

Estudio hidrogeofísico para caracterizar el acuífero del Jardín Botánico de Caracas

Antonio Ughi*, *Laboratorio de Interpretación del Subsuelo, Departamento de Geofísica, Universidad Central de Venezuela.*

Palabras clave: Resistividad, sondeo eléctrico vertical, Jardín Botánico de Caracas, hidrogeofísica.

Resumen

Se adquirieron 54 sondeos eléctricos verticales en un área inferior a 20 Ha. dentro del Jardín Botánico de Caracas mediante el método de saturación. Los resultados obtenidos revelan la presencia de gradación vertical de los tipos litológicos con variaciones en el contenido de finos, factor que controla de forma determinante el valor de resistividad del subsuelo. El modelo geológico para la zona está constituido por una estructura de roca metamórfica en forma de doble cuenca que alberga dos secuencias sedimentarias que constituyen dos acuíferos bien desarrollados pero es probable que a grandes profundidades no estén conectados, por lo que se reduce su capacidad de producción al limitarse su extensión lateral; sin embargo, la forma lenticular que los caracteriza implica que poseen gran desarrollo vertical con espesores que pueden variar entre 6 y 10 m.

Introducción

El Jardín Botánico de Caracas (J.B.C.) forma parte de la Ciudad Universitaria de Caracas (C.U.C.) y es un espacio

de 70 hectáreas destinado a la conservación y estudio de plantas autóctonas y extranjeras (Figura 1).

Está subdividido en dos secciones morfológicas: la zona de topografía plana, de 20 hectáreas aproximadamente, donde se encuentran las colecciones de palmas (Palmetum), árboles (Arboretum), lagunas y los jardines xerofítico, etnobotánico y el orquidiario, y la colina, que es una pequeña serranía de 920 m de altitud con pendientes de 13 a 15 % aproximadamente y que separa físicamente al Jardín Botánico del resto de la Ciudad Universitaria (Figura 1).

Tanto las colecciones de plantas como las instalaciones de investigación requieren de un suministro constante de agua para su mantenimiento y conservación, especialmente en la época seca que abarca los meses de octubre a mayo. Ocasionalmente el suministro de agua por tuberías resulta insuficiente, por lo que se requiere el uso de pozos para extracción de agua subterránea.



Fig. 1 Mapa de ubicación del área en estudio dentro del Jardín Botánico de Caracas delimitada con la línea de color rojo. La línea de color amarillo delimita el área norte de la Ciudad Universitaria de Caracas, los puntos blancos representan las coordenadas del punto medio de los SEV y el punto amarillo representa la localización del pozo exploratorio de agua.

Estudio hidrogeofísico en el Jardín Botánico de Caracas

Con el apoyo del Laboratorio de Geofísica Aplicada del Departamento de Geofísica de la UCV, se realizó una investigación en el área plana del Jardín Botánico con el propósito de evaluar las potencialidades de extracción de agua subterránea en el subsuelo de esa zona. La caracterización hidrogeofísica incluye la determinación del espesor y extensión del estrato saturado, su profundidad, existencia de otros acuíferos en la zona y la posibilidad que los mismos se encuentren interconectados.

Geología del área

A una escala subregional, la geología de la zona es bastante simple y está constituida por el Esquisto de Las Mercedes, descrita como roca metamórfica que sirve de basamento para la cobertura sedimentaria cuaternaria, constituida principalmente por aluviones. Sin embargo, a la escala local del estudio realizado, el ámbito geológico cambia notablemente y se torna más complejo.

El Esquisto de Las Mercedes está descrito como una asociación metamórfica de edad Jurásica a Cretácica y de origen calcáreo, con contenido de grafito y micas observables localmente (Acero y Domínguez, 2005). En un estudio a detalle realizado por Salcedo y Ortas (2004) sobre la fila de la Colina del Jardín Botánico, encontraron que la zona puede ser dividida en dos secuencias: en el tope se encuentra un intervalo de suelo de origen residual de 1 a 4,5 m de espesor constituido por arenas limosas y limos arena – arcillosas, caracterizadas por su color rojizo. Por debajo subyace la roca *in situ* constituida por esquistos cuarzo micáceos interfoliados con esquistos cuarzo calcáreos micáceos, que presentan mayor índice de meteorización hacia las mayores elevaciones del terreno. Esta estructura conforma la litología predominante de la colina y sirve además, de basamento para toda la secuencia sedimentaria que se depositó sobre él en las menores elevaciones del terreno, por la acción del río Guaire al norte de la C.U.C. y el río Valle al sur.

La cobertura sedimentaria de la cuenca, por su parte, es característica de un ambiente fluvial continental como se puede observar en las correlaciones estratigráficas realizadas con los datos de perforaciones para las obras del Metro de Caracas (Galavís, 1983). Del mismo modo, Acero y Domínguez (2005) sostienen que el río Guaire no ha sufrido grandes modificaciones en su cauce durante los últimos años a pesar del proceso de urbanización experimentado por la ciudad de Caracas, lo cual lo constituye en el principal agente de aporte de sedimentos en la zona del Jardín Botánico.

Estas condiciones de sedimentación han formado secuencias constituidas por acumulaciones de arena fina, que pueden tener un espesor de entre 1 y 10 m aproximadamente, intercaladas con estratos de arcilla o arcilla limosa, en forma de láminas o cuñas, con espesores de varios metros.

Embebidas entre estos estratos se encuentran estructuras en forma de lentes constituidos por arenas finas, arenas limosas y arenas con grava que suelen ser idóneos para la acumulación de agua subterránea, sobre todo si el lente en cuestión está rodeado por otro estrato de sedimentos más finos, como por ejemplo, una arcilla fina. En las secciones geológicas generadas por Galavís (1983) con datos de perforaciones, se observa que estas estructuras lenticulares tienen algunos metros de longitud, mientras que las láminas de arena o arcilla limosa pueden tener hasta 150 m de largo y poseen la peculiaridad que pueden mostrar variación lateral en el tamaño de grano, pasando desde arena en un extremo hasta arcilla o arcilla limosa en el otro.

La configuración geológica descrita anteriormente hace suponer que el sistema hidrogeológico que se encuentra en la zona de la Ciudad Universitaria de Caracas y el Jardín Botánico es bastante compleja desde el punto de vista estratigