de la exploración.

De esta manera, para realizar un muestreo a una profundidad de 300 metros es necesario contar con una extensión lateral de más de 900 metros. En contraste, con las técnicas TEM se puede realizar muestreos en profundidades de varios cientos de metros con un circuito transmisor de 200 metros.

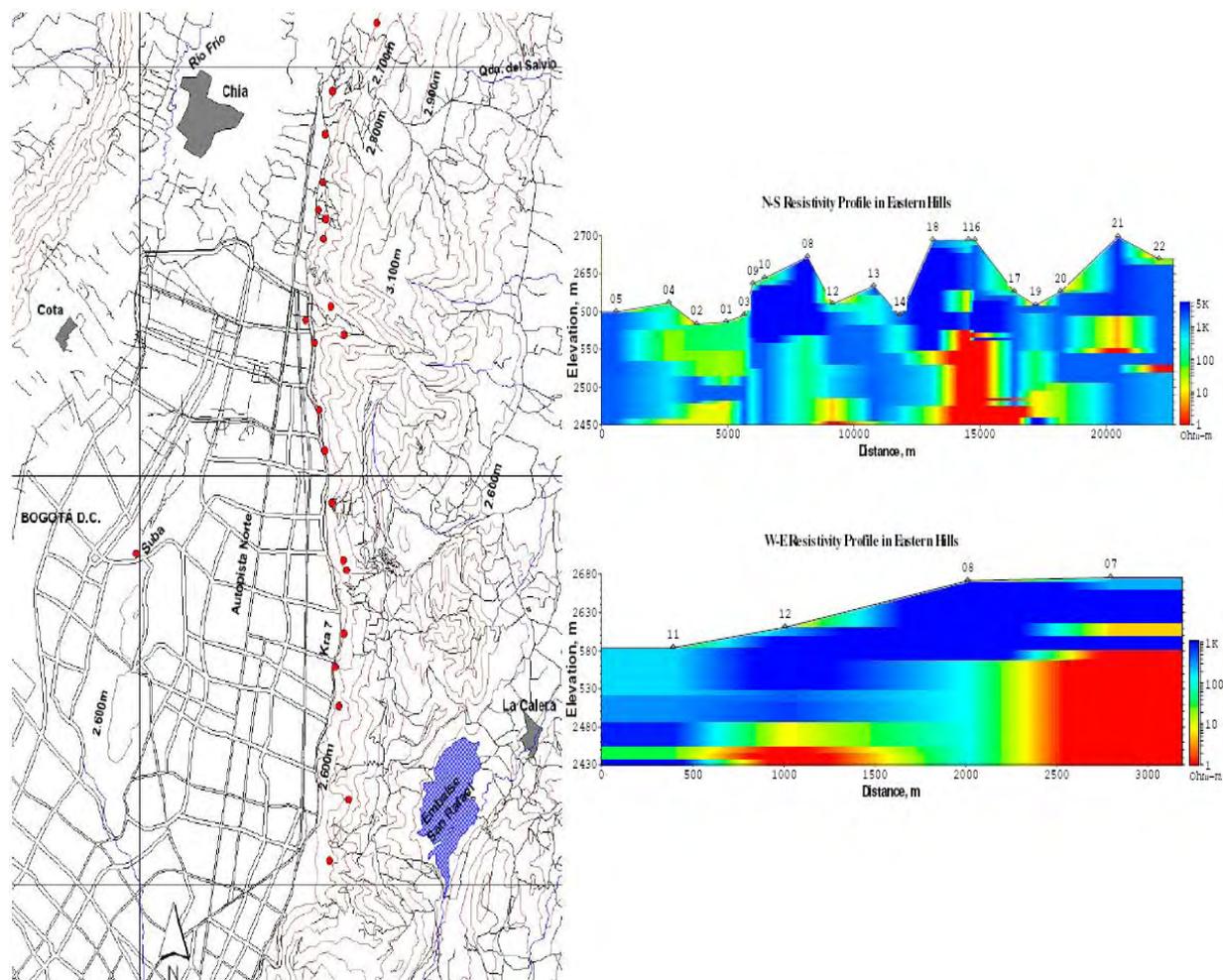
(3). Muestreo de Campo

El muestreo TEM se llevó a cabo en tres áreas: Cerros Sur, Cerros Orientales norte y Cerros Orientales sur. Los puntos del muestreo TEM se muestran en las Figuras 2.3-9 a la 2.3-11. Los puntos de muestreo TEM fueron escogidos cuidadosamente ya que la señal del muestreo se ve afectada por la red eléctrica, materiales metálicos, generadores, vehículos, tuberías, teléfonos celulares y dispositivos inalámbricos. Un instrumento utilizado en este muestreo, llamado “TEM-FAST”, utiliza un “circuito coincidente”. Esto quiere decir que un mismo circuito cuadrado es utilizado tanto como circuito receptor como circuito transmisor. En este muestreo se utilizaron tres tamaños de circuitos coincidentes; 25 m., 50 m. y 200 m.

(4). **Resultados del Muestreo**

(a) **Cerros Orientales Norte**

El muestreo TEM se realizó en 22 puntos ubicados en los Cerros Orientales. En la ladera de los Cerros Orientales se encuentran ubicadas lujosas mansiones y canteras de excavación. Los muestreos TEM se realizaron en pastizales o en canteras. La mayoría de los puntos en los Cerros Orientales han sido interpretados como un modelo de dos capas de resistividad que consisten de una primera capa de alta resistividad y una segunda de baja resistividad.

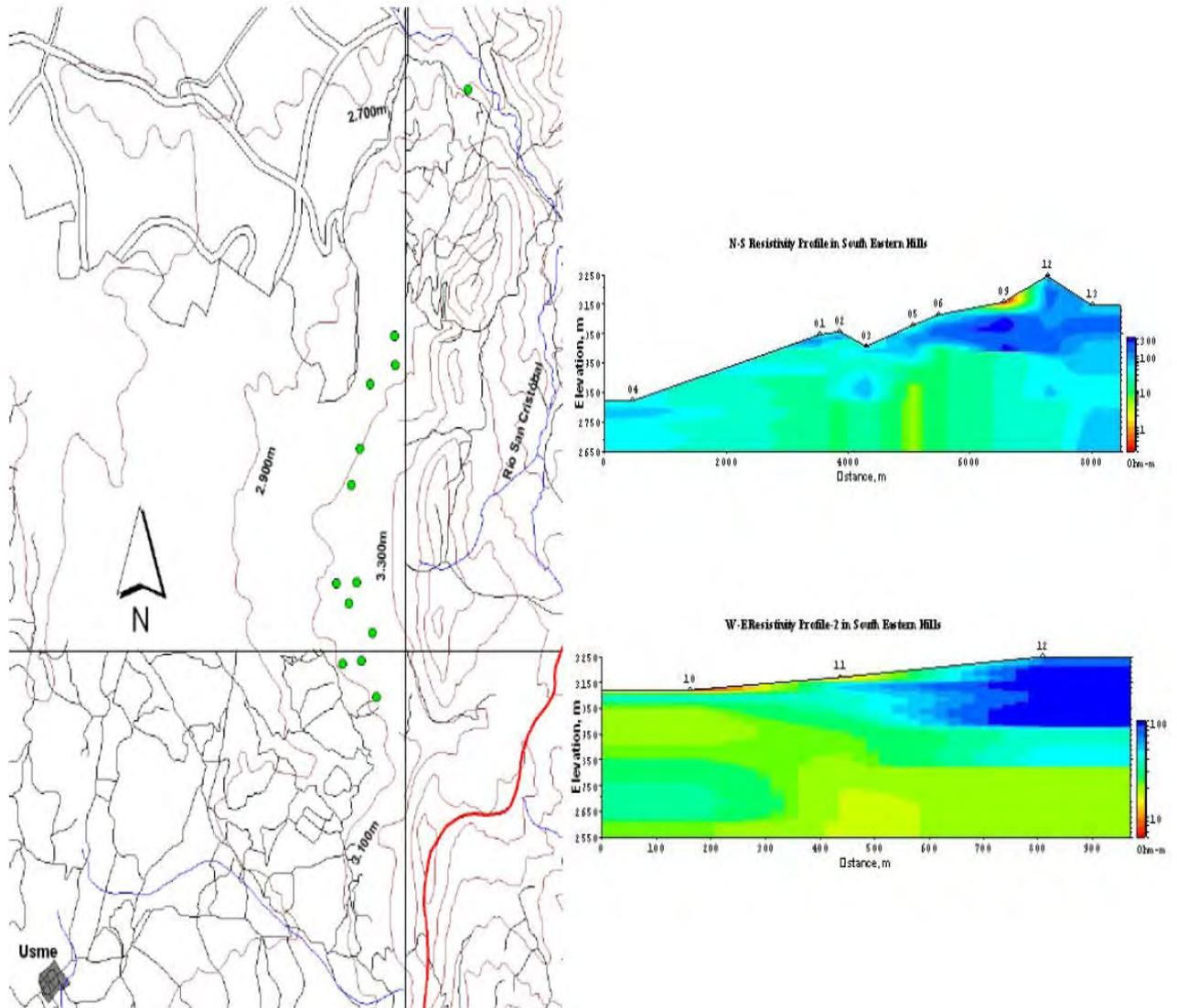


Fuente: Equipo de Estudio JICA.

Figura-2.3-9 Puntos del Muestreo TEM y Resultados Analizados en los Cerros Orientales

(b) **Cerros Orientales Sur**

El muestreo TEM se realizó en 13 puntos de los Cerros Orientales Sur, en áreas de matorrales ubicadas en la ladera de los cerros. La mayoría de los puntos de muestreo en el sur de los Cerros Orientales muestran un modelo de dos capas que consiste de una primera capa de alta resistividad y una segunda de baja resistividad. Generalmente, la primera capa en los puntos de muestreo situados a mayores altitudes, exhiben resistividades más altas y mayor espesor. Por otro lado, la primera capa de los puntos de muestreo ubicados a baja altitud no presenta altas resistividades, cosa que contrasta con lo encontrado en lugares ubicados a alta altitud.

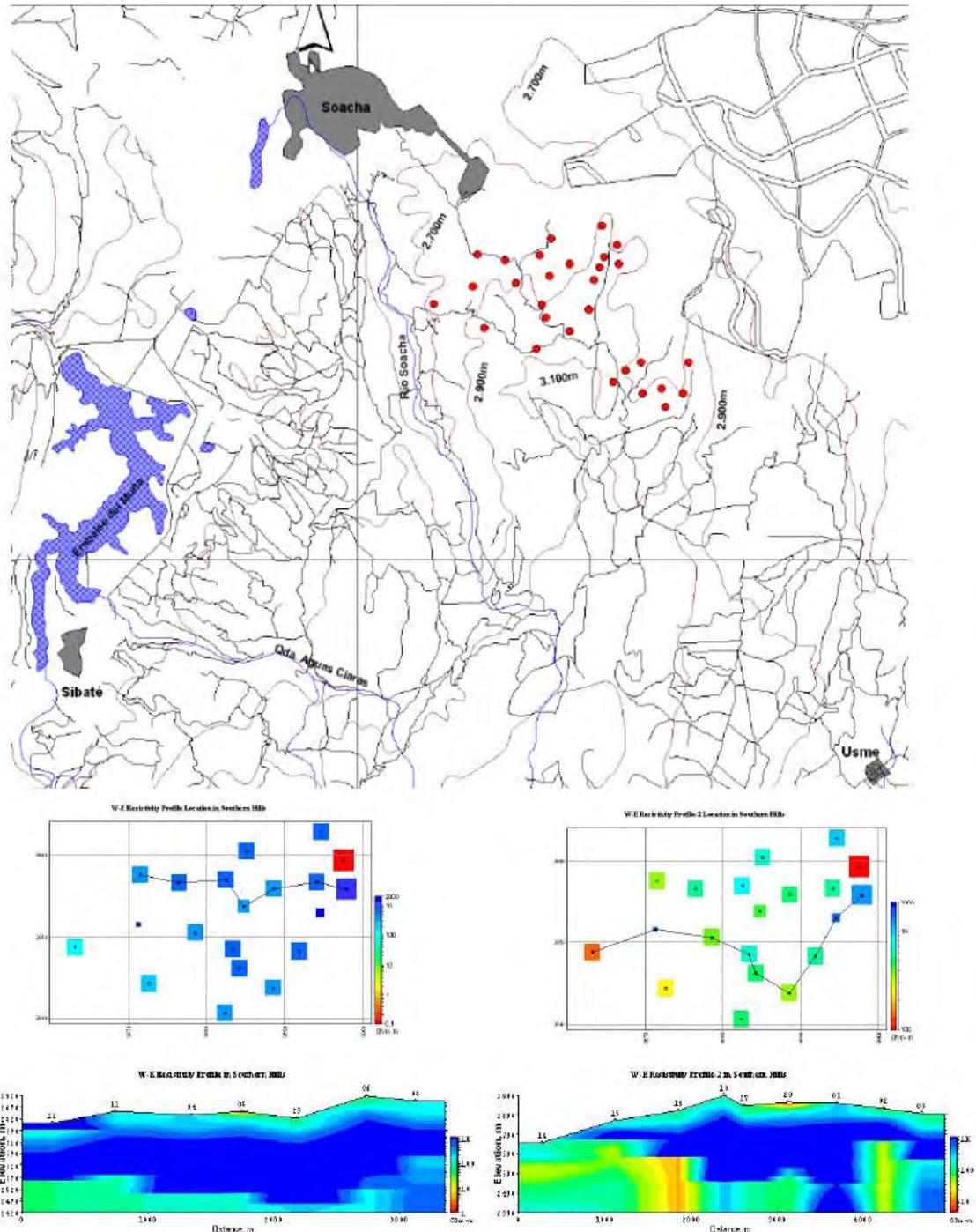


Fuente: Equipo de Estudio JICA.

Figura-2.3-10 Puntos del Muestreo TEM y Resultados Analizados en el Sur de los Cerros Orientales (cerca de Usme)

(c) Cerros Sur

El muestreo TEM se realizó en 29 puntos en los Cerros del Sur. El uso de los terrenos ubicados en esta zona de la ciudad se puede clasificar en dos partes. En la ladera norte de los Cerros se encuentran asentamientos humanos y gran parte de las zonas altas se emplean como pastizales. Los muestreos TEM se realizaron en estas áreas de pastizales. La mayoría de los puntos de muestreo en los Cerros del Sur muestran un modelo de dos capas que consiste de una primera capa de alta resistividad y una segunda de baja resistividad. La primera capa exhibe una resistividad muy alta, más de 1.000 Ωm , y su espesor supera los 100 metros. La segunda capa exhibe una baja resistividad menor a 10 Ωm .



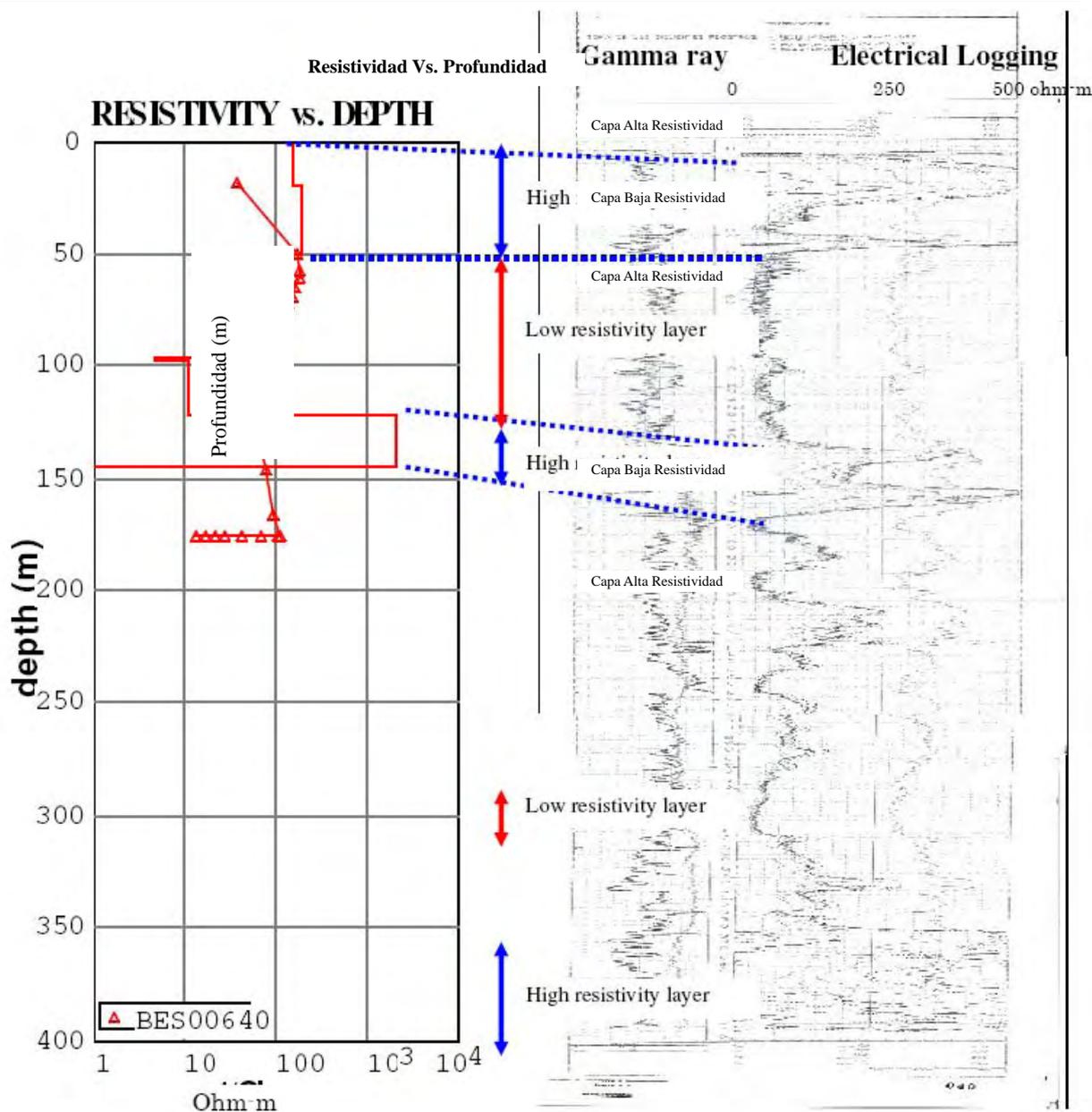
Fuente: Equipo de Estudio JICA.

Figura-2.3-11 Puntos del Muestreo TEM y Resultados Analizados en los Cerros Sur (Cerca a Usme)

(5). Interpretación

(a) Comparación de TEM con los Datos Registrados de un Pozo

El muestreo TEM se condujo en el pozo de exploración de Suba, perforado en el Estudio anterior de JICA. Los resultados del muestreo TEM fueron referenciados con el registro eléctrico para su calibración. La Figura-2.3-12 muestra el modelo analizado como resultado del muestreo TEM en el punto No. 6, cerca del pozo de exploración en Suba.



Fuente: Equipo de Estudio JICA.

Figura-2.3-12 Resultados del Muestreo TEM en el Punto No. 6

Las zonas de alta resistividad corresponden al acuífero principal en el Área de Estudio, donde domina la capa de areniscas de la Formación Cretáceo Guadalupe, representada en la sección derecha de la Figura-2.3-12. Las zonas de baja resistividad corresponden a las capas impermeables de confinamiento, constituidas principalmente por capas arcillosas de la Formación Cretáceo Guadalupe.

El método TEM no arrojó resultados sobre la estructura de resistividad a profundidades mayores de 150 m en este lugar de muestreo. Esto está relacionado con la aparición de ruido eléctrico proveniente de líneas de alto voltaje que rodean el lugar de muestreo cerca del pozo. La estructura de la resistividad hasta una profundidad de 150 m se ajusta al registro eléctrico proveniente del pozo exploratorio.

En el Área de Estudio, las capas de arenisca de la Formación Guadalupe se podrían identificar como un acuífero de alta resistividad. Por otro lado, las capas arcillosas de la Formación Guadalupe se podrían identificar como capas de confinamiento de baja resistividad.

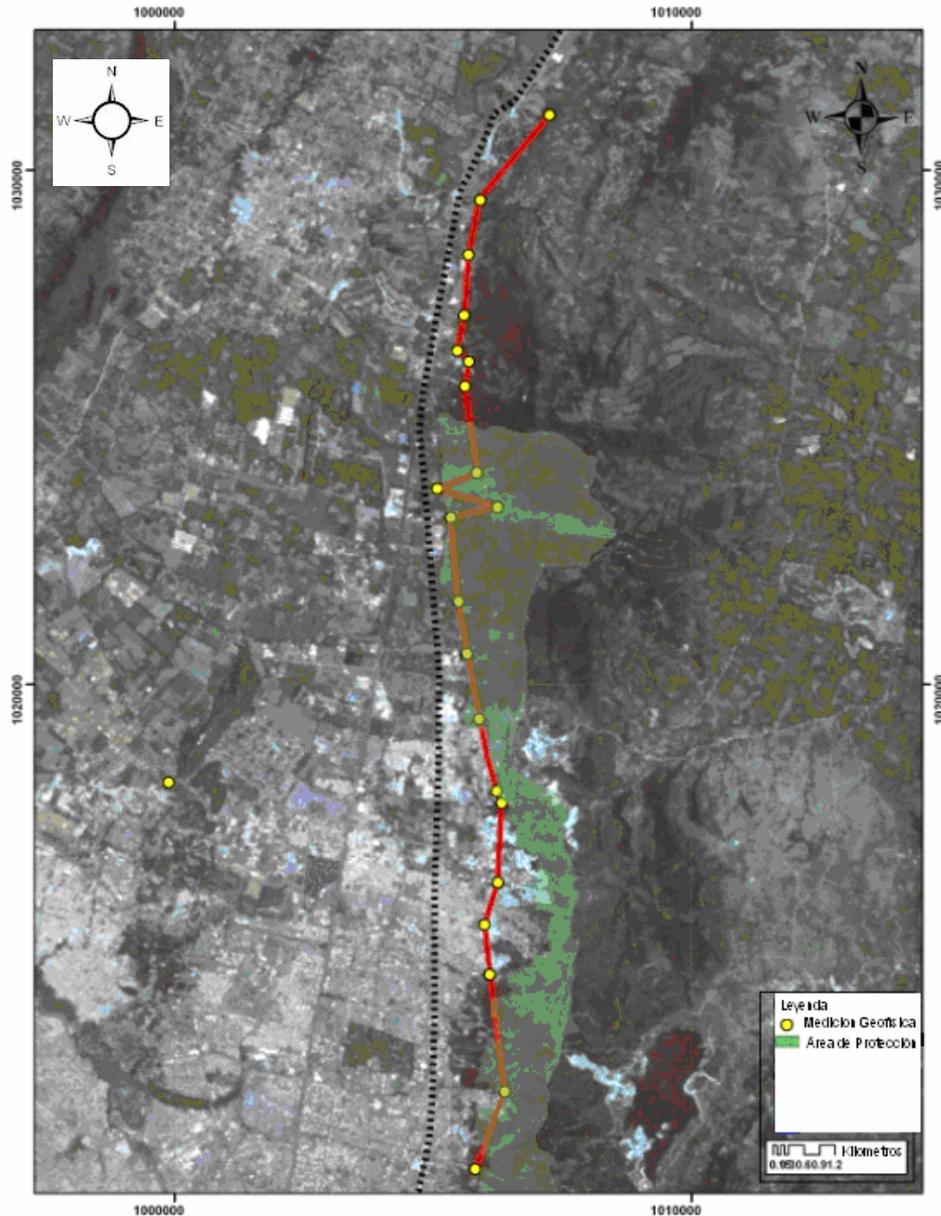
(6). Interpretación de la Distribución del Acuífero

De acuerdo al análisis TEM y desde el punto de vista hidrogeológico, Los Cerros Orientales y Sur fueron clasificados usando los siguientes criterios:

Estrato con receptividad eléctrica mayor a $100\Omega\text{m}$ → Arenisca, con posibilidad de Acuífero

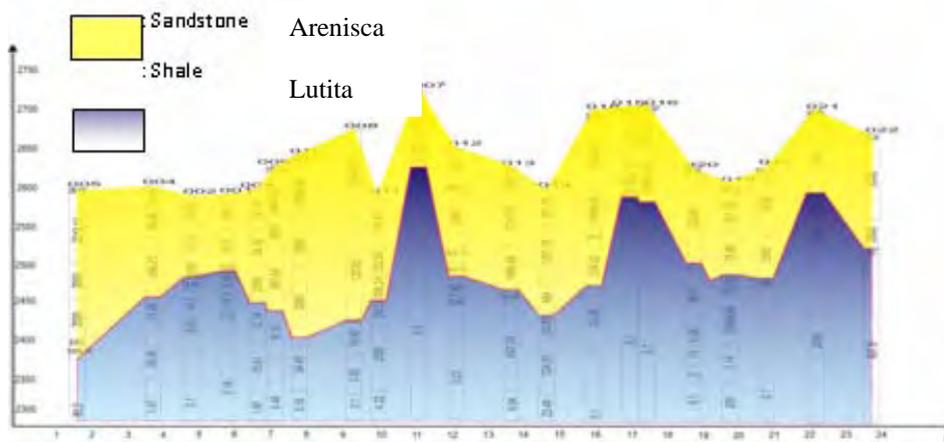
Estrato con receptividad eléctrica menor a $100\Omega\text{m}$ → Lutita, con posibilidad de Acuiclusa

En el área de estudio, la arenisca y lutita hacen una complicada alternación. Interpretando los resultados del TEM, los estratos de los Cerros Orientales y Sur fueron simplificados y clasificados en dos estratos dominantes, i) arenisca dominante y ii) lutita dominante. Los resultados de esta interpretación se muestran en las Figuras-2.3-13 a la 2.3-16.



(a) Mapa de Ubicación de la Exploración Geofísica (Cerros Orientales)

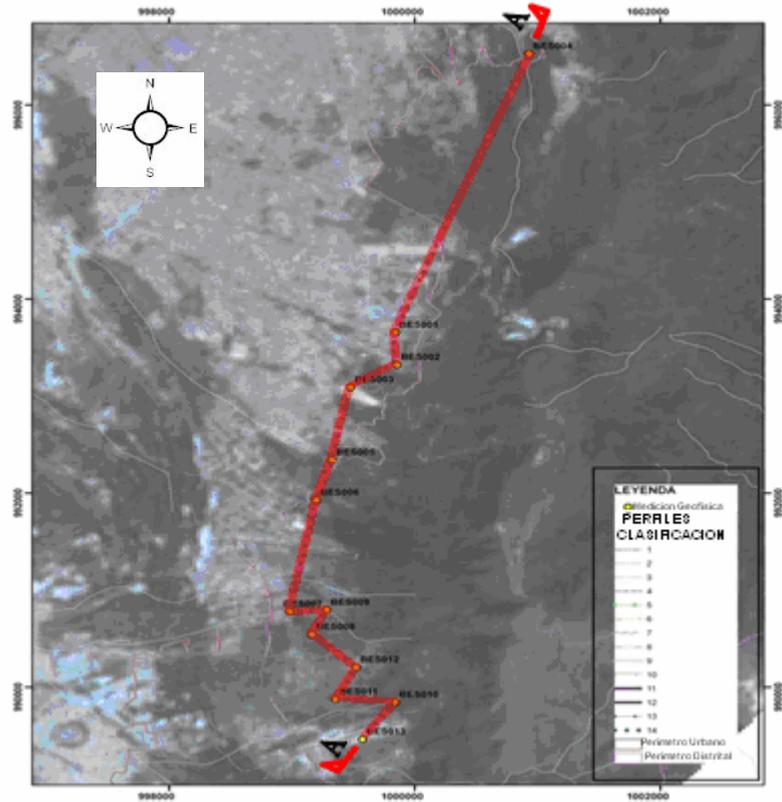
Leyenda



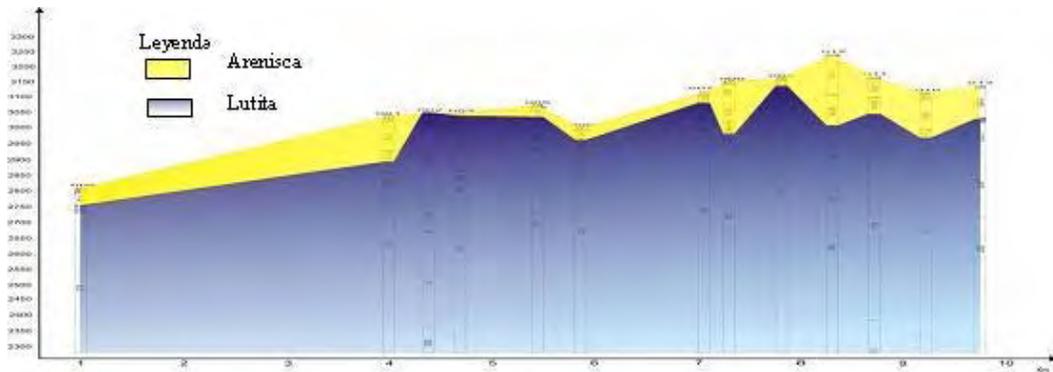
(b) Sección Geológica Interpretada

Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-13 Interpretación del Resultado TEM (Cerros Orientales)



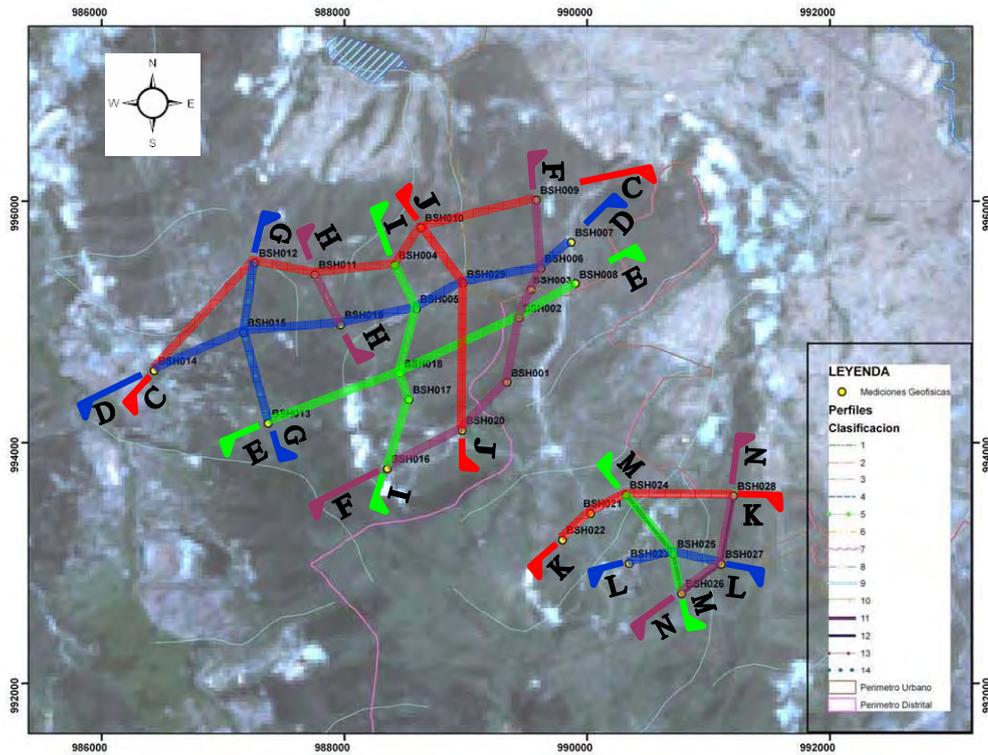
(a) Mapa de Ubicación de la Exploración Geofísica (Usme)



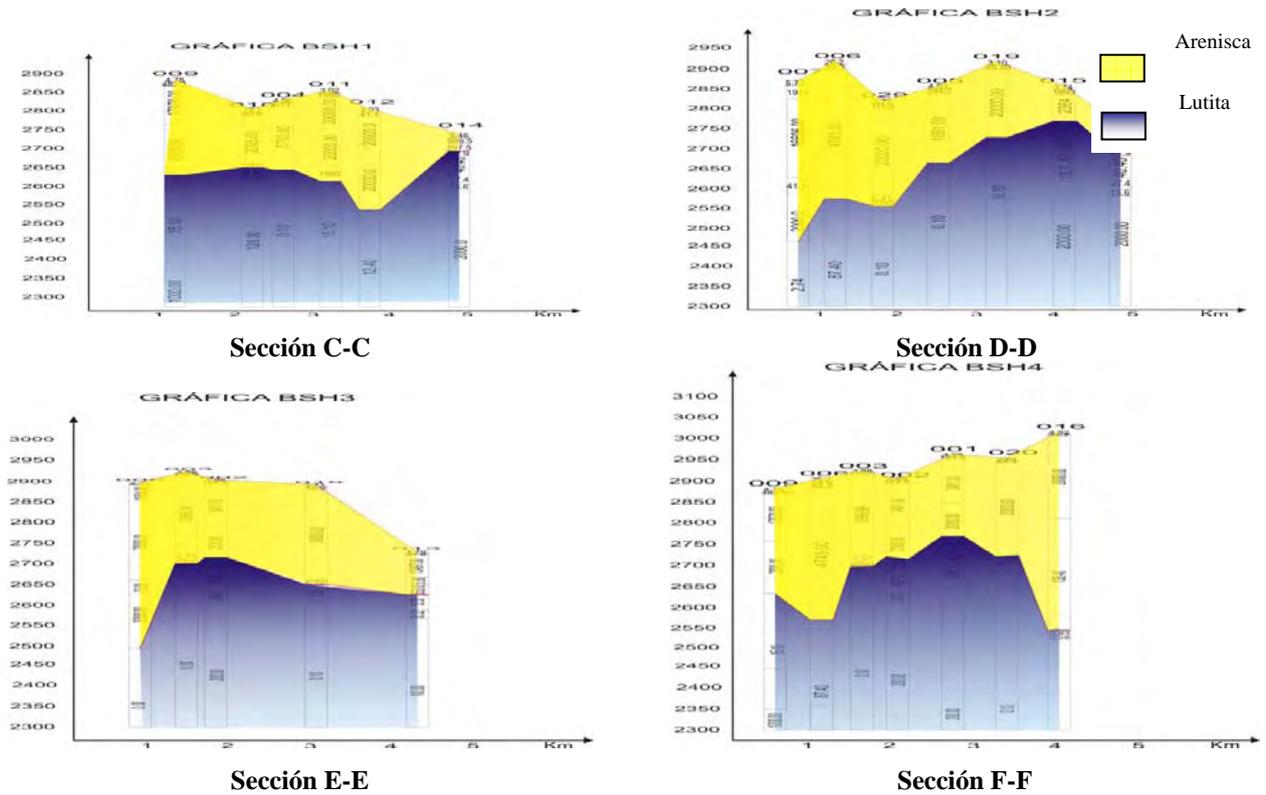
(b) Sección Geológica Interpretada

Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-14 Interpretación del Resultado TEM (Usme)



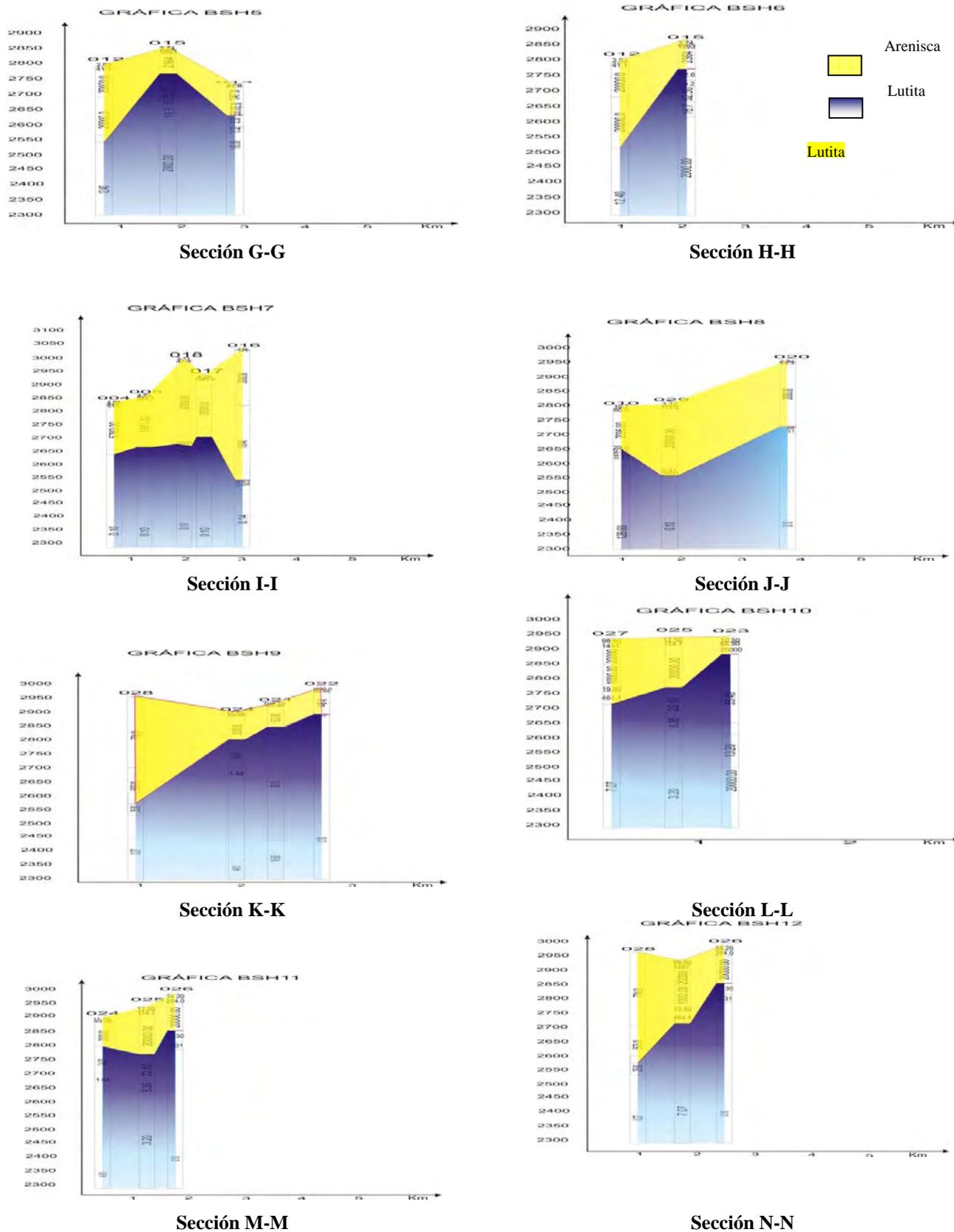
(a) Mapa de Ubicación de la Exploración Geofísica (Cerro Sur)



(b) Sección Geológica Interpretada

Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-15 (1) Interpretación del Resultado TEM (Cerros Sur) (1)



(c) Sección Geológica Interpretada

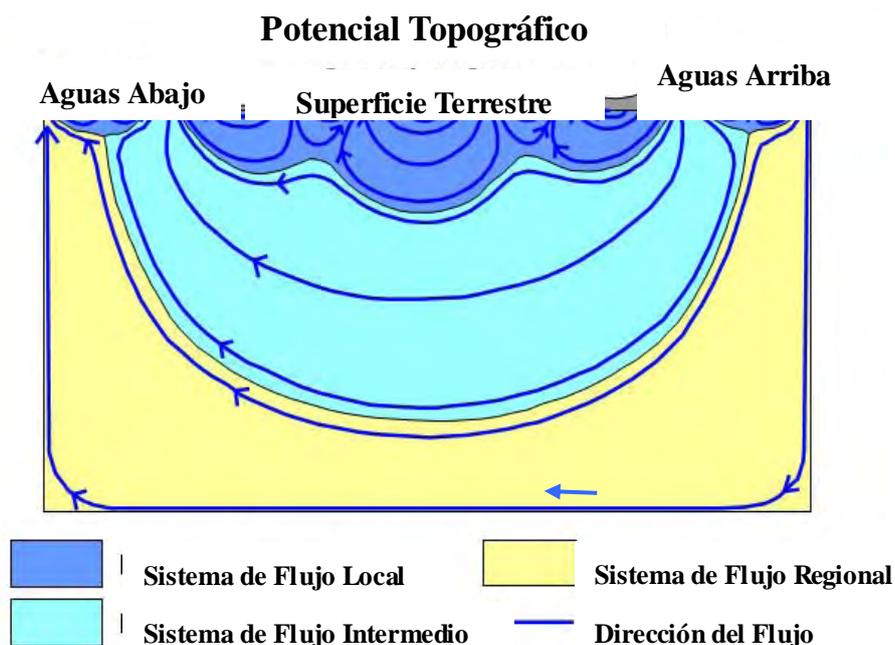
Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-15(2) Interpretación del Resultado TEM (Cerros Sur) (2)

3.2.3. Potencial de Desarrollo de Agua Subterránea

(1). Sistema de Flujo de Agua Subterránea

Dada la discusión actual sobre la ausencia de recarga subterránea en la Cuenca del Río Bogotá, es necesario aclarar el concepto básico del sistema de flujo de agua subterránea, antes de comenzar la discusión de recarga subterránea y su cantidad de almacenamiento. Es bien sabido que el agua fluye desde una elevación mayor a una menor, o desde un punto de mayor cabeza/potencial a uno de menor cabeza/potencial. La Figura-2.3-16 representa una imagen esquemática de un sistema de flujo de agua subterránea típico, el cual aparece en muchos libros de texto sobre aguas subterráneas. En esta Figura, los componentes de flujo de agua subterránea en una región (área grande que cubre varias cuencas) se dividen en tres sistemas principales: flujo regional, flujo intermedio y flujo local.

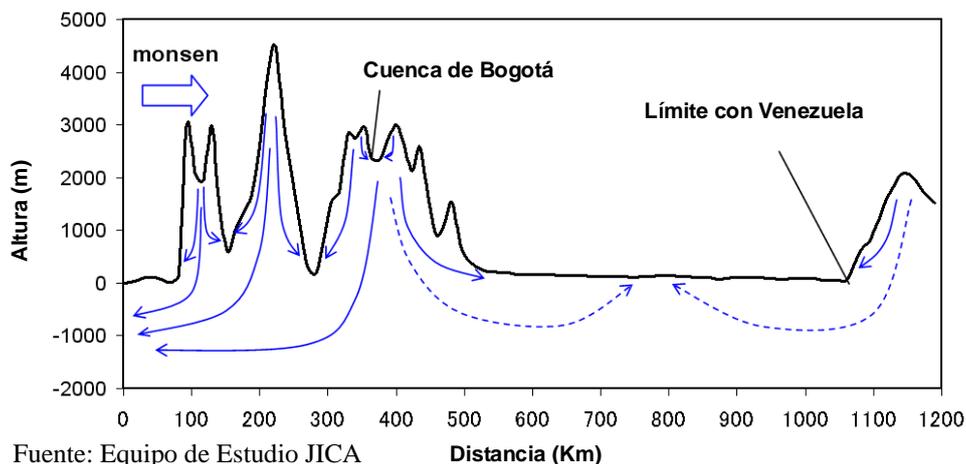


Fuente: Toth, 1963

Figura-2.3-16 Concepto Básico del Flujo de Agua en un Sistema Subterráneo

La Figura-2.3-17 muestra un corte transversal del terreno desde el Océano Pacífico en el occidente hasta Venezuela en el oriente; atravesando la cuenca del Río Bogotá. Cuando se compara con la ilustración de un sistema de flujo generalizado de agua subterránea (Figura-2.3-16), se identifica un “sistema de flujo local” en la cuenca del Río Bogotá compuesto por un flujo que se mueve hacia abajo, desde las áreas montañosas a la sabana. Igualmente se reconoce un “sistema de flujo intermedio” compuesto por un flujo que se mueve desde los Andes hacia los ríos adyacentes en el occidente y hacia la inmensa planicie del oriente. Finalmente el “sistema de flujo regional” esta compuesto por aquel flujo que se mueve hacia el Océano Pacífico desde la cuenca del Río Bogotá.

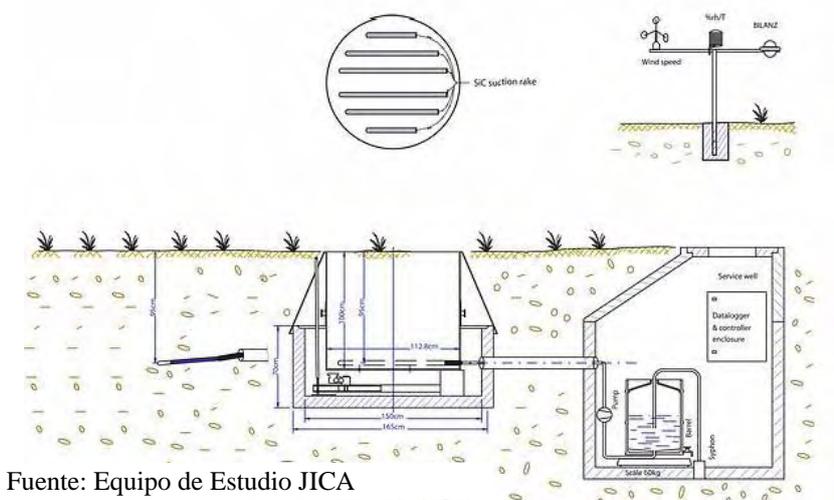
Mientras que el nivel freático de aguas subterráneas en la cuenca del Río Bogotá sea mayor que la de sus áreas circundantes, este sistema de flujo se sostendrá. Esto a su vez indica que si no hubiera recarga subterránea en la cuenca del Río Bogotá, los niveles de aguas subterráneas estarían en constante decrecimiento. Con base en esto, es claro que la discusión no es sobre la existencia de recarga subterránea en la cuenca del Río Bogotá sino más bien, que tan grande es este valor.



Fuente: Equipo de Estudio JICA
Figura-2.3-17 Sistema de Flujo de Agua Subterránea en la Cuenca del Río Bogotá y su Área Circundante

(2). Medición de la Recarga Subterránea

El método más confiable para estimar la recarga subterránea es la medición directa de los niveles de agua subterránea. Existen varios métodos para hacer esto, siendo el método del lisímetro el más común. Los datos del monitoreo de la elevación del nivel freático también proveen información importante para complementar los resultados del método del lisímetro. El medidor de tensión no mide directamente la recarga subterránea, pero sí mide la dirección del flujo del agua subterránea, lo que se puede utilizar para estimar la recarga. Algunos institutos de investigación en agricultura han comenzado a medir directamente la recarga por precipitación en las capas del suelo. Sin embargo, la medición solo ha comenzado recientemente y tomará un tiempo antes de tener datos disponibles.



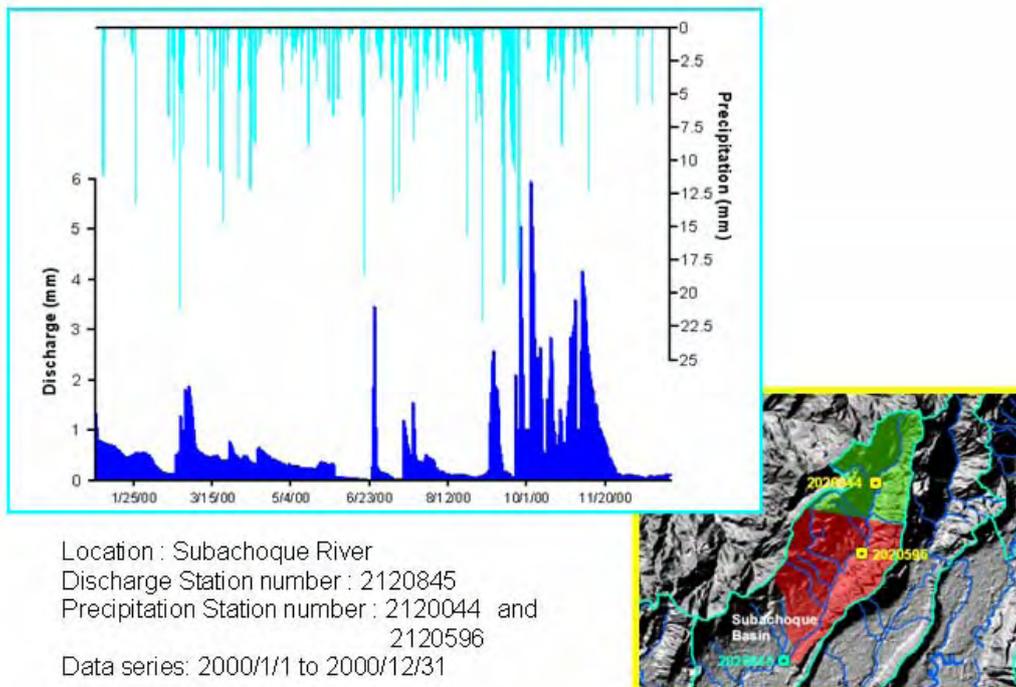
Fuente: Equipo de Estudio JICA
Figura-2.3-18 Esquema de la Medición de Recarga Subterránea Utilizando un Lisímetro

(3). Análisis por el Modelo de Tanque

El modelo del tanque, originalmente desarrollado para análisis de escorrentía, puede ser usado también para estimar la cantidad de recarga subterránea. Sin embargo, una buena estimación requiere un monitoreo de los niveles de agua subterránea. Si no se cuenta con estos datos, la exactitud de la estimación bajará inevitablemente. Aun así es posible conducir una simulación de escorrentía para estimar la cantidad de escorrentía directa, el flujo base y la infiltración al agua subterránea profunda.

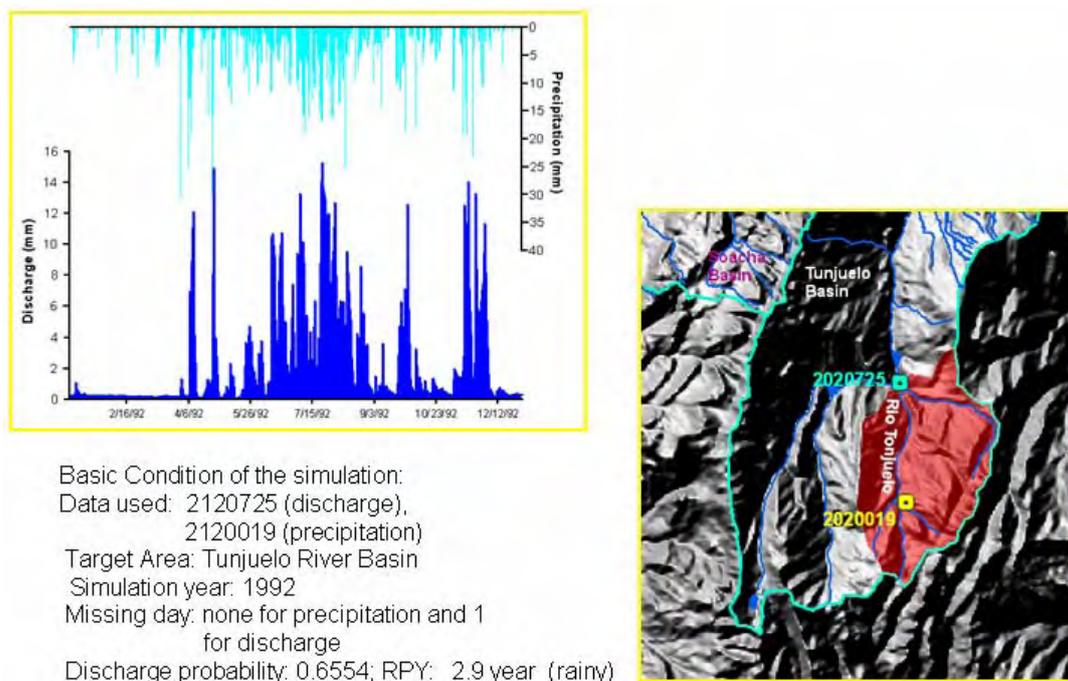
Cuando se conduce un análisis por el modelo de tanque, se requiere que la precipitación y la descarga del río tengan patrones de correlación positivos. En casos como el de la Figura-2.3-19, donde la precipitación es alta y la correspondiente descarga del río es pequeña ó vice-versa, no se puede utilizar el modelo de tanque.

Contrario a la Figura-2.3-19, la Figura-2.3-20 muestra una buena correlación de los picos tanto para precipitación como para descarga del río. Aprovechando esta relación se creó un modelo de tanque diseñado con tres tanques en serie, para examinar el proceso de generación de escorrentía. Los resultados de esta simulación (presentados en la Figura-2.3-21) son los siguientes: para una precipitación de 1.258 mm; escorrentía directa = 215 mm (17%), flujo base = 575 mm (46%), evapotranspiración = 330 mm (26%) e infiltración profunda al agua subterránea = 153 mm (12%).



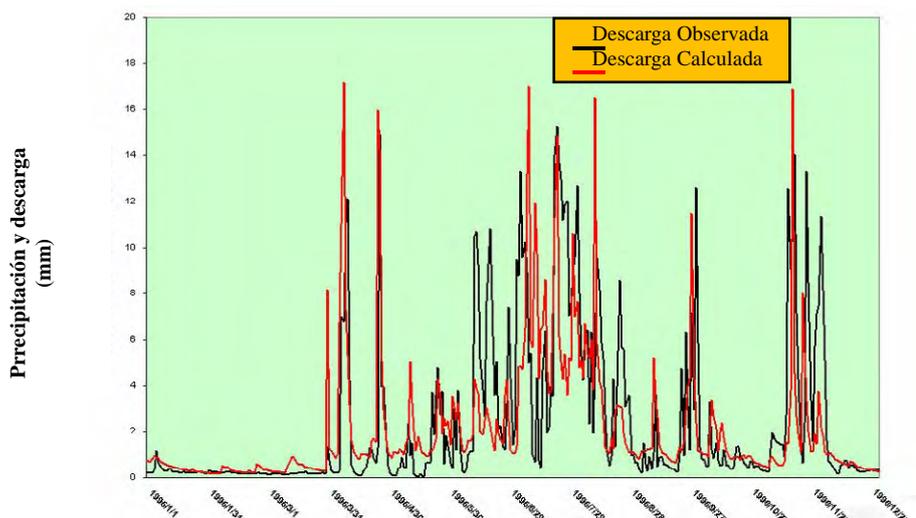
Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-19 Ejemplo de Datos No-correlacionados de Precipitación y Descarga



Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-20 Ejemplo de Datos Correlacionados de Precipitación y Descarga

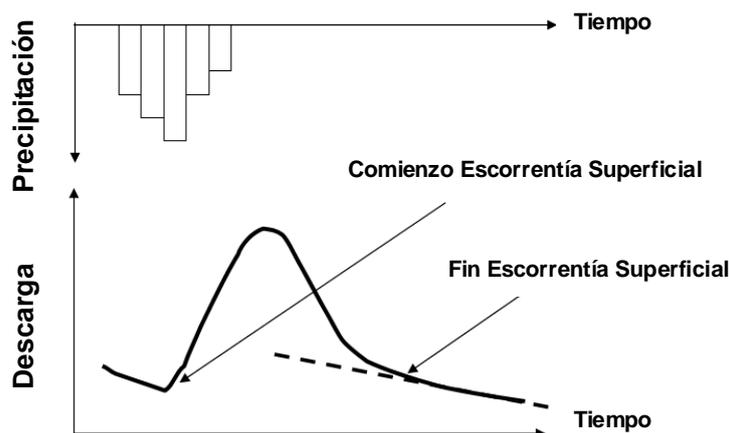


Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-21 Resultado de la Simulación por el Modelo de Tanque

(4). Análisis de la Descarga del Río

Aun cuando no hay una correlación clara entre los datos de precipitación y descarga del río, la escorrentía directa y el flujo base se pueden conocer usando los análisis de descarga con un hidrógrafo tal como el que se muestra en la Figura-2.3-22.



Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-22 Concepto de un Análisis Hidrográfico

(5). Método del Balance Hídrico

Mientras que los métodos de medición directa y otros métodos de análisis discutidos anteriormente, comenzaron a utilizarse recientemente en la Sabana de Bogotá, el método del balance hídrico ha sido aplicado por varias instituciones para analizar la recarga subterránea. El principio del balance hídrico se basa en lo siguiente: la precipitación total en la cuenca de un río se distribuye en evapotranspiración, escorrentía directa e infiltración al agua subterránea. Por lo tanto, si el cambio de almacenamiento en las represas y lagunas de sedimentación es lo suficientemente pequeño como para ser ignorado, se deriva la siguiente ecuación:

$$P = D + E + Rd \quad (1)$$

- P: Precipitación
- D: Descarga del Río
- E: Evaporación o Evapotranspiración
- Rd: Recarga al Acuífero Profundo

Reagrupando los términos en la ecuación (1), se obtiene la siguiente relación:

$$R_d = P - D - E \quad (2)$$

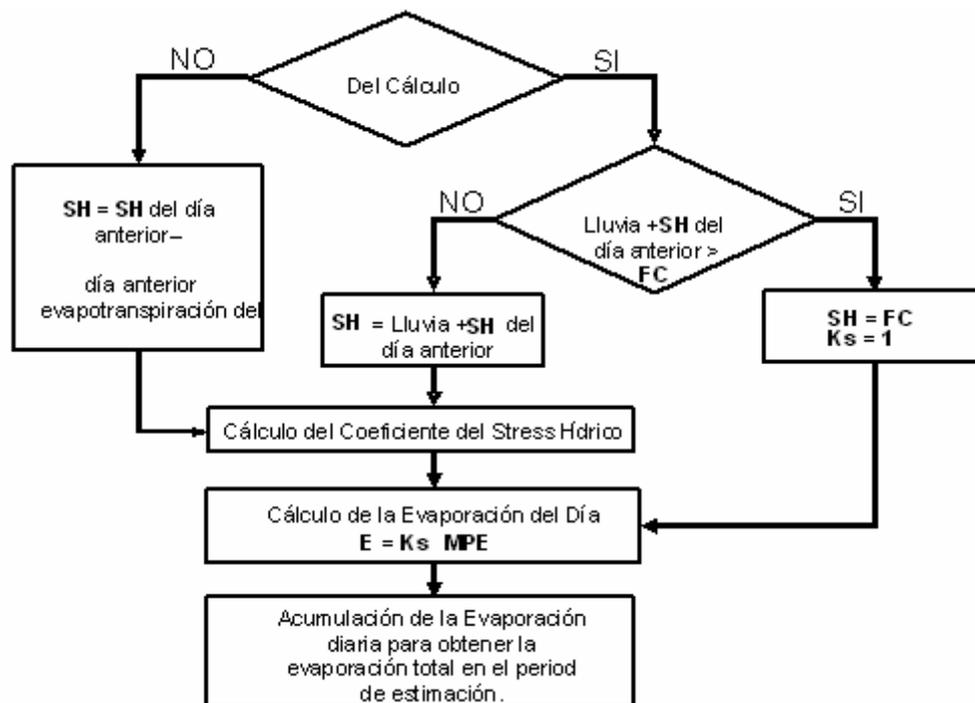
La ecuación muestra que la recarga al acuífero profundo se calcula restando la descarga del río y la evapotranspiración de la precipitación total. La descarga del río (D) y la precipitación (P) pueden ser calculadas a través de un análisis hidrológico como se discutió anteriormente y de esta forma, al determinar el parámetro restante (E), evapotranspiración, se puede conocer el valor de recarga subterránea (Rd).

Sin embargo, evaluar la evapotranspiración no es tan fácil como calcular la recarga subterránea por otros métodos. Muchas formulas teóricas y empíricas han sido propuestas. Una de las más populares y al mismo tiempo mas precisa, es el método *Penman-Monteith*. Sin embargo, este método requiere que más de 10 parámetros meteorológicos se encuentren teóricamente bien calculados. Los parámetros meteorológicos tampoco son fáciles de conseguir y algunas veces no son muy confiables dadas las dificultades para su medición. Así que ésta no es usualmente una opción practica.

Bajo este contexto la FAO publicó una versión simplificada del método *Penman-Monteith* diseñado para la irrigación de cultivos. El procedimiento se recopila en un libro-guía que contiene aplicaciones para diferentes condiciones. Éste método de la FAO fue empleado por otras agencias regulatorias de recursos hídricos en Bogotá para calcular la evapotranspiración, por consiguiente el mismo método se empleo en éste Estudio.

1) Procedimiento de Análisis

Este método de la FAO fue desarrollado originalmente para planear la irrigación de cultivos. Se basa en el hecho que la humedad del suelo se consume por evapotranspiración durante los días siguientes a la lluvia. El método ayuda a determinar si es necesario irrigar para restablecer la humedad del suelo. La Figura-2.3-23 presenta un diagrama de flujo del procedimiento para el cálculo.



Nota: SH: Humedad del Suelo, FC: Capacidad de Campo, Ks: Coeficiente de Stress Hídrico, MPE: Potencial Máximo de Evapotranspiración. Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-23 Procedimiento del Método de la FAO para Estimar la Evapotranspiración

2) Determinación de Parámetros Relevantes

(a) Coeficiente de Evaporimetro (Kp): Éste coeficiente se usa para calcular la evapotranspiración (ET_o) del cultivo de referencia con base en los datos del tanque evaporimétrico

El libro guía de la FAO menciona los valores para el coeficiente de evaporimetro (Kp) que se muestran en la Tabla-2.3-1. Considerando las condiciones meteorológicas típicas en la Cuenca del Río Bogotá tales como la humedad intermedia (RH) y la velocidad moderada del viento, el coeficiente evaporimetro debería ser establecido en menos de 0,7. Sin embargo, para evitar una subestimación de la evapotranspiración, el coeficiente Kp se estableció como 0,7.

Tabla-2.3-1 Criterios para Establecer el Coeficiente de Evaporimetro

Velocidad del Viento (m s-1)	Distancia del cultivo a barlovento (m)	RH medio (%)		
		Bajo < 40	medio 40 - 70	alto > 70
Suave	1	0,55	0,65	0,75
< 2	10	0,65	0,75	0,85
	100	0,70	0,80	0,85
	1000	0,75	0,85	0,85
Moderado	1	0,50	0,60	0,65
2-5	10	0,60	0,70	0,75
	100	0,65	0,75	0,80
	1000	0,70	0,80	0,80
Fuerte	1	0,45	0,50	0,60
5-8	10	0,55	0,60	0,65
	100	0,60	0,65	0,70
	1000	0,65	0,70	0,75
Muy Fuerte	1	0,40	0,45	0,50
> 8	10	0,45	0,55	0,60
	100	0,50	0,60	0,65
	1000	0,55	0,60	0,65

Fuente: Equipo de Estudio JICA

(b) Capacidad de Campo (FC)

La Tabla-2.3-2 muestra los valores de FC para diferentes condiciones de suelo mencionadas en el libro guía de la FAO. Como la condición del suelo dentro de la cuenca no es clara, se tomó un valor promedio de 0,269 para hacer la estimación.

Tabla-2.3-2 Valores de FC Propuestos por el Libro Guía de la FAO

Tipo de Suelo	m ³ /m ³	Promedio
Arenoso	0,07 – 0,17	0,12
Arenoso Franco	0,11 – 0,19	0,15
Franco Arenoso	0,18 – 0,28	0,23
Franco	0,20 – 0,30	0,25
Franco Limoso	0,22 – 0,36	0,29
Limoso	0,28 – 0,36	0,32
Franco Arcillo Limoso	0,30 – 0,37	0,34
Arcillo Limoso	0,30 – 0,42	0,36
Arcilloso	0,32 – 0,40	0,36
Promedio Total	0,22 – 0,32	0,269

Fuente: FAO

(c) Punto de Marchitamiento

La Tabla-2.3-3 presenta los valores del punto de marchitamiento bajo diferentes condiciones de terreno propuestos en el libro guía de la FAO. Al igual que con la capacidad de campo (FC), se adoptó un valor promedio de 0,1228 para la estimación.

Tabla-2.3-3 Valores de Punto de Marchitamiento Propuestos por el Libro Guía de la FAO

Tipo de Suelo	m ³ /m ³	Promedio	TAW
Arenoso	0,02 – 0,07	0,045	0,075
Arenoso Franco	0,03 – 0,10	0,065	0,085
Franco Arenoso	0,06 – 0,16	0,11	0,12
Franco	0,07 – 0,17	0,12	0,13
Franco Limoso	0,09 – 0,21	0,15	0,14
Limoso	0,12 – 0,22	0,17	0,15
Franco Arcillo Limoso	0,17 – 0,24	0,205	0,135
Arcillo Limoso	0,17 – 0,29	0,23	0,13
Arcilloso	0,20 – 0,24	0,22	0,14
Promedio Total	0,10 – 0,19	0,146	0,1228

Fuente: FAO

(d) Coeficiente de Cultivo (Kc)

La Tabla-2.3-4 presenta los valores para el coeficiente de cultivo (Kc) propuestos por la FAO en su libro guía. Los valores de Kc varían notablemente entre 0,25 y 1,25 dependiendo del tipo de cultivo y su periodo de crecimiento. El método de estimación para la evapotranspiración anteriormente explicado es estrictamente teórico y en varios casos difícil de aplicar. Por lo tanto, evitando subestimar la evapotranspiración y considerando los valores usados en otros estudios con este mismo método, se adoptó un valor de Kc de 0,8 para la Cuenca del Río Bogotá.

Tabla-2.3-4 Valores de Kc Propuestos

Cultivo	K _{c ini}	K _{c med}	K _{c fin}
a, Hortalizas Pequeñas	0,7	1,05	0,95
b, Hortalizas – Familia de las Solanáceas	0,6	1,15	0,80
c, Hortalizas – Familia de las Cucurbitáceas	0,5	1,00	0,80
d, Raíces y Tubérculos	0,5	1,10	0,95
e, Leguminosas (<i>Leguminosae</i>)	0,4	1,15	0,55
f, Hortalizas Perennes (con letargo invernal y suelo inicialmente desnudo o con mantillo)	0,5	1,00	0,80
g, Cultivos Textiles	0,35	0,4-1,2	0,25-0,7
h, Cultivos Oleaginosos	0,35	1,15	0,35
i, Cereales	0,3	1,15	0,4
j, Forrajes	0,4-0,95	0,9-1,05	0,85-1,0
k, Caña de Azúcar	0,40	1,25	0,75
l, Frutas Tropicales y Árboles	0,5-0,95	0,3-1,05	0,3-1,05
m, Uvas y Moras	0,3	0,7-1,05	0,45-0,85
n, Árboles Frutales	0,4-1,0	0,45-1,2	0,45-0,9
o, Humedales – Climas templados	0,3-1,09	1,1-1,2	0,3-1,1

Fuente: FAO

El libro guía de la FAO establece que los valores de Kc se reducen a valores entre 0,15 y 0,2 durante los periodos sin cultivos, previos a la siembra y posteriores a la cosecha, ó en caso que la superficie no esté cubierta con vegetación. Esto implica que el valor real de evapotranspiración puede ser posiblemente menor que los valores calculados.

(e) Zona de Raíz

El libro guía de la FAO presenta los valores máximos de longitud de raíz para más de 100 especies de plantas. Los valores varían entre 0,3 y 2,0 m y la mayoría están alrededor de 0,5 m. Por consiguiente, el valor de la zona de raíz se estableció en 0,5 m. La FAO en su libro guía establece que la profundidad de influencia de la evapotranspiración sobre la superficie del suelo está entre 0,1 y 0,15 m durante periodos sin cultivos, previos a la siembra y posteriores a la cosecha, ó en caso de que la superficie no esté cubierta con vegetación.

3) Resultados de la Estimación

Finalmente, los valores de evapotranspiración fueron re-calculados usando los parámetros discutidos anteriormente y los mismos datos usados en el Estudio anterior de JICA, provenientes de 14 estaciones

de observación de tanque evaporimétrico. El resultado de la estimación junto con el set de datos ingresados se presenta en la Tabla-2.3-5.

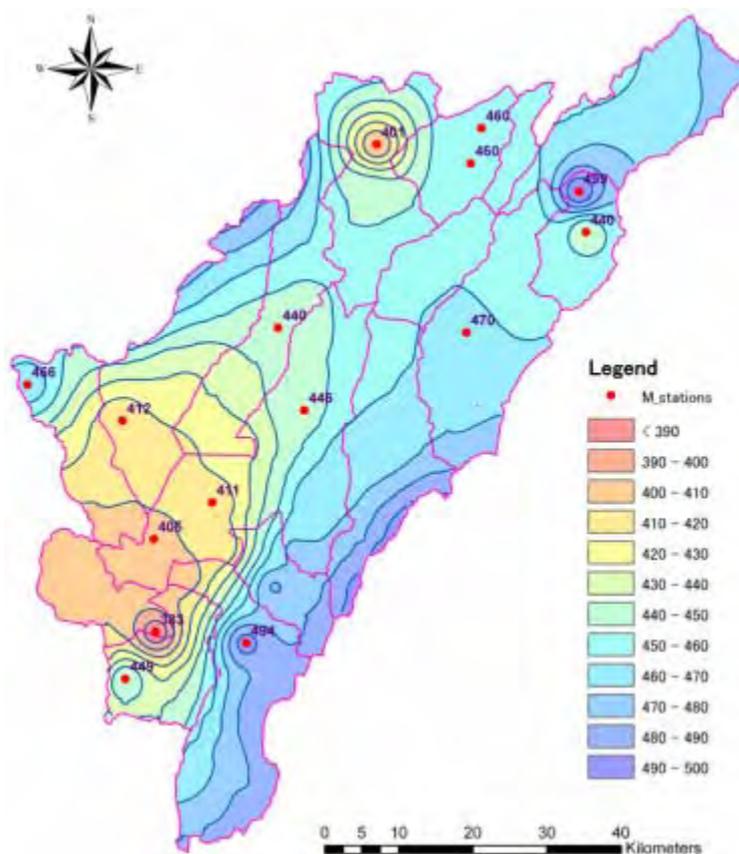
Tabla-2.3-5 Resultados y Datos Ingresados para la Estimación de la Evapotranspiración

Code	Station	Duration	E_pan_avrg	ER_avrg	STDEV	Max		Min	
2120633	Barrancas	91-98	1,124	460	35.6	531	1996	416	1998
2120540	Checua	91-98	1,369	460	55.8	562	1996	373	1997
2120630	Dona Juana	94-98	1,280	494	82.2	541	1994	461	1998
2120562	Guatavita	91-98	1,194	470	72.7	541	1994	418	1992
2120559	Guymaral	91-98	998	446	32.3	471	1996	376	1997
2120611	Balsillas	88-91	837	405	34.3	412	1991	395	1989
2120548	La Iberia	91-98	1,034	440	49.8	459	1992	411	1994,98
2120561	Muna	91-98	1,014	383	50.6	443	1996	332	1992
2120541	Neusa	91-98	867	401	69.6	433	1994,95	285	1998
2120557	Primavera	91-97	1,039	449	48	478	1993	426	1992
2120516	Ramada	91-98	998	411	52.4	439	1991	378	1995
2120548	Sisga	93-97	1,081	499	38	527	1997	476	1993
2120565	Tabio	91-98	1,023	440	75.2	457	1991	400	1995
2120631	Tisquesusa	91-98	989	412	41.5	464	1996	351	1992
2120629	Venecia	91-98	1,100	466	117.6	531	1998	419	1992

Nota: Code: Código de la Estación, Station: Nombre de la Estación, Duration: Duración del muestreo, E_pan_avrg: Promedio de evaporación, STDEV: Desviación Estándar. Fuente: Equipo de Estudio JICA

4) Distribución de la Evapotranspiración en la Cuenca del Río Bogotá

La distribución de la evapotranspiración en la cuenca del Río Bogotá se estimó con base en los resultados anteriores. A partir de éstos se creó el mapa que se observa en la Figura-2.3-24.



Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-24 Distribución de la Evapotranspiración en la Cuenca del Río Bogotá

5) Balance Hídrico en la Cuenca del Río Bogotá

Los resultados de la estimación del análisis hidrológico y de recarga subterránea se compilan en la Tabla-2.3-6. Vemos que la recarga en la Sabana de Bogotá es de 132 mm/año en promedio. Este valor (132 mm/año) deberá ser tenido en cuenta para estimar el volumen de agua subterránea a ser desarrollado.

Tabla-2.3-6 Resumen de la Estimación de Recarga Subterránea en la Cuenca del Río Bogotá

NAME	Area	Precip.	Discharge	Evapo.	GW_Rechg
Los Arboles	62.7	668	184	458	26
Checua	170.1	782	172	453	157
Neusa	330.4	941	199	445	297
Chicu	329.7	795	163	445	187
Subachoque	397.9	753	99	440	214
Bojaca	220.1	685	191	429	65
Sub Total	1,511	793	160	443	190
Bogota(U)	337.1	851	292	467	92
Bogota(M)	152.3	760	146	457	157
Bogota(L)	620.5	699	143	438	118
Bogota(E)	154.8	691	280	405	6
Sub Total	1,265	792	200	444	148
Sisga	154.3	880	313	461	106
Tomine	404.0	841	373	462	6
Teusaca	335.2	964	328	469	167
Fucha	132.3	926	282	450	194
Tunjuelo	395.5	1030	431	470	129
Soacah	199.2	779	297	429	53
Sub Total	1,620	915	355	460	100
Total	4,396	825	243	450	132

Nota: Name: Nombre del lugar, Precip.: Precipitación, Discharge: Descarga, Evapo.: Evapotranspiración, GW_Rechg: Recarga Subterránea. Fuente: Equipo de Estudio JICA

3.2.4. Simulación de Aguas Subterránea

1) Propósito de la Simulación

En el Estudio anterior de JICA se crearon los modelos de simulación de aguas subterráneas a escalas locales y regionales para analizar el sistema de flujo del agua subterránea en el Área de Estudio. En el presente estudio se investigó el flujo de agua subterránea en el acuífero Cretáceo de los Cerros Orientales y Sur en la cuenca del Río Bogotá, principalmente con base en los resultados del estudio anterior. El nuevo modelo siguió la estructura básica de los modelos anteriores y se ubicaron los 62 nuevos pozos profundos de bombeo planeados. Se evaluó el efecto de bombeo de estos 62 pozos profundos sobre el nivel freático y la distribución de cabezas hidráulicas en los acuíferos circundantes. Se condujo una simulación transitoria para examinar y evaluar la relación “tiempo de bombeo-reducción del nivel freático” sobre el acuífero Cretáceo sujeto de bombeo y sobre las capas sedimentarias del Cuaternario que pueden propiciar problemas de deslizamiento de tierra como resultado del bombeo.

2) Diseño del Modelo

(1). Modelo Conceptual

Dentro del modelo de simulación se asumieron los siguientes supuestos de acuerdo a algunas consideraciones hidrogeológicas.

Ríos

Como se explica en el Capítulo 3, el agua subterránea en la cuenca del Río Bogotá solo se recarga por precipitación directa. Parte de la precipitación normalmente fluye fuera de la cuenca como descarga directa del río. Sin embargo, solamente el componente de precipitación que contribuye a la recarga subterránea se considera como un “input” ya que no existe descarga de río dentro de la cuenca del Río Bogotá. En otras palabras, para este modelo no es necesario simular la descarga del río en la cuenca.

Distribución del Acuífero

Las áreas montañosas que forman las líneas divisorias de agua en el sur y oriente de la cuenca del Río Bogotá están constituidas en su mayoría por rocas sedimentarias del Cretáceo. Estas rocas desarrollan fisuras extensivas, y por ende la permeabilidad se considera lo suficientemente alta para considerarlo un acuífero. Fue asumido que en estas rocas Cretáceas las fisuras se desarrollan uniformemente y que pueden ser tratadas como un medio poroso normal en términos de sus características hidráulicas. Entretanto, se asume que las formaciones Terciaria y Cuaternaria, encima del acuífero Cretáceo, tienen baja permeabilidad considerando la naturaleza de sus rocas y por lo tanto no son buenos acuíferos.

Recarga / Dirección del Flujo / Niveles Subterráneos

Las áreas montañosas a grandes altitudes reciben una recarga mayor por precipitación. La precipitación infiltrada por la pendiente de la montaña fluye lentamente hacia abajo dentro de la cuenca de agua subterránea bajo la Sabana de Bogotá, donde hay una amplia distribución de sedimento Cuaternario. El Río Bogotá y sus afluentes fluyen a través de la Sabana de Bogotá y su descarga y etapas se consideran constantes. De la misma forma, las represas y lagunas de sedimentación en la cuenca tienen niveles constantes de agua.

Zona Vadosa

Existe una alta posibilidad que una zona vadosa gruesa (capa no-saturada encima del nivel freático) se desarrolle en pendientes inclinadas de montañas dependiendo de las condiciones geológicas. Sin embargo, tales zonas fueron aproximadas y modeladas como zonas saturadas.

Condición de la Descarga de Agua Subterránea fuera de la Cuenca del Río Bogotá

Fuera de la cuenca del Río Bogotá, la cantidad total de precipitación directa se aplica como la condición de recarga. Por lo tanto, la precipitación restante (después de la infiltración al acuífero) debe ser drenada fuera del área del modelo por los canales de ríos y quebradas originando las líneas divisorias de agua de la cuenca del Río Bogotá.

(2). Estructura / Parámetros / Condiciones Límites del Modelo

Al principio, el modelo de simulación adoptó la estructura y otras condiciones del modelo creado en el Estudio JICA anterior (2000-2003). Sin embargo, algunas alteraciones tales como divisiones posteriores de las cuadrículas verticales (capas) y cambios en algunos parámetros y condiciones limítrofes del modelo fueron hechos con el fin de aumentar la estabilidad en la solución del modelo. El software MODFLOW se utilizó como código de simulación y el software PMWIN se utilizó como la interfase de pre y post procesamiento. La información básica del modelo se presenta en la Tabla-2.3-7.

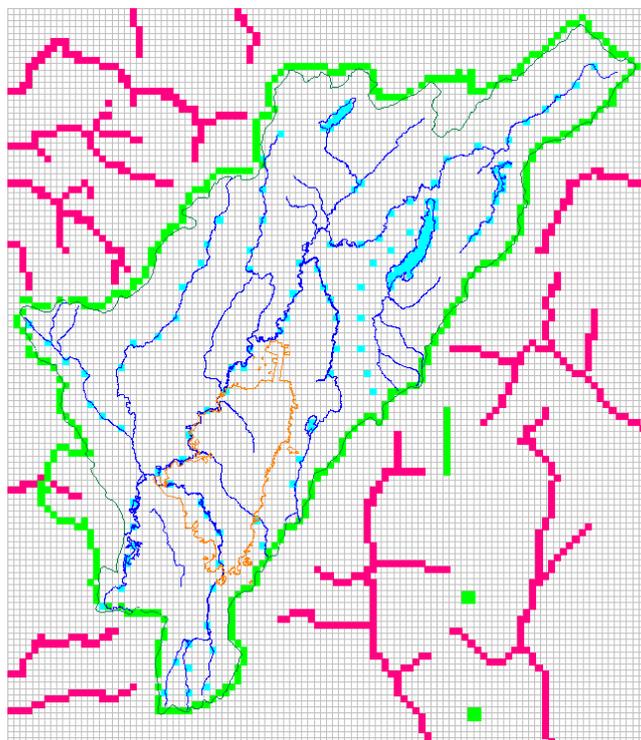
Tabla-2.3-7 Diseño del Modelo de Simulación de Agua Subterránea

Estructura	Parámetros y Condiciones Limitantes
Cuadrícula Horizontal : 1000 m ²	Área del Modelo
x: 105, y: 120	N-S 120 km, E-W 105 km
Capas: 12 capas en total	
1ra capa: Cuaternario	Conductividad Hidráulica (K _H) : 0,001 m/día
	En la cuenca: Cabezas hidráulicas fijas para ríos y represas, GHB para cadenas de montañas, recarga subterránea
	Fuera de la Cuenca: Drenaje de ríos principales, recarga completa
2da capa: Terciario	Conductividad Hidráulica (K _H) : 0,005 m/día
3ra & 4ta capa: Guadalupe	Conductividad Hidráulica (K _H) : 0,01- 0,05 m/día
	7000 pozos existentes, 62 nuevos pozos planeados
5ta capa: Cretáceo	Conductividad Hidráulica (K _H) : 0,01 m/día
6ta a 12 ^{va} capa: Paleozoico	Conductividad Hidráulica (K _H) : 0,0001 m/día
	GHB para la mayoría de celdas del perímetro en las capas 8 y 10.

Nota: GHB: Limite General de Cabezas Hidráulicas (General Head Boundary)(dependiente de la capa externa), las conductividades hidráulicas son los valores iniciales, $K_v = 0,1 \times K_H$.

Fuente: Equipo de Estudio JICA

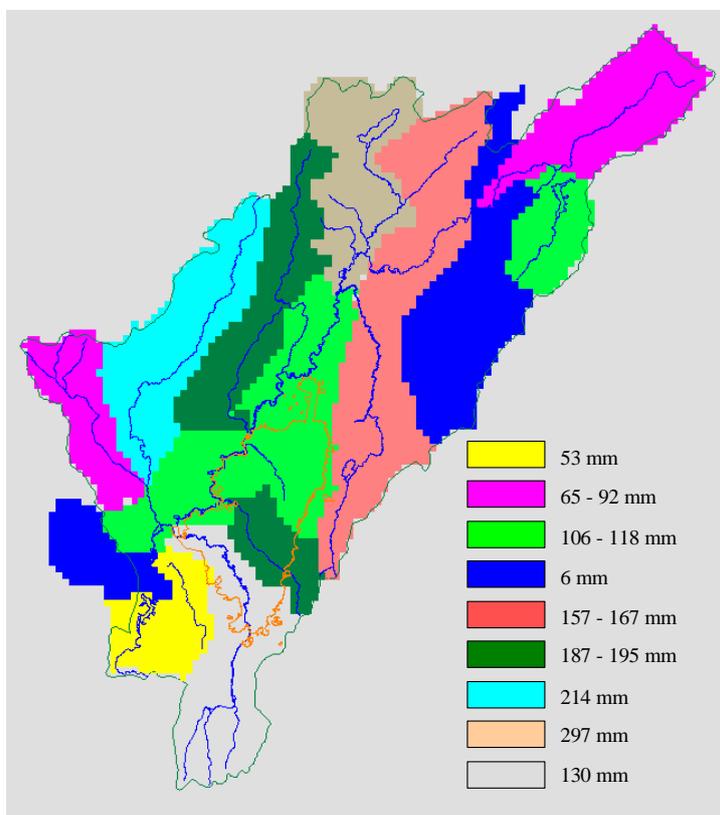
La cuadrícula horizontal y las principales condiciones límites en la 1^{era} capa se muestran en la Figura-2.3-25. La distribución de la recarga se muestra en la Figura-2.3-26 y la ubicación de los pozos de bombeo existentes se presenta en la Figura-2.3-27.



Nota: Azul-Cabeza hidráulica fija, Verde-GHB, Rojo-Drenaje, el GHB se estableció también para el perímetro de las capas 8 y 10, Las líneas azules representan ríos, Las líneas Naranjas representan los límites del área urbana.

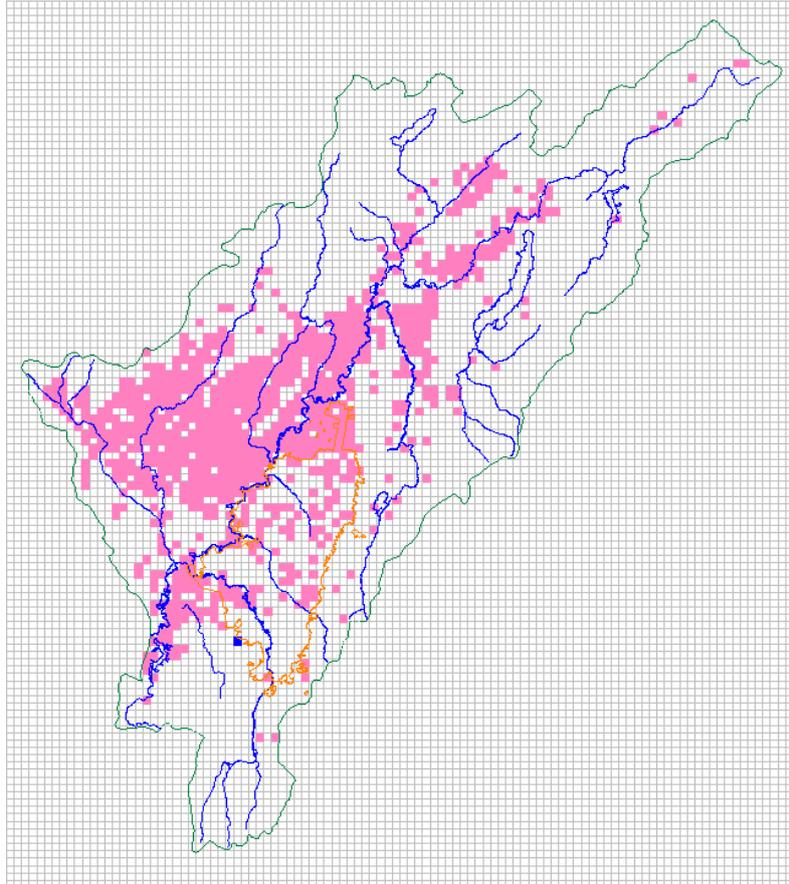
Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-25 Cuadrícula Modelo y Condiciones Límite en la Capa 1



Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-26 Distribución de la Recarga (mm/año)

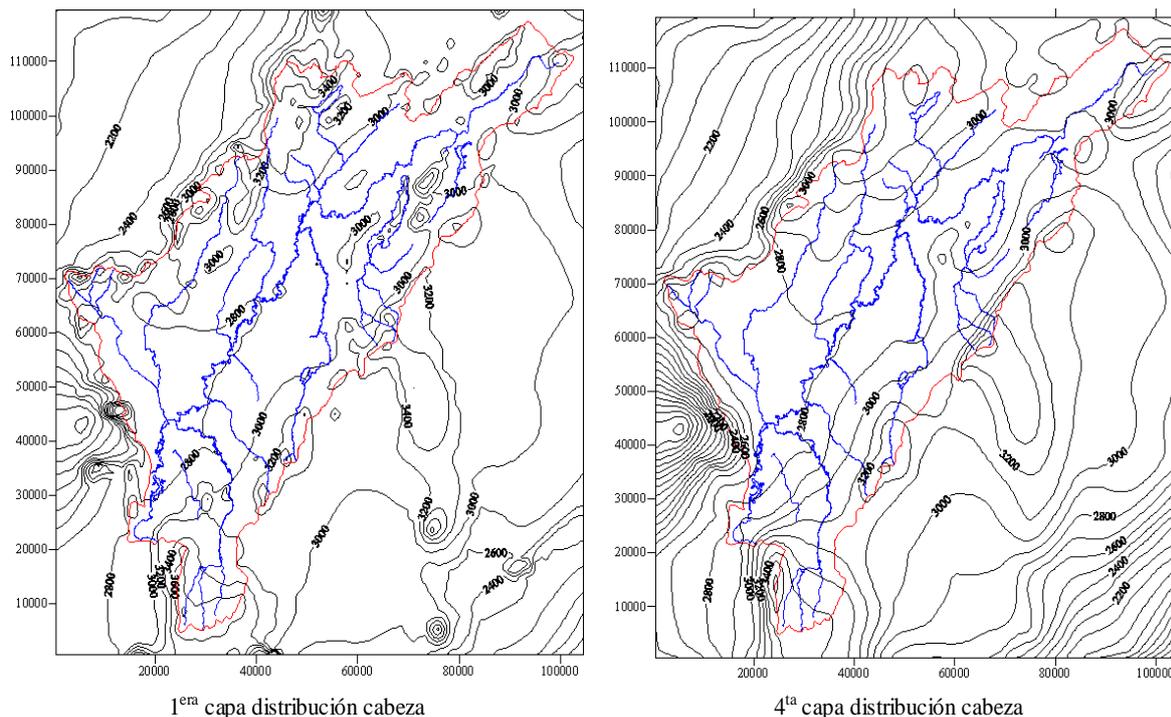


Nota: Las celdas en Rosado representan pozos de bombeo, existen un total de 7.000 pozos y la tasa de bombeo es cerca de 320.000 m³/día. Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-27 Ubicación de los Pozos Existentes

3) Calibración del Modelo

La calibración del modelo se hizo ajustando los valores de conductividad hidráulica de cada capa dentro de un rango razonable. Debido a la ausencia de datos de observación confiables de cabeza hidráulica, que pudieran ser usados para calibrar, el modelo fue calibrado hasta que la elevación del nivel freático de la primera capa igualara la elevación del suelo. El resultado final de la calibración bajo condiciones de estado permanente, se presenta en la Figura-2.3-28 como mapas de distribución de cabezas hidráulicas.



Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-28 Distribución de Cabezas Hidráulicas Después de la Calibración del Modelo Bajo Condiciones de Estado Permanente

3.2.5. Perforaciones Exploratorias de Pozos

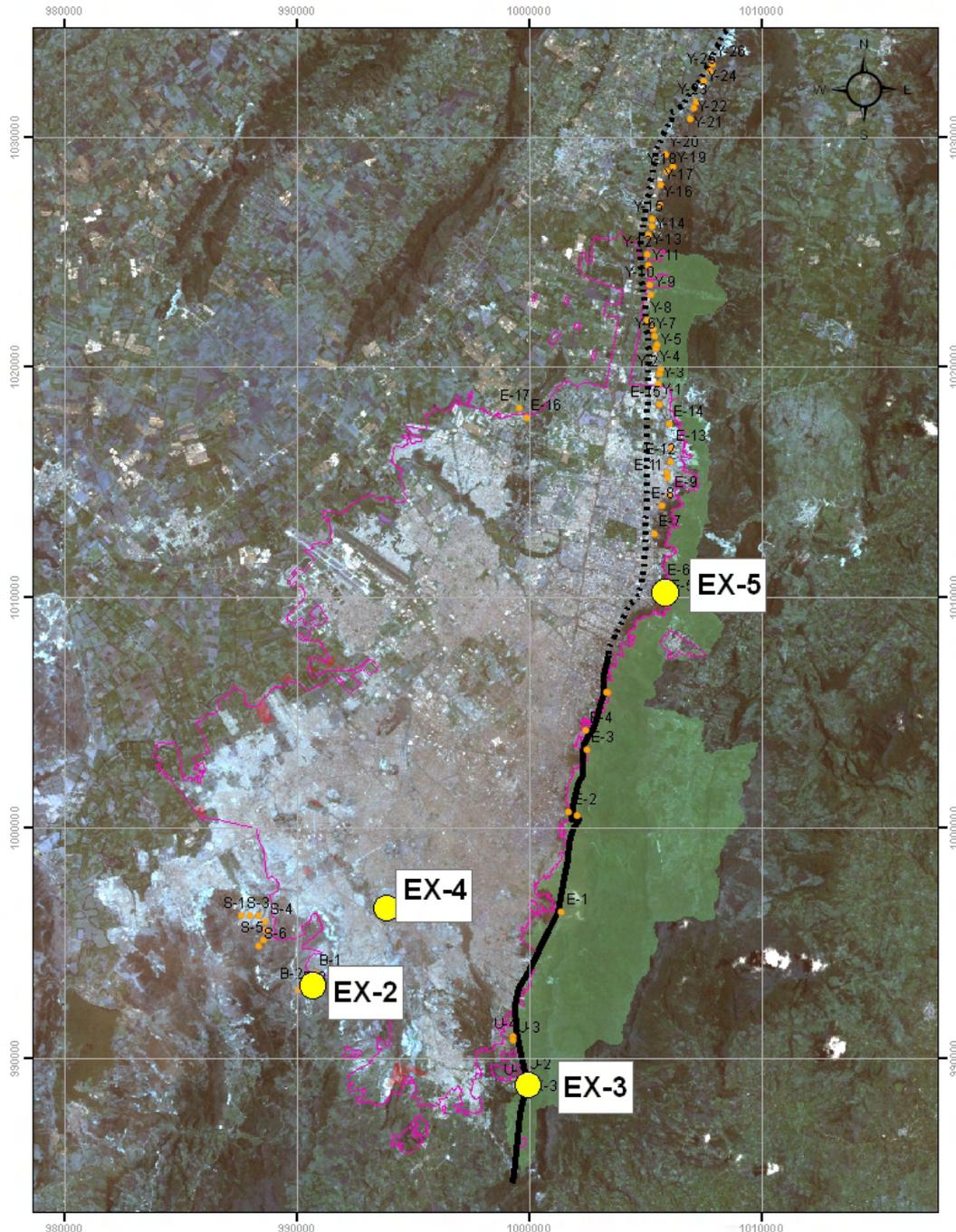
(1). Ubicación de los Pozos

La ubicación propuesta de los pozos exploratorios y de observación se muestra en la Tabla-2.3-8 y en la Figura-2.3-29.

Tabla-2.3-8 Ubicación de los Pozos Exploratorios

	No. Pozo	Área	Coordenadas		Responsable
			X	Y	
Propósito	EX-2	Ciudad Bolívar Verbenal	4 ° 32'14.4"N	74 ° 09'51.7"W	JICA
	EX-3	Usme Cervecería Alemana	4 ° 29'38.1"N	74 ° 04'51.5"W	JICA
	EX-5	La Aguadora	4 ° 38'04.4"N	74 ° 03'20.7"W	Acueducto
Pozo Observación	EX-4	Embalse Seco No.1	4 ° 33'48.84"N	74 ° 08'18.696"W	JICA

Fuente: Equipo de Estudio JICA



Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-29 Ubicación de Los Pozos Exploratorios

La ubicación de los pozos exploratorios se definió teniendo en cuenta los siguientes puntos de vista:

<Hidrogeología>

- Los pozos exploratorios fueron ubicados donde la arenisca del Cretáceo se distribuye cerca a la falla de Bogotá y otras estructuras geológicas eminentes como fallas principales y ejes de plegamiento. Lo que traduce en una alta probabilidad de desarrollo de aguas subterráneas.
- El nivel del agua subterránea puede ser profundo en áreas de gran altitud en los Cerros. Por lo tanto, los pozos exploratorios, deben estar ubicados en el pie de los Cerros o en la mitad de la pendiente, donde se espera que el nivel freático sea menos profundo.

<Regulación Ambiental>

- Cualquier actividad está prohibida dentro del área de protección forestal de los Cerros Orientales. Por lo tanto, los pozos exploratorios fueron ubicados fuera del área de protección forestal. Por otro lado, en el los Cerros Sur no hay un área de protección forestal.

<Construcción de Instalaciones>

- Considerando el uso futuro de los pozos exploratorios como pozos de producción, la ubicación de los pozos exploratorios fue seleccionado cerca de las instalaciones existentes de abastecimiento de agua, lo cual facilita la conexión entre los pozos y las instalaciones en el futuro.
- Los pozos exploratorios fueron ubicados en lugares donde hay suficiente espacio para los trabajos de perforación y otras obras de construcción y cerca a vías de acceso para la movilización fácil de los taladros de perforación y la maquinaria de construcción.

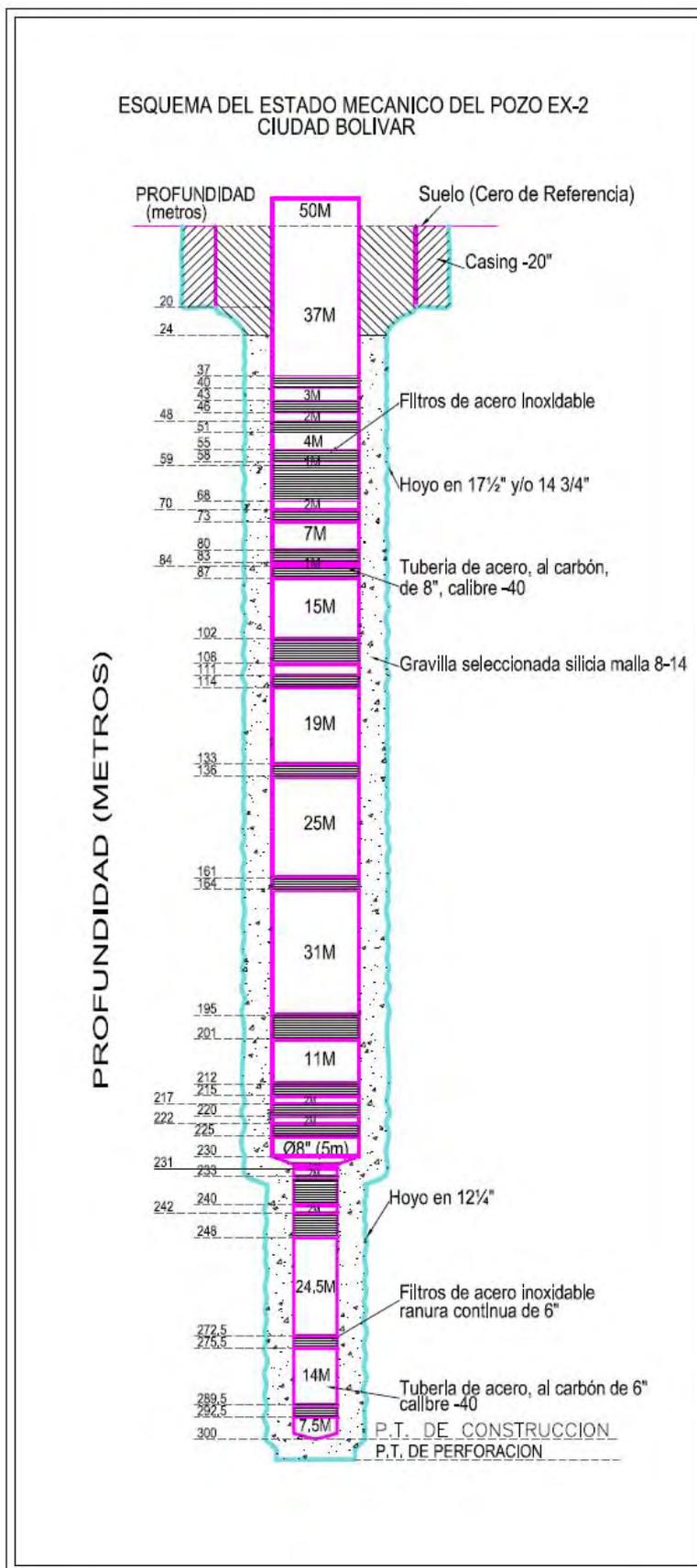
(2). Resultados de la Perforación Exploratoria

Estructura del Pozo

La estructura de los pozos exploratorios EX-2, EX-3 y del pozo de observación (EX-4) se diseñó como se muestra en la Figura-2.3-30.

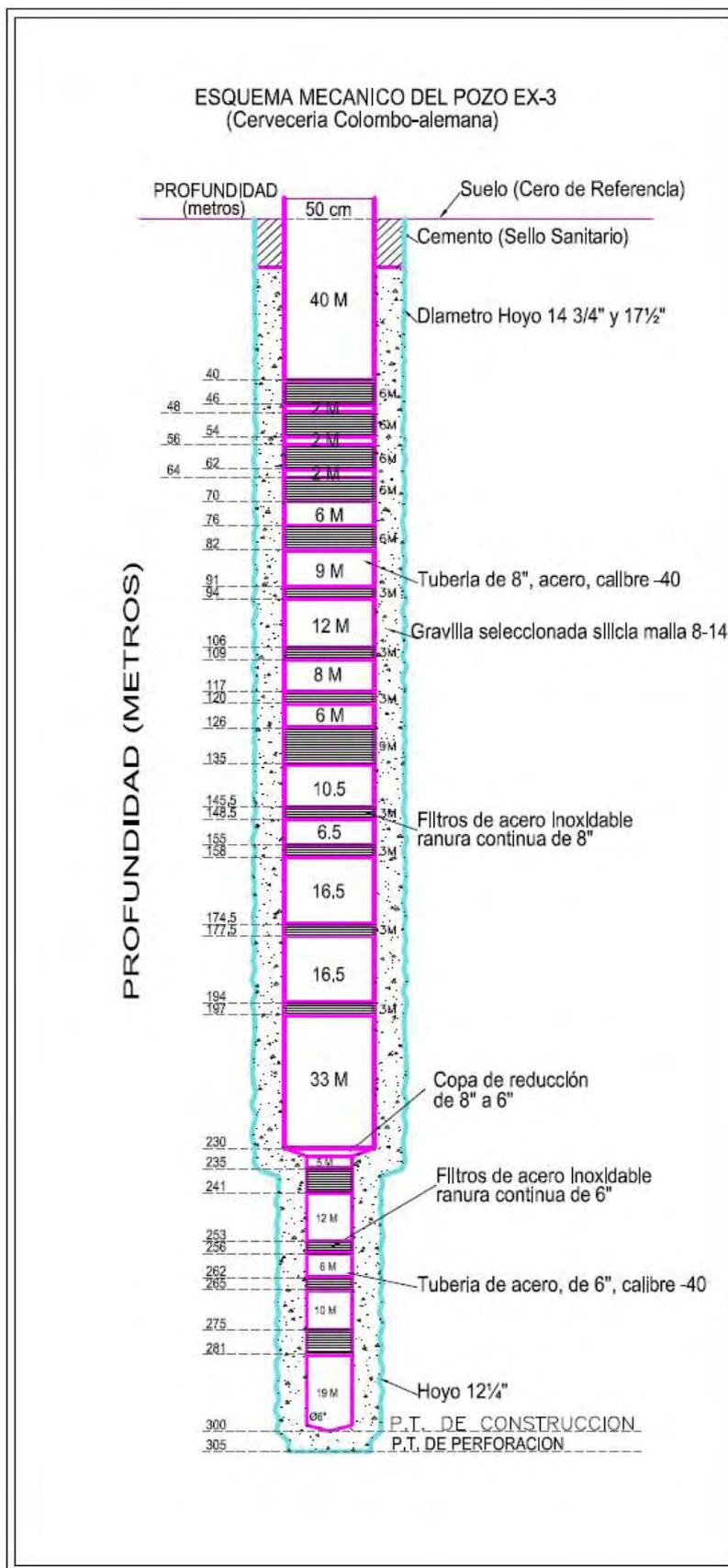
Resultados de la Perforación

Los resultados de la perforación exploratoria (EX-2 y EX-3) y del pozo de observación (EX-4) se resumen en la Tabla-2.3-9 y en la Tabla-2.3-10. La columna geológica de los pozos se muestra en la Figura-2.3-31. Las pruebas de bombeo se llevaron a cabo después de la terminación de los pozos. Se condujo una prueba de bombeo continua por 48 horas. Posterior a ésta, se realizaron las pruebas de recuperación. Finalmente se hizo una prueba escalonada de reducción del nivel freático.



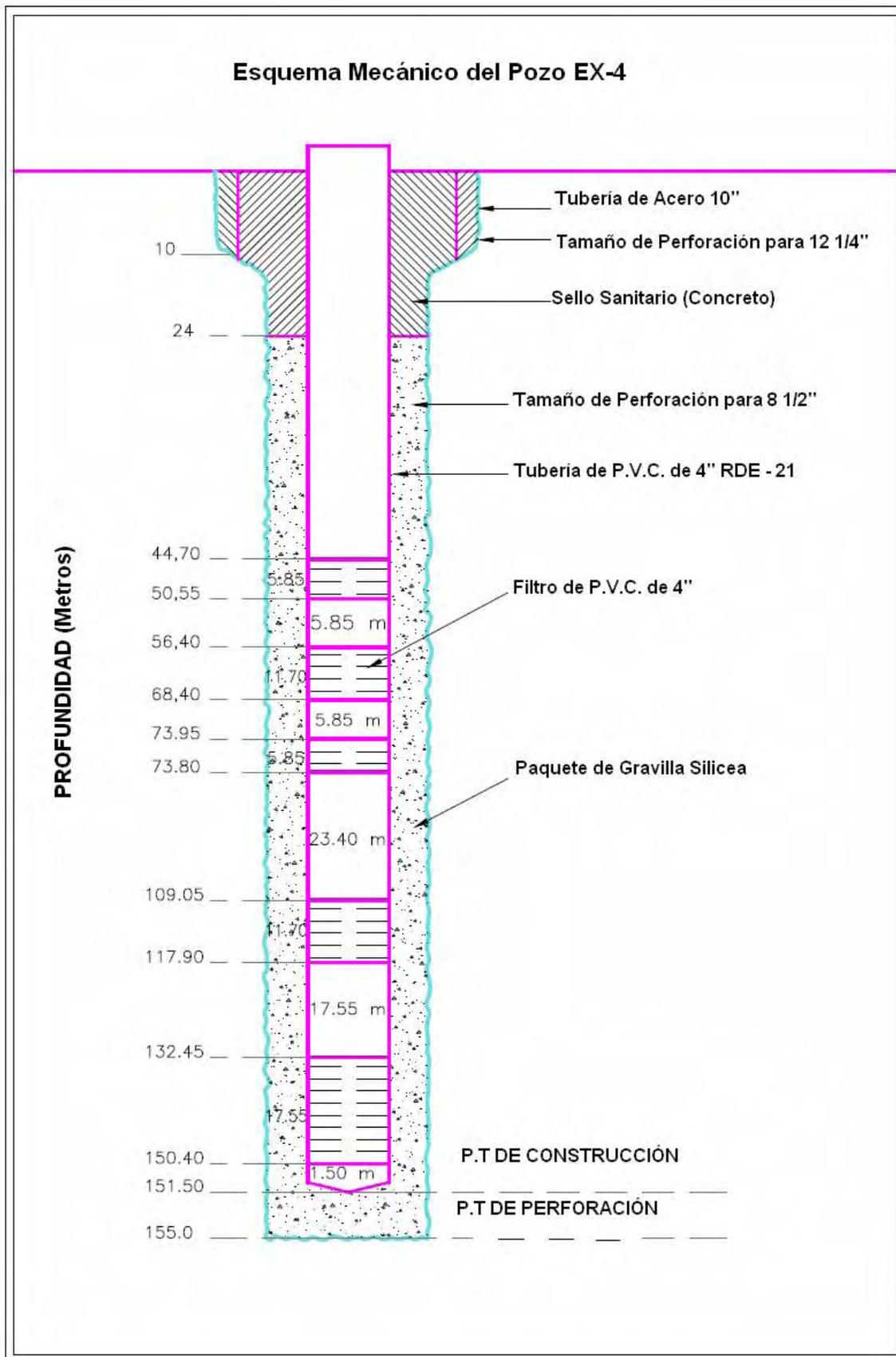
Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-30 Estructura del Pozo EX-2 (a)



Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-30 Estructura del Pozo EX-3 (b)



Fuente: Equipo de Estudio JICA

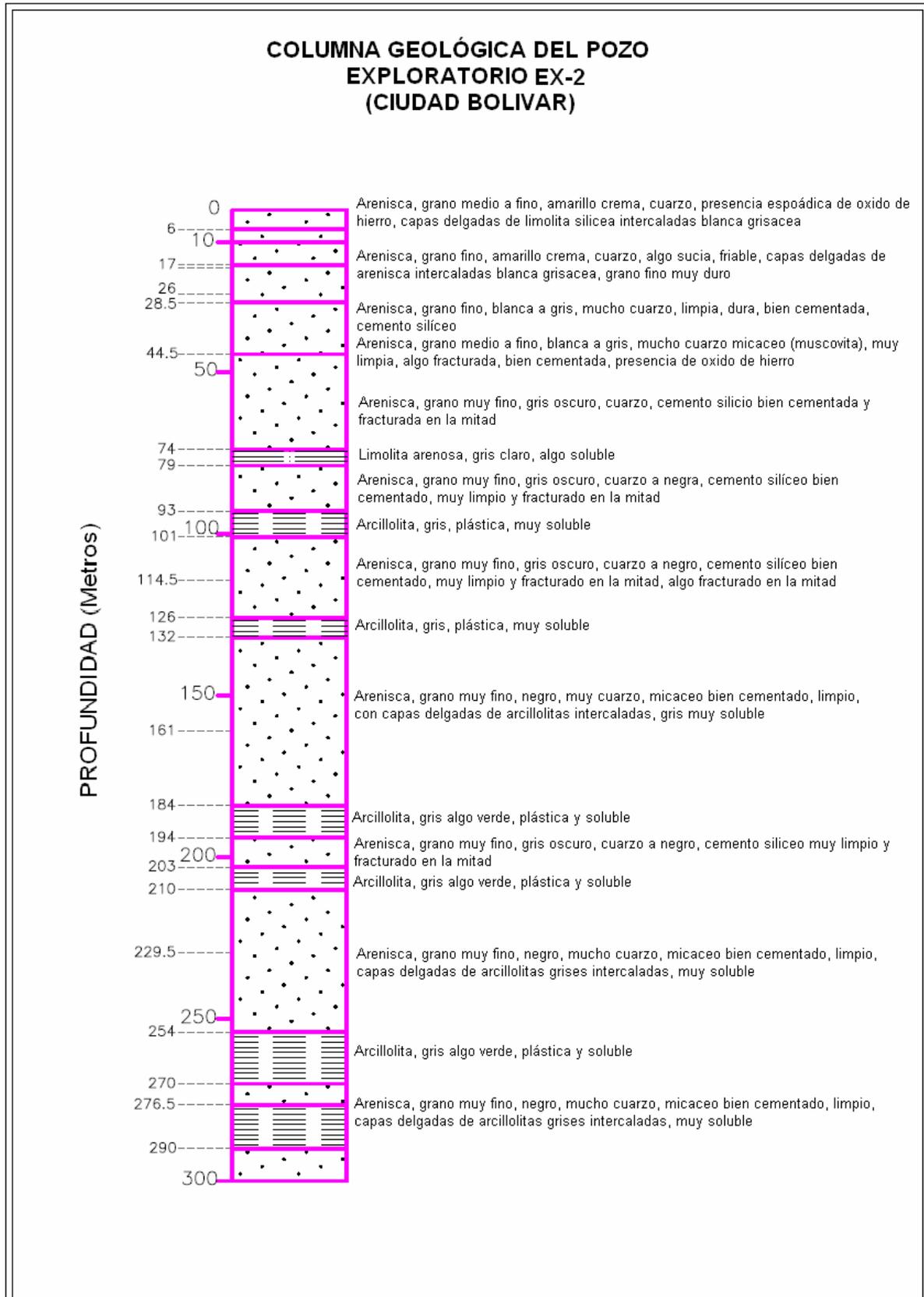
Figura-2.3-30 Estructura del Pozo EX-4 (c)

Tabla-2.3-9 Resultados de la Perforación Exploratoria del Cretáceo

No. Pozo (Lugar)	EX-3 (Usme)	Ex2 (Ciudad Bolívar)	EX-5 (La Aguadora)	EX-4 (Embalse Seco No.1)			
Profundidad del Pozo (m)	300m	300m	300m	150m			
Profundidad del filtro	37 - 40, 43 - 46, 48 - 51, 55 - 58, 59 - 68, 70 - 73, 80 - 83, 84 - 87, 102 - 108, 111 - 114, 133 - 136, 161 - 164, 195 - 201, 212 - 215, 217 - 220, 222 - 225, 233 - 240, 242 - 248, 273 - 275, 289 - 292 (Total 80m)	40 - 46, 48 - 54, 56 - 62, 64 - 70, 76 - 82, 91 - 94, 106 - 109, 117 - 120, 126 - 135, 145 - 148, 155 - 158, 174 - 177, 194 - 197, 235 - 241, 253 - 256, 262 - 265, 275 - 281 (Total 80m)	109~118, 120~129, 131~140, 148~154, 155~164, 165~174, 175~181, 194~197, 201~207, 216~222, 223~232, 233~242, 243~246, 256~262, 286~289, 290~299. (Total 111m)	44 - 51, 56 - 68, 74 - 78, 110 - 115, 132 - 150 (Total 50m)			
Diámetro del Recubrimiento	8 pulgadas	8 pulgadas	10 pulgadas	4 pulgadas			
Acuífero	Arenisca	Arenisca	Arenisca	Arenisca y Grava			
Prueba de Bombeo Continuo							
S.W.L ¹⁾ (GL-m)	20,7	18,2	37.6	25.2			
Producción (m ³ /día)	95	864 - 1,223	864	145			
Reducción del Nivel Freático	69,29	52,7	71.4	7.1			
D.W.L ²⁾ (GL-m)	89,99	70,9	109	32.3			
Capacidad Especifica (m ³ /día/m)	1,37	23,2	12.1	20.4			
Transmisibilidad (m ² /día)	1,9	14,7	13.6	27.8			
Conductividad (m/día)	0,023	0,18	0.17	0.56			
Almacenamiento	6,9x10 ⁻⁴	2,2x10 ⁻²	2.06x10 ⁻²	4.2x10 ⁻³			
Prueba de Reducción del Nivel Freático Escalonada							
Paso	Producción (m ³ /día)	Abatimiento (m)	Producción (m ³ /día)	Abatimiento (m)	Producción (m ³ /día)	Abatimiento (m)	-
Paso 1	41	43,4	966	11,1	290	15.4	-
Paso 2	82	47,9	1,24	17,1	360	22.3	-
Paso 3	121	57,3	1,446	20,9	470	33.6	-

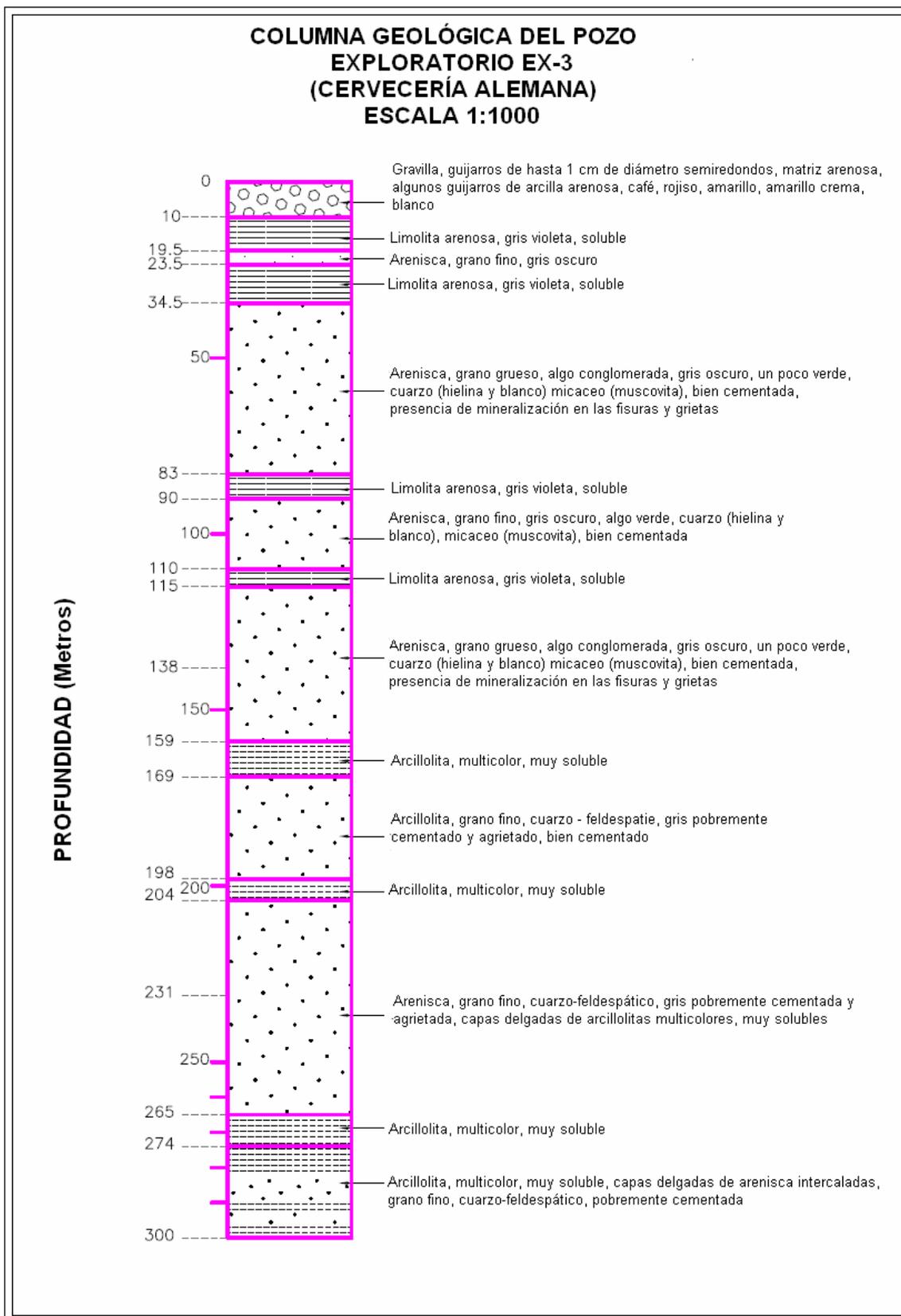
Fuente: Equipo de Estudio JICA

Nota) La conductividad y el almacenamiento fueron analizados por el método Jacob y por el método de recuperación



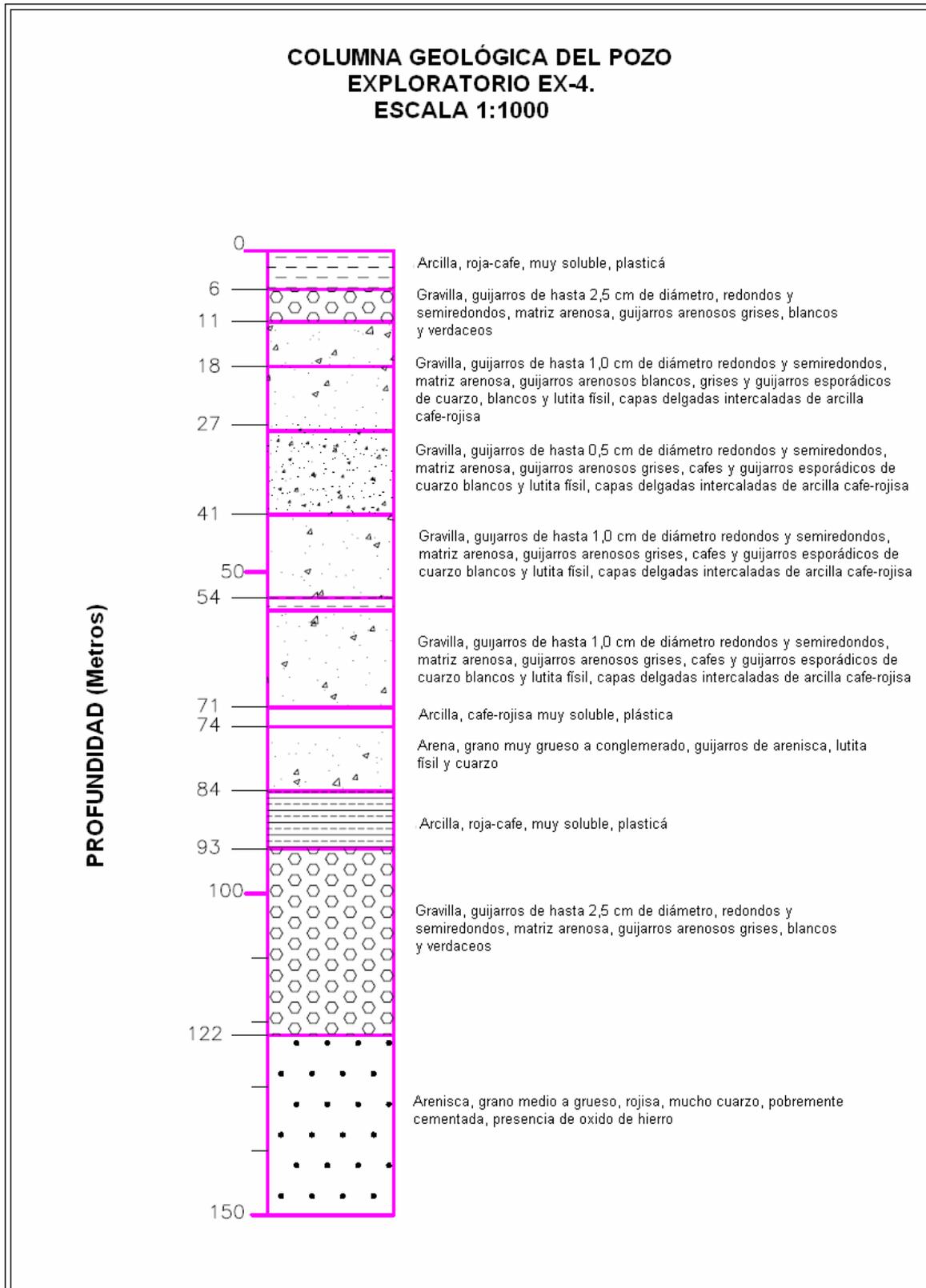
Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-31 Columna Geológica del Pozo EX-2 (a)



Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-31 Columna Geológica del Pozo EX-3 (b)



Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-31 Columna Geológica del Pozo EX-4 (c)

Tabla-2.3-10 Condiciones Geológicas del Pozo

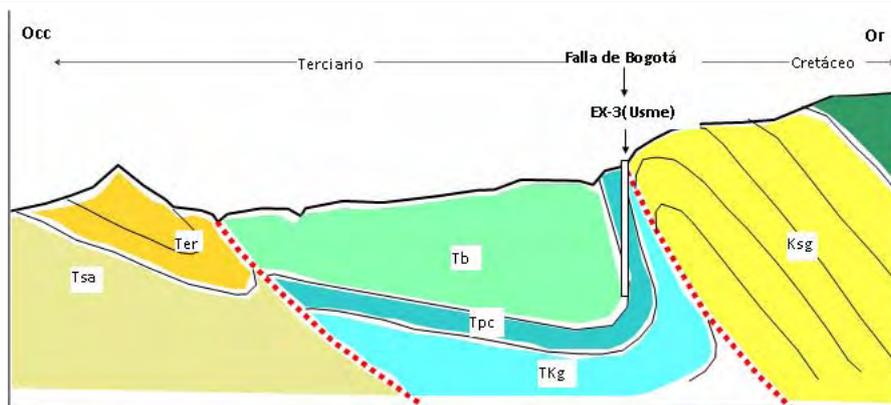
Pozo No.	Geología		Profundidad (G.L.-m)	Fase de Roca
	Edad	Formación		
Pozo Exploratorio EX-2	Cretáceo	Formación Planers	0-17	Arenisca, lutita arenosa
		Formación Dura	17-300	Arenisca fina
Pozo Exploratorio EX-3	Cuaternario	Coluvial	0-10	Arena y grava.
	Cretáceo-Terciario	Formación Cacho	oct-35	Arcillolitas
			35 - 90	Arenisca gruesa intercalada con una capa delgada de arcilla
			90-115	Arenisca fina intercalada con una capa delgada de arcilla
			115-159	Arenisca gruesa
	Terciario	Formación Bogotá	159-265	Arenisca fina intercalada con una capa delgada de arcilla
265-300			Arcillositas	
Pozo Exploratorio EX-5	Cuaternario	Coluvial	1-5	Arena y grava.
	Cretáceo-Terciario	Formación Labor y Tierna	5-300	Arenisca , Arcillositas
Pozo de Observación EX-4	Cuaternario	Aluvial - Diluvial	0-6	Arcilla suave de color café
			6-71	Arena y grava Guijarro de f 0.5-1.0cm
			71-74	Arcilla
			74-84	Arena
			93-122	Arena y grava. Guijarro de f2.5cm.
	Terciario	Formación Regadera	122-150	Arenisca

Fuente: Equipo de Estudio JICA

Características del Acuífero Cretáceo

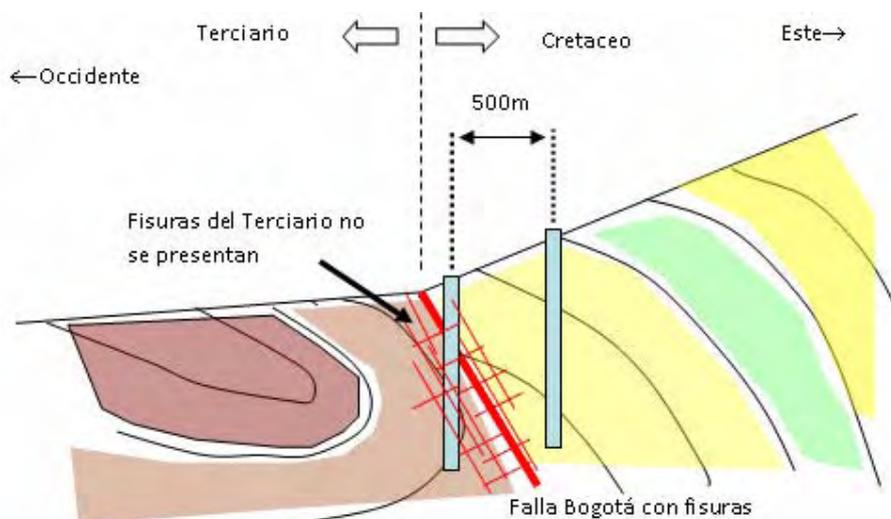
Es bien sabido que la falla de Bogotá yace entre los grupos Cretáceo y Terciario de los Cerros Orientales. El pozo exploratorio EX-3 (Usme) se ubica justamente arriba de la falla de Bogotá. Se esperaba que la arenisca del Cretáceo alojara agua subterránea suficiente dada la cantidad de fisuras desarrolladas a lo largo de las fallas de Bogotá. Sin embargo, con las perforaciones exploratorias del EX-3, se hizo claro que la estructura geológica del lugar es complicada tal como se muestra en la Figura-2.3-32. Bajo la arenisca del Cretáceo, se distribuyen rocas del Terciario por el efecto de la falla reversa (falla de Bogotá). Las rocas del Terciario consisten principalmente de arcillolitas, las cuales tienen una baja permeabilidad, resultando en una baja productividad de agua subterránea. De acuerdo a los resultados de la perforación exploratoria del pozo EX-3, se concluyeron las siguientes condiciones hidrogeológicas:

- La arenisca del Cretáceo, la cual se distribuye al oriente de la falla de Bogotá, es un excelente acuífero en los Cerros Orientales.
- La falla de Bogotá es definitivamente una falla reversa. La falla reversa causará que la perforación encuentre rocas Cretáceas a poca profundidad y rocas Terciarias a gran profundidad. Esto significa que el estrato más antiguo recubre el estrato más joven.
- Es deseable localizar los puntos de perforación lo más lejos posible, al oriente de la falla de Bogotá. De acuerdo al ejemplo de la perforación exploratoria en Vitelma, los puntos de perforación ubicados a más de 500 m al oriente de la falla de Bogotá pueden librarse del efecto de la falla reversa (Figura-2.3-33).



Fuente: Llanopozos, Equipo de Estudio

Figura-2.3-32 Estructura Geológica del Sitio EX-3



Fuente: Equipo de Estudio JICA

Figura-2.3-33 Localización de Pozos Recomendados

(3). **Resultados de las Pruebas de Calidad de Agua**

La Tabla-2.3-11 y 2.3-12 presentan los resultados de las pruebas de calidad de agua realizadas durante el estudio, en el pozo exploratorio JICA EX-6 Ciudad Bolívar y en el pozo EX-3 Usme Cervecería Alemana.

Tabla-2.3-11 Calidad del Agua en el Pozo EX-6 Ciudad Bolívar

Ítem	Unidad	Resultado	Estándares Colombianos
			Decreto 1575/2007 y 2115/2007
Alcalinidad	mg/L	137	200
Ca	mg/L	13,394	60
Cl	mg/L	1,00	250
Color	UPC	38	15
Conductividad	µS/cm	270	1000
Dureza	mg/L	19	300
Fe	mg/L	2,002	0.3
MG	mg/L	1,438	36
Mn Total	mg/L	0,041	0.1
pH	—	7,04	6,5 – 9,0
TDS	mg/L	206	-
SO ₄	mg/L	ND	250
Turbiedad	UNT	9,2	5

Fuente: Equipo de Estudio JICA. Subcontrato con el Laboratorio del Acueducto, Mayo 2008.

Tabla-2.3-12 Calidad del Agua en el Pozo EX-3 Usme Cervecería Alemana

Ítem	Unidad	Resultado	Estándares Colombianos
			Decreto 1575/2007 y 2115/2007
Alcalinidad	mg/L	60	200
Ca	mg/L	15,82	60
Cl	mg/L	2,60	250
Color	UPC	47	15
Conductividad	μS/cm	138	1000
Dureza	mg/L	33	300
Fe	mg/L	5,355	0.3
MG	mg/L	1,869	36
Mn Total	mg/L	0,137	0.1
pH	—	8,02	6,5 – 9,0
TDS	mg/L	103	-
SO ₄	mg/L	1	250
Turbiedad	UNT	48	5

Fuente: Equipo de Estudio JICA. Subcontrato con el Laboratorio del Acueducto, Mayo 2008.

Los siguientes ítems excedieron el estándar de calidad de agua:

1) Coloración

Adicional al olor y sabor, la coloración tiene un impacto sobre la percepción de la calidad del agua. Un alto grado de coloración limita efectivamente el grado de uso del agua. El estándar de la fuente (asumiendo cloración antiséptica) es de 20 TCU, de acuerdo al laboratorio del Acueducto.

2) Fe y Mn

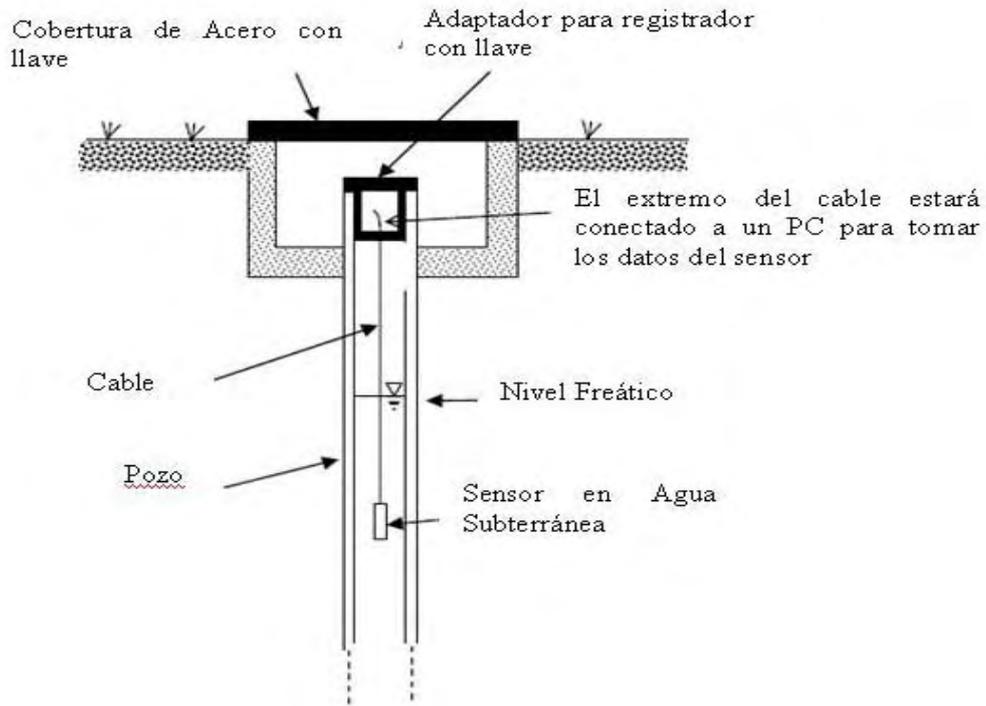
Las concentraciones detectadas de Fe y Mn exceden los estándares de calidad de agua. Es claro que tanto el Fe como el Mn son el reflejo de las características geológicas. Estos resultados son iguales a los obtenidos en el estudio JICA anterior. Sin embargo, este no es un caso especial de calidad de agua de pozo. Las concentraciones detectadas presentan un rango de valores con tendencia a exceder los estándares. Los métodos para tratarlos son: oxidación, oxidación-reducción ó absorción. Los detalles de los métodos de tratamiento serán diseñados en el Estudio de Factibilidad.

En general, la calidad del agua de estos pozos exploratorios es buena, aunque exhiben altas concentraciones de Fe y Mn.

(4). Instalación de Registradores Automáticos de Nivel Freático

Los registradores automáticos de nivel freático fueron instalados en dos pozos exploratorios y en un pozo de observación. El nivel freático de estos tres pozos será continuamente medido por los registradores automáticos.

- La estructura del pozo con el registro automático se muestra en la Figura-2.3-34.
- El Acueducto continuará con el mantenimiento y el monitoreo de los registradores.



Fuente: Equipo de Estudio JICA

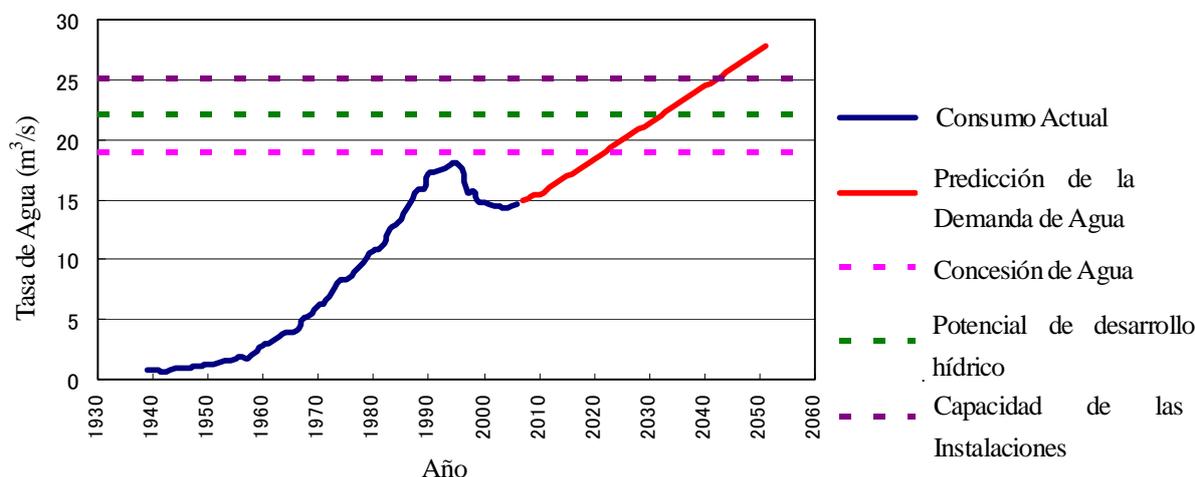
Figura-2.3-34 Estructura de los Pozos de Observación

CAPÍTULO 4. ASPECTOS DEL PLAN MAESTRO ACTUAL DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

4.1. Plan Maestro Actual

(1) Proyección de la demanda de agua

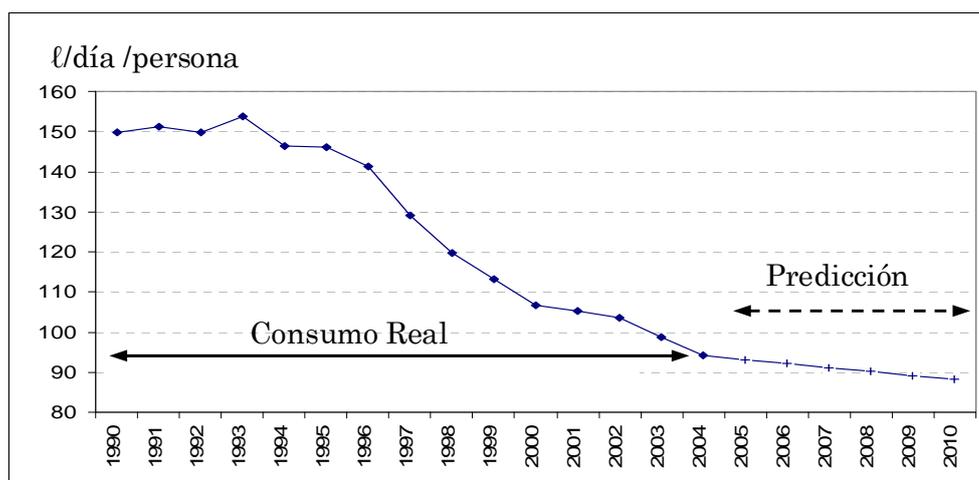
El consumo real de agua y la demanda estimada para el futuro se muestran en la Figura-2.4-1. El consumo unitario real para uso doméstico se muestra en la Figura-2.4-2.



Fuente: Acueducto, Plan de Expansión de Abastecimiento de Agua, 2005.

Figura-2.4-1 Consumos Real de Agua y Demanda Estimada

La conducción del agua proveniente del Sistema de Chingaza fue interrumpida durante 9 meses en 1997 a causa de un colapso en el túnel de conducción de agua desde el Embalse de Chuza. A este acontecimiento se le denominó la “Crisis de Chingaza”. El consumo de agua se redujo dramáticamente durante este periodo. Después de la crisis, el Acueducto redujo la presión del abastecimiento de agua, subió la tarifa de consumo y realizó una campaña para ahorrar agua. Como resultado, el consumo de agua se redujo a 89 ℓ/día/persona en el 2006, 60% del consumo a principios de los 90s de 150 ℓ/día/persona. Superada la “Crisis de Chingaza”, el consumo actual de agua en Bogotá se sigue manteniendo en un nivel bajo.



Fuente: Acueducto, Estudio, Revisión y Ajuste del Modelo de Proyección de Demanda de Agua para la Ciudad de Bogotá, y los Municipios vecinos.

Figura-2.4-2 Consumo Unitario de Agua para uso Doméstico y su Predicción

La población de Bogotá está creciendo constantemente, a una tasa de crecimiento anual de 2,9% entre 1996 y el 2006. Contrastando la tasa de crecimiento poblacional, la tasa de consumo de agua se

encuentra en constante decrecimiento. Como resultado, el consumo total de agua actual sigue decreciendo y se estima que la tasa de consumo unitario será menor o casi constante después del 2006 como se muestra en la Figura-2.4-2. Como resultado, se espera que el consumo total aumente después del 2007 porque el crecimiento poblacional será más dominante que el efecto de disminución en la tasa de consumo unitario.

(2) Plan Maestro (P/M versión 1995)

El Acueducto formuló el Plan Maestro de Expansión del Sistema de Abastecimiento en 1995, formulado antes de la “Crisis de Chingaza”. La capacidad de producción de agua del Acueducto en ese momento era de 25 m³/s y la demanda de agua era de 18 m³/s. Se estimó que la demanda de agua excedería la capacidad de producción de agua en el 2005, por lo que el desarrollo de nuevos recursos de agua fue considerado necesario a partir del año 2005. Con base en esta estimación se propusieron proyectos para el desarrollo de nuevos recursos de agua, tal como se muestra en la Tabla-2.4-1. Sin embargo, la demanda estimada fue mucho más alta que el consumo real a causa de la “Crisis de Chingaza” en 1997. Después de la crisis, el consumo de agua ha sido controlado por el Acueducto.

Tabla-2.4-1 Proyecto de Desarrollo de Recursos Hídricos en P/M en 1995

Proyecto		Agua a desarrollar	Inversión (Millones US\$)
Expansión de Chingaza		5,0 m ³ /s	250
Regadera II		1,2 m ³ /s	100
Sumapaz	Cuenca alta Sumapaz	10 m ³ /s	500
	Cuenca baja Sumapaz	17 m ³ /s	800

Fuente: Acueducto, Plan Maestro de Abastecimiento de Agua para Santa Fe de Bogotá, 1995.

(3) Plan Maestro (P/M) Revisado (2005)

El Acueducto revisó el P/M (versión 1995) en el 2005. El consumo de agua en Bogotá D.C. se redujo fuertemente después de la “Crisis de Chingaza”, desde entonces el Acueducto controló la demanda posterior a la crisis, manteniendo el consumo en un nivel más bajo. El P/M revisado en el 2005 fue el sucesor de los proyectos propuestos por el viejo P/M. Sin embargo, el comienzo de los proyectos propuestos por el viejo P/M son programados para el año 2028 porque la demanda real del agua era inferior a la prevista. Los proyectos propuestos por el P/M revisado fueron clasificados en tres categorías como se muestra en la Tabla-2.4-2.

Tabla-2.4-2 Proyectos Propuestos en el P/M Revisado (2005)

Proyectos y Periodo	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045
1) Estrategia Básica y Diseño (2005-2020)	—	—	—						
2) Optimización del sistema de abastecimiento de agua (2021-2028)				—	—				
3) Expansión del sistema de abastecimiento de agua (2029-2050)					—	—	—	—	—

Fuente: Acueducto, Plan de Expansión de Abastecimiento de Agua, 2005.

Los proyectos propuestos en el P/M se explican a continuación:

1er Periodo (2005-2020): Estrategia Básica y Diseño

El contenido de la Estrategia Básica y Diseño durante 2005-2020 se muestra en la Tabla-2.4-3. Estos proyectos consisten en varios tipos de trabajos tales como estudios de campo, diseños y trabajos de construcción para prepararse para la próxima etapa: Optimización del Sistema de Abastecimiento de Agua (2021-2028) y Expansión del Sistema de Abastecimiento de Agua (2029-2050). El desarrollo del agua subterránea está incluido en éste periodo.

La importancia del desarrollo de agua subterránea propuesto en el P/M se resume de la siguiente

manera:

- El desarrollo de agua subterránea en la ciudad de Bogotá tiene como objetivo el abastecimiento suplementario de agua para mitigar la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento, que depende de fuentes de agua superficiales en lugares distantes.
- Se espera tener agua subterránea como fuente de agua emergente en caso de una escasez debida a la vulnerabilidad del sistema actual de abastecimiento.
- El abastecimiento mediante agua subterránea debe ser implementado independientemente del abastecimiento de agua regular (agua superficial). Esto porque el abastecimiento mediante agua subterránea puede compensar la vulnerabilidad del abastecimiento regular.

Tabla-2.4-3 Estrategia Básica y Diseño Durante 2005-2020

Actividad	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
a) Sistema de Abastecimiento de Agua																
– Revisión del Plan Maestro de Abastecimiento																
– Operación de infraestructura																
– Medida de la capacidad de embalses																
b) Rehabilitación y Vulnerabilidad del Sistema Actual																
– Uso del sobreflujo de la represa de Chuza																
– Diseño de tubería de aducción entre la Regadera y El Dorado																
– Construcción de tubería de aducción entre la Regadera y El Dorado																
c) Optimización del Sistema Actual de Abastecimiento																
– Sistema de los ríos Tunjuelo y San Cristóbal																
– Diseño de la tubería de aducción entre La Laguna, y Vitelma																
– Diseño del uso del río San Cristóbal																
d) Sistema de Chingaza																
– Refuerzo del túnel transportador de agua																
– Estudio de la calidad del agua en el río Blanco																
– Estudio de la capacidad captación del río Blanco																
e) Red de tuberías de distribución principal																
– Interconexión de los sistemas de tuberías																
f) Expansión del sistema actual de abastecimiento de agua																
– Expansión de Chingaza																
– Estudio geológico y topográfico																
– Expansión de la Planta Wiesner																
g) Desarrollo del agua subterránea																

Fuente: Acueducto, Plan de Expansión de Abastecimiento de Agua, 2005.

2do Periodo (2021-2028): Optimización del sistema de Abastecimiento de Agua

Los proyectos propuestos para la optimización del Sistema de Abastecimiento de Agua se muestran en la Tabla-2.4-4. En estos proyectos no se desarrollarán nuevas fuente de recursos hídricos, pero se mejorarán las instalaciones actuales de abastecimiento para un uso óptimo. Con las mejoras a las instalaciones se producirá una cantidad total de 2,73 m³/s de agua.

Tabla-2.4-4 Optimización del Sistema de Abastecimiento de Agua

Nombre del Proyecto	Periodo de construcción (años)	Costo (2004/Agosto)	Flujo Producido (m ³ /s)	Volumen (m ³)	Vida del proyecto (años)
Expansión de tuberías de Regadera a la Planta La Laguna, Planta Vitelma, Represa Regadera, Planta La Laguna	2	7.168.000.000	0,95	1.497.960.000	50
Uso completo del Embalse de Tominé	2	63.409.000.000	1,48	2.333.664.000	50
Reciclaje del agua de lavado en la planta de tratamiento.	2	23.100.000.000	0,30	520.344.000	50

Fuente: Acueducto, Plan de Expansión de Abastecimiento de Agua, 2005.

3er Periodo (2029-2050): Expansión del Sistema de Abastecimiento de Agua

Los proyectos propuestos en el P/M en Abastecimiento de Agua se encuentran en la Tabla-2.4-5. En estos proyectos se desarrollarán nuevas fuentes de recursos hídricos. Una cantidad total de 17,82 m³/s serán producidos por los proyectos a continuación descritos. Como se muestra en la Tabla-2.4-5, los proyectos de expansión de recursos hídricos en el Sistema Chingaza tienen una alta prioridad.

Tabla-2.4-5 Expansión del Sistema de Abastecimiento de Agua

Prioridad	Sistema de Abastecimiento de Agua	Proyecto	Inversión	Flujo a asegurar	Precio Unitario del Agua	Flujo esperado con la concesión	Flujo Potencial
			Mill. US\$	m ³ /s	US\$/m ³	m ³ /s	m ³ /s
Abastecimiento Actual			-	-	-	17,84	21,04
1	Sistema Chingaza	Sobre Flujo de la represa de Chuza	5,30	0,10	0,053	17,94	21,14
2		Canal de agua Chuza norte, etapa 1-2	96,46	2,33	0,098	20,27	23,47
3		Canal de agua Chuza Norte, etapa-3	61,77	1,57	0,137	21,84	25,04
4		Embalse La Playa	59,11	1,05	0,121	22,89	26,09
5		Canal de agua Sur-oriental de Chingaza	65,19	1,08	0,122	23,97	27,17
6	Sistema Agregado Sur	Embalse La Regadera II	123,60	0,70	0,248	24,67	27,87
7	-	Canal de agua parte alta del río Sumapaz	756,45	7,58	0,261	32,25	35,45
8		Canal de agua parte media del río Sumapaz	1.109,26	17,82	0,680	42,49	45,69

Fuente: Acueducto, Plan de Expansión de Abastecimiento de Agua, 2005.

(4) Predicción de la Demanda de Agua a Largo Plazo

La demanda de agua a largo plazo en Bogotá D.C. se muestra en la Figura-2.4-.1. Por otro lado, la capacidad actual de las instalaciones de abastecimiento de agua del Acueducto se muestran en la Tabla-2.4-6.

Tabla-2.4-6 Derechos de Concesión de Agua y Capacidad de Producción de Agua del Acueducto (2007)

Sistema de Abastecimiento de Agua	Factor que Afecta el Uso de Agua				Producción Actual (m ³ /s)	Aumento Potencial en la Producción de agua (m ³ /s)
	Potencial Hidrológico (m ³ /s)	Capacidad para tratamiento ¹⁾ (m ³ /s)	Concesión de agua (m ³ /s)	Mínimo de (a), (b), (c)		
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(d)-(e)
(1) Chingaza	14,1	17,6	13,2	13,2	10,0	3,2
(2) Tibitóc	7,0	10,5	4,8	4,8	4,0	0,8
(3) Agr. Sur	0,9	2,1	1,0	0,9	0,5	0,4
Total	22,0	30,2	19,0	18,9	14,5	4,4

Fuente: Acueducto.

Nota -1) La capacidad de tratamiento de las plantas Vitelma y San Diego no están incluidas.

De acuerdo a la Tabla-2.4-6, la relación entre: potencial hidrológico, capacidad de tratamiento y derechos de concesión de agua es el siguiente:

$$\text{Concesión de Agua (19,0 m}^3\text{/s)} < \text{Potencial Hidrológico (22,0 m}^3\text{/s)} < \text{Capacidad de Tratamiento (30,2 m}^3\text{/s)}$$

Entre los tres factores mencionados, la cantidad de agua concedida es la de menor valor. Se estima que la demanda de agua excederá los derechos de concesión de agua en el 2022, el potencial hídrico

en el 2033 y a la capacidad de tratamiento en el 2042.

Como se aprecia en la Tabla-2.4-6, el desarrollo de nuevas fuentes de agua (construcción de instalaciones de captación de agua) y derechos adicionales de concesión de agua serían necesarios para alcanzar la capacidad máxima de la infraestructura actual.

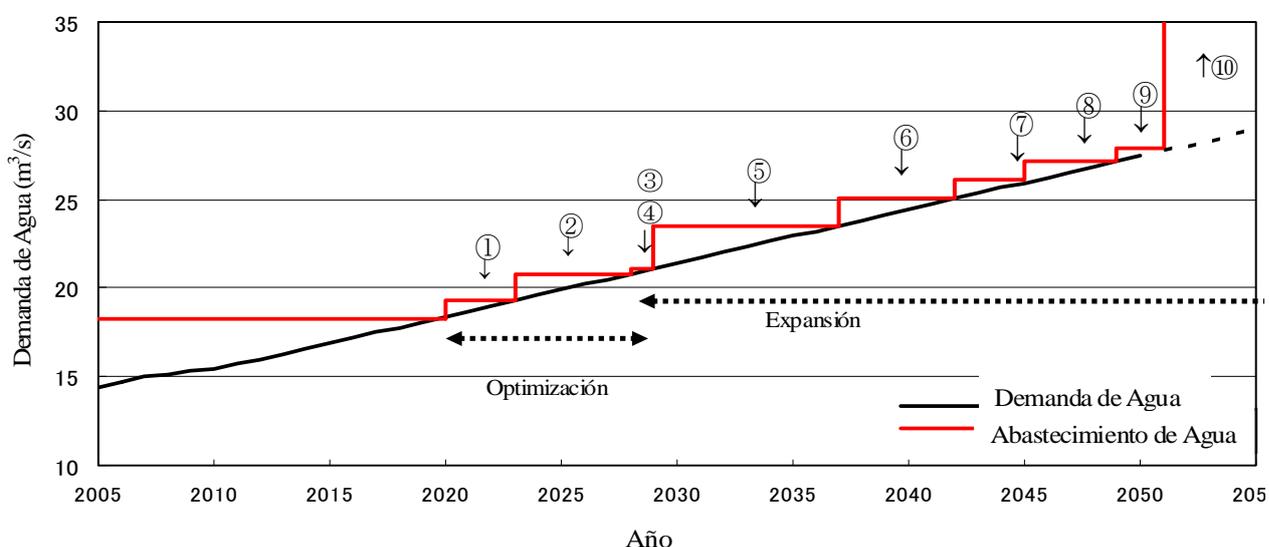
4.2. Revisión del Plan Maestro Existente

(1) Demanda de Agua y Desarrollo de Recursos Hídricos

El Acueducto tiene un Plan Maestro para la optimización y expansión del sistema de abastecimiento de agua. La relación entre la demanda y el abastecimiento de agua por éste proyecto se muestra en la Figura-2.4-3

(2) Cantidad y Costo del Desarrollo Hídrico

La relación entre cantidad y costo del desarrollo de recursos hídricos en los proyectos propuestos se muestran en las Figuras-2.4-4 y 2.4-5.



No.	Proyecto		No.	Proyecto		
Optimización	1	Laguna, Planta Vitelma, Embalse la Regadera y Planta La Laguna.	Expansión	6	Canal de Agua Chuza norte, etapa-3.	
	2	Uso Pleno del Embalse de Tominé.		7	Chingaza Embalse La Playa.	
	3	Reciclaje del agua de lavado en las plantas de tratamiento.		8	Canal de Agua Chingaza suroriental.	
		9		Sur Embalse la Regadera II.		
	4	Chingaza Sobre flujo del Embalse de Chuza.		10	Sumapaz Canal de agua parte alta del	Canal de agua parte alta del Sumapaz.
						11
	5	Canal de agua Chuza norte, etapa 1-2.				

Fuente: Equipo de Estudio JICA analizado con base en el P/M del Acueducto (2005)

Figura-2.4-3 Demanda y Abastecimiento de Agua

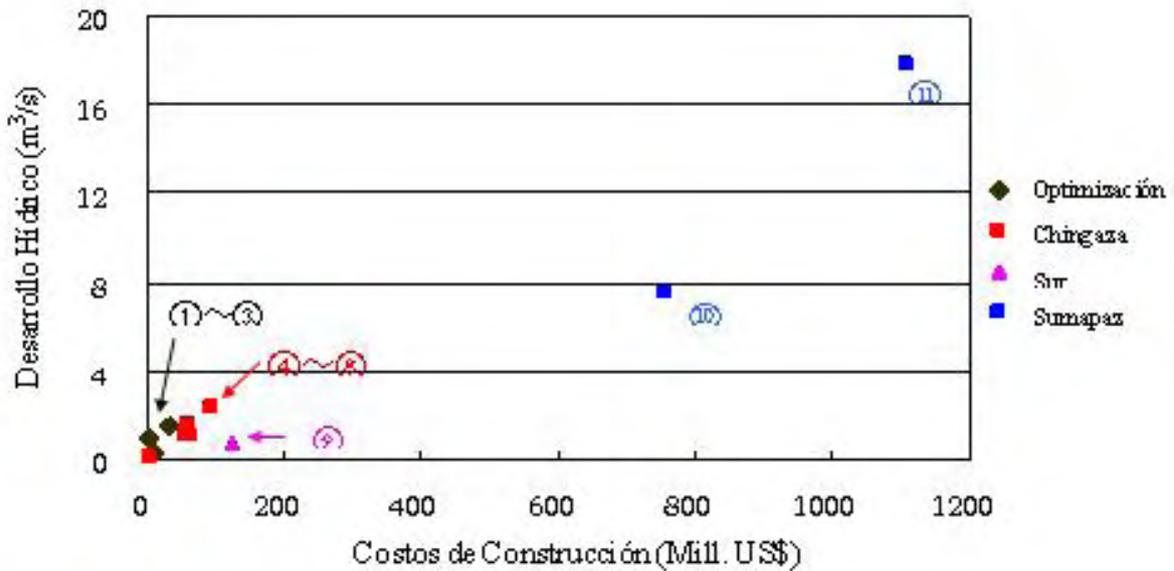
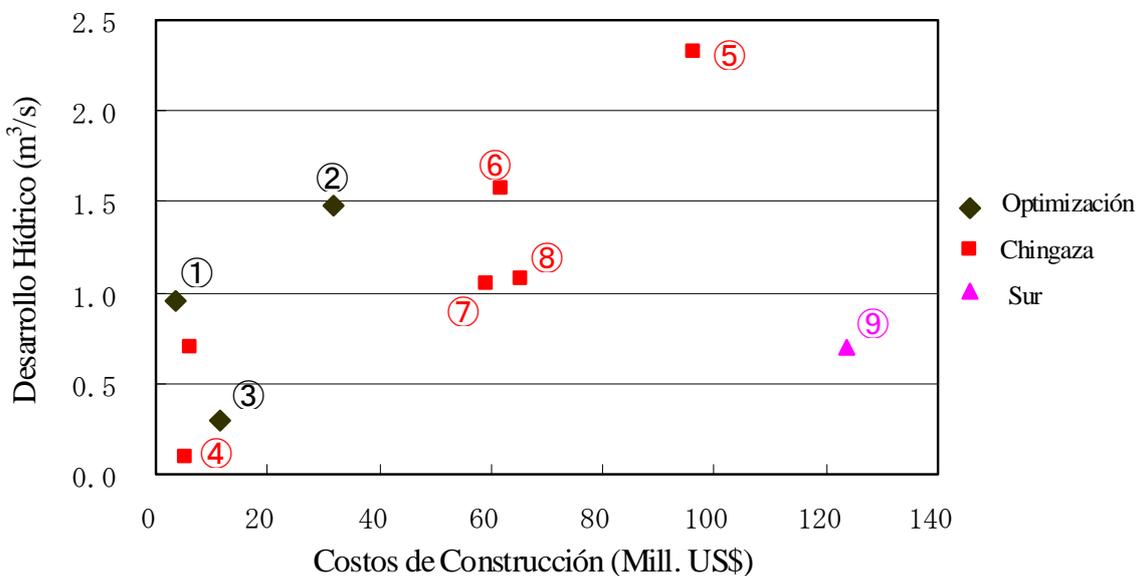


Figura-2.4-4 Cantidad y Costos de los Proyectos (todos)

Nota: Los Números de Proyectos 1-11 son los mismos que en la Figura-2.4-3.

Fuente: Equipo de Estudio JICA analizado con base en el P/M del Acueducto (2005)



Nota: Los Números de Proyectos 1-11 son los mismos que en la Figura-2.4-3.

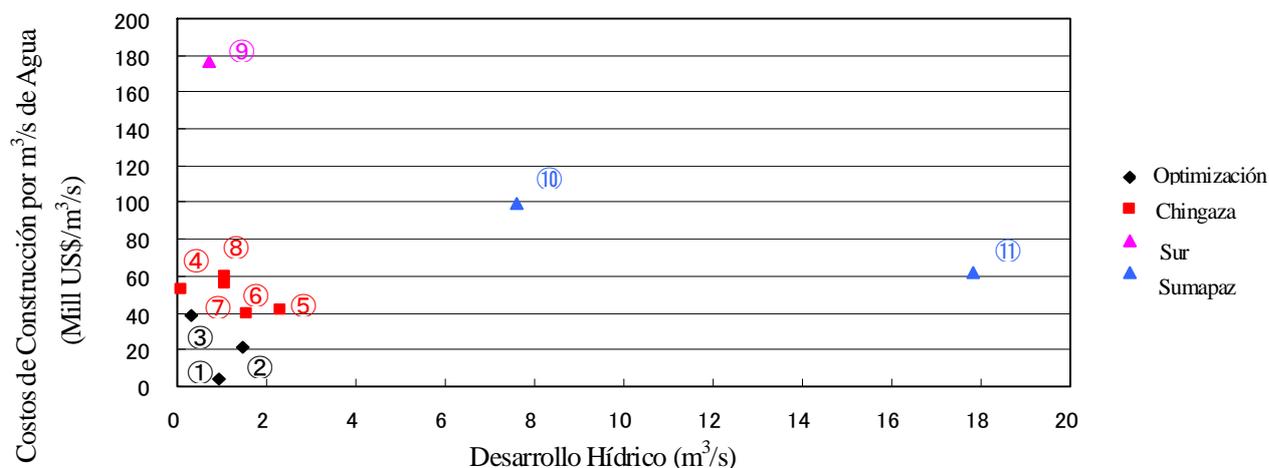
Fuente: Equipo de Estudio JICA analizado con base en el P/M del Acueducto (2005)

Figura-2.4-5 Cantidad y Costos del Desarrollo Hídrico (Optimización y Expansión)

Como se muestra en la Figura-2.4-4 los proyectos del Sumapaz son mucho más grandes, en cuanto a cantidad y costo que los otros proyectos. Al contrario, la Figura-2.4-5 muestra como los proyectos de optimización son más pequeños. El proyecto de expansión de Chingaza se ubica entre los dos proyectos en cuanto a magnitud.

(3) Eficacia Económica de los Proyectos

El costo del desarrollo hídrico por m³/s del proyecto se muestra en la Figura-2.4-6.



Fuente: Equipo de Estudio JICA analizado con base en el P/M del Acueducto (2005)

Figura-2.4-6 Eficacia Económica de los Proyectos

Es conocido que hay una escala de prioridades en cuanto al desarrollo de proyectos de recursos hídricos. Por lo general, el costo del desarrollo hídrico por m³/s disminuye a medida que el desarrollo hídrico aumenta. Sin embargo, la escala de prioridades no es clara en los proyectos propuestos como se muestra en la Figura-2.4-6.

- Comparando el proyecto de expansión de Chingaza y el proyecto de desarrollo en el Sumapaz, el primero es menor en desarrollo hídrico pero así mismo el de menores costos de construcción. Ambos proyectos requieren de la construcción de nuevas instalaciones. Sin embargo el túnel de conducción de agua existente (40 km de longitud) puede ser utilizado para los proyectos de expansión de Chingaza, esta es la razón por la cual los costos de Chingaza son menores.
- El proyecto de expansión de Chingaza consiste de 5 proyectos independientes. Cada proyecto puede ser implementado escalonadamente, siguiendo de cerca el aumento en la demanda de agua.
- El proyecto de optimización tiene el mayor beneficio económico porque no hay necesidad de realizar nuevas construcciones. Sin embargo, la cantidad de agua que se desarrolla es menor.
- El proyecto de desarrollo en el sur (nuevo embalse la Regadera) presenta el beneficio económico más bajo. Actualmente existen 3 embalses sobre el río Tunjuelo (la Regadera, Tunjuelo y Los Tunjos). Es por esto que la construcción de un embalse adicional sobre el río Tunjuelo presenta una eficiencia más baja.

(4) Cronograma de Implementación para la Expansión de Recursos Hídricos

El cronograma de implementación de los 11 proyectos para la expansión de recursos hídricos, el cual fue propuesto en el actual P/M del Acueducto, se encuentra estrechamente ligado a la creciente demanda de agua. En principio se espera que los proyectos con mayor eficiencia y menor costo se programen para comenzar primero y aquellos con menor eficiencia y mayor costo después. Una programación tal brindará una alta eficacia financiera.

4.3. Manejo de los Recursos Hídricos

El P/M existente fue revisado en éste Estudio desde cuatro puntos de vistas diferentes: i) manejo de la

cantidad, ii) manejo de la calidad, iii) manejo de la distribución del agua y iv) manejo del riesgo. Los resultados de la revisión se describen a continuación:

(1) Manejo de la Cantidad

Control de la Tasa de Abastecimiento de Agua

El porcentaje de cobertura del abastecimiento de agua en Bogotá D.C. es mayor al 90%. El consumo unitario promedio para uso domestico es de 89 ℓ/día/persona. En 1997 hubo una escasez de agua considerable denominada “Crisis de Chingaza”. Después de esto, el Acueducto ha controlado el consumo de agua mediante tarifas altas de consumo, reducción de la presión y campañas para ahorrar agua. Como resultado, el consumo de agua se redujo de 150 ℓ/día/persona en 1992 a 89 ℓ/día/persona el 2006 en promedio. Esta tasa de consumo es mucho menor que la de otras capitales Latinoamericanas. Para lograr un abastecimiento de agua más eficiente, el Acueducto ha implementado las medidas que se explican a continuación:

Medidas Para el Agua No-Contabilizada

El porcentaje actual de agua no-contabilizada se estima en un 38%. El Acueducto realiza detección de fugas de agua en sus tuberías para remplazar las tuberías averiadas. De acuerdo al Acueducto, el porcentaje de fugas de agua es del 12%, el cual es mucho menor al que se presenta en otras capitales Latinoamericanas. Se espera que el porcentaje de escapes de agua se mantenga en un nivel bajo en el futuro dados los continuos esfuerzos del Acueducto.

(2) Manejo de la Calidad

(a) Calidad del Agua Superficial

El abastecimiento actual del Área Metropolitana de Bogotá depende de fuentes de agua superficiales. Existen tres sistemas de abastecimiento de agua los cuales obtienen su agua de ríos y la tratan en sus plantas de purificación. La calidad del agua tratada alcanza los estándares de calidad en Colombia. El control de la calidad del agua que se aplica actualmente en los tres sistemas de abastecimiento se presenta en la Tabla-2.4-7.

Tabla-2.4-7 Situación Actual del Control de Calidad del Agua

Sistema de Abastecimiento	Ríos Fuentes de Agua	Control de la Calidad del Agua
a) Chingaza	-Chuza -Guatiquía -Blanco	Los Ríos se ubican dentro de Parques Naturales Nacionales. Cualquier actividad que produzca un impacto en la calidad de agua de los ríos está prohibida, esto mantiene el agua de los ríos limpia. El Acueducto adelanta proyectos para conservar la calidad del agua en el área.
b) Tibitóc	-Bogotá	La CAR está encargada del control de la calidad del agua del Río Bogotá fuera de Bogotá D.C., incluyendo el punto de captación del Acueducto en la Planta de Tibitóc. El deterioro de la calidad del agua en el Río Bogotá es más seria que en otras Fuentes de agua.
c) Agregado Sur	-Tunjuelito	No se presentan actividades que impacte la calidad del agua en la parte alta del Río Tunjuelito, donde el Acueducto capta agua para Abastecimiento. El Acueducto adelanta proyectos en el área para mantener el agua del río en óptimas condiciones.

Fuente: Equipo de Estudio JICA

El agua del Río Bogotá se usa para diversas actividades, por lo tanto existen varios puntos de captación y de drenaje. La calidad del agua del Río Bogotá presenta un mayor deterioro que otras fuentes de agua. En el área de captación de la Planta de Tibitóc, la calidad del agua del Río Bogotá está bajo el control de la CAR. La CAR se encuentra actualmente operando 24 plantas de tratamiento de aguas residuales en diferentes sitios sobre la parte alta del Río Bogotá, donde el grado de contaminación se encuentra actualmente dentro de los límites estipulados en los estándares de calidad del agua. Sin embargo, con el aumento de la carga de polución en un futuro cercano, se estima que la capacidad de las plantas de tratamiento actuales no será suficiente para mantener los estándares. El futuro de la calidad de agua del Río Bogotá esta en manos de la CAR.

(b) Calidad del Agua Subterránea

El manejo de la calidad del agua en el Área de Estudio se realiza de la siguiente manera:

Calidad del Agua Subterránea en el Acuífero Cuaternario

El agua subterránea del acuífero Cuaternario presenta una alta concentración de materiales orgánicos, donde una purificación a gran escala es necesaria para hacerla apta para consumo humano. Por lo tanto, el agua subterránea del acuífero Cuaternario se usa principalmente para fines agrícolas. El material orgánico proviene de las características geológicas del acuífero y no de la polución artificial. Actualmente, una gran cantidad de agua es extraída del acuífero Cuaternario, sin embargo no se ejecutan medidas para conservar la calidad del agua subterránea.

En años recientes, la SDA selló los pozos que no estaban en operación dentro del área urbana de Bogotá. Esta medida se toma para proteger el agua subterránea contra la contaminación a través de éstos pozos. Esto se puede considerar como una actividad de manejo de la calidad del agua.

Agua Subterránea en el Acuífero Cretáceo

La calidad del agua del acuífero Cretáceo es buena, es decir apta para consumo. Sin embargo, en la actualidad el agua subterránea no es extraída del acuífero Cretáceo en los Cerros Orientales y Sur. Por lo tanto, hasta el momento no hay informes de polución en el acuífero dentro del Área. Cualquier actividad de nuevos desarrollos en el área de protección forestal de los Cerros Orientales esta prohibida de acuerdo a la regulación del 2004. Ésta regulación contribuye a la conservación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero Cretáceo, el cual se recarga principalmente por la lluvia. Esto se puede considerar como una actividad para el manejo de la calidad del agua.

(3) Distribución del Agua

(a) Derechos de Concesión de Aguas Superficiales

Los derechos de concesión de agua para el Acueducto se dividen en dos categorías: Cuenca del Río Bogotá y otras Cuencas.

Derechos de Concesión de Agua en la Cuenca del Río Bogotá

La producción de agua en la Planta Tibitóc cuenta por el 30% del abastecimiento total del Acueducto. El agua del Río Bogotá no se utiliza únicamente para abastecimiento, también se usa para la agricultura y usos industriales. Recientemente, la concesión de agua para uso agrícola ha aumentado. Teniendo en cuenta ésta tendencia, la posibilidad de aumentar el volumen de concesión del río Bogotá para el Acueducto en el futuro es baja. El volumen de concesión para la captación de la Planta Tibitóc se encuentra pendiente en la corte entre la CAR y el Acueducto desde el 2002.

Derechos de Concesión de Agua fuera de la Cuenca del Río Bogotá

El Acueducto planea desarrollar nuevos recursos hídricos fuera de la cuenca del Río Bogotá, tales como las cuencas de los ríos Sumapaz y Chingaza. Los derechos de concesión de agua para estas cuencas lo establecen la UAESPNN, CORPOGUAVIO y CORPOORINOQUIA. El Acueducto tiene actualmente los derechos de concesión de agua otorgados por estas entidades para su uso. Considerando las buenas relaciones entre el Acueducto y éstas tres entidades, existe una alta probabilidad que nuevas concesiones de agua sean otorgadas.

Precio de los Derechos de Concesión de Agua

Antiguamente, el Acueducto pagaba a la CAR entre Col\$ 120-150/m³ por los derechos de concesión para captar agua para abastecimiento. Sin embargo, el precio de la concesión decreció bruscamente en el 2006 a Col\$ 0,56/m³. Este precio subirá gradualmente cada año durante los próximos 10 años, comenzando desde el precio mínimo de concesión (Col\$ 0,56/m³). El precio será determinado por negociaciones entre las entidades ambientales (CAR y SDA) y los usuarios del agua (como el Acueducto).

(b) Derechos de Concesión de Aguas Subterráneas

El agua subterránea en los Cerros Orientales y Sur de Bogotá tiene potencial como nueva fuente de agua para abastecimiento. La CAR y la SDA tienen la autoridad para otorgar los derechos de concesión de agua en sus respectivas jurisdicciones. El otorgamiento de la concesión depende del desarrollo potencial estimado de agua subterránea. Los derechos de concesión serán otorgados a los

usuarios si la CAR y la SDA determinan que el potencial de desarrollo de agua subterránea en el área es lo suficientemente grande como para su desarrollo. Por otro lado, cualquier actividad incluyendo el desarrollo de recursos hídricos está prohibida en el área de protección forestal de los Cerros Orientales (aproximadamente por encima de 2.700 m.s.n.m.). Por consiguiente, el desarrollo de aguas subterráneas deberá realizarse fuera del área de protección. El área de los Cerros Sur no presenta restricciones de protección forestal.

(4) Manejo del Riesgo

De acuerdo al P/M del Acueducto (2005), el desarrollo de recursos hídricos en el Área de Chingaza es un proyecto de alta prioridad para satisfacer la demanda futura de agua. La excelente calidad del agua en el área contribuye a disminuir los costos de operación (en cuanto a tratamiento), comparado con los otros sistemas de abastecimiento. Adicionalmente existen una gran cantidad de recursos hídricos en el área. Como resultado el Sistema Chingaza cubre el 70% del total de agua abastecida por el Acueducto, presentando los costos de operación más bajos de todo el Sistema de Abastecimiento. En la actualidad la capacidad de conducción de agua en el Sistema Chingaza excede la cantidad de agua conducida, por lo cual es apto para una futura expansión. Es claro que en el futuro el Sistema Chingaza aumentará su importancia en el abastecimiento de agua.

Por otro lado, el agua del Sistema Chingaza es conducida 40 km a través de la montaña mediante un túnel, el cual es vulnerable a desastres naturales tales como un terremoto. El túnel de conducción de agua pueda colapsar, como en la “Crisis de Chingaza” en 1997 y el abastecimiento de agua puede verse interrumpido. La expansión del Sistema Chingaza aumentará la vulnerabilidad del abastecimiento de agua. Para mitigar esta vulnerabilidad, se proponen las medidas que se muestran en la Tabla-2.4-8.

Tabla-2.4-8 Medidas Para el Abastecimiento de Agua en Caso de Emergencia

Medidas		Contenido
Medidas en hardware	Mejoramiento de las estructuras sismorresistentes	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño y refuerzo de estructuras sismorresistentes de las instalaciones de abastecimiento de agua, tales como embalses, tuberías, tanques y demás.
	Fuentes alternativas de Agua en caso de emergencia.	<ul style="list-style-type: none"> • Re-apertura de plantas de purificación cerradas. • Aumento temporal de la producción de agua de las plantas actuales. • Desarrollo de nuevas fuentes de agua (como aguas subterráneas).
Medidas en software	Establecimiento del Sistema Emergente de Abastecimiento de Agua	<ul style="list-style-type: none"> • Preparación de un manual de abastecimiento de agua de emergencia. • Establecimiento de un sistema de control centralizado para las instalaciones de abastecimiento de agua para responder a la emergencia.

Fuente: Equipo de Estudio JICA

Los estudios anteriores han concluido que el daño ocasionado por un terremoto sería el más grave entre otros desastres naturales en el Área de Estudio. El daño que puede causar un gran terremoto sobre las instalaciones de abastecimiento de agua ha sido analizado en estudios previos. El Acueducto se prepara para responder a estas emergencias en aspectos de hardware y software como se explica a continuación.

A partir del estudio del Acueducto en el 2006 se propusieron varios tipos de medidas, principalmente diseños y refuerzos sismorresistentes para las instalaciones de abastecimiento de agua. Sin embargo, es importante desarrollar fuentes alternativas de agua cerca del Área Metropolitana de Bogotá y establecer un sistema de abastecimiento emergente utilizando estas fuentes. También es importante realizar un mantenimiento continuo a las obras de refuerzo sísmico. La incorporación de todas las medidas será de gran eficiencia para el abastecimiento de agua en caso de emergencia.

4.4. Propuestas al P/M del Acueducto

1) Los proyectos propuestos en el P/M están programados para comenzar después del 2029. Se le da

una alta prioridad a los proyectos de expansión de fuentes de agua en el Sistema Chingaza. El sistema cuenta con suficiente capacidad extra para la conducción de agua. Por lo tanto, no es necesario construir un nuevo sistema de conducción para el Sistema Chingaza. Las fuentes de agua del Sistema Chingaza se encuentran en áreas de gran elevación, lo que permite que el agua sea conducida y distribuida por la gravedad a un bajo costo. Además, la excelente calidad de las fuentes de agua contribuye a disminuir los costos de tratamiento. Teniendo en cuenta las condiciones favorables descritas anteriormente, es evidente que la expansión del Sistema Chingaza presenta varias ventajas sobre los proyectos en otras áreas, desde cualquier punto de vista.

- 2) Por otro lado, el transporte de agua desde el Sistema Chingaza hacia el Área Metropolitana de Bogotá se hace a través de las montañas por un túnel de 40 km de longitud. Existe un alto riesgo de interrupción en la conducción de agua debido al colapso del túnel, como se estableció con la “Crisis de Chingaza” (1997). Por lo tanto los sistemas Tibitóc y Agregado Sur son menos vulnerables que el Sistema Chingaza, desde el punto de vista del mantenimiento del sistema de conducción de agua y su distribución.
- 3) El Sistema Chingaza abastece de agua al 70% del Área Metropolitana de Bogotá. De acuerdo al P/M del Acueducto, el abastecimiento de agua por el Sistema Chingaza se expandirá en el futuro. Por lo tanto, el riesgo de una interrupción en la conducción de agua desde el área de Chingaza se aumentará en el futuro próximo. Como contramedida ante esta posible situación, se deben preparar proyectos para el abastecimiento de agua en caso de emergencia de la siguiente manera:
 - a) Operación continúa de la Planta Tibitóc, y aumento de la producción de agua en caso de emergencia.
 - b) Preparación para la re-apertura de plantas de operación cerradas.
 - c) Desarrollo de aguas subterráneas en áreas marginales de Bogotá D.C. como fuente alternativa de agua en caso de emergencia.
- 4) El P/M del Acueducto será revisado en el 2008. Éste deberá ser cuidadosamente re-examinado cuando comiencen los proyectos propuestos en el P/M. Adicionalmente, el plan para el desarrollo de fuentes alternativas de agua para abastecimiento en caso de emergencia deberá ser incluido en el P/M.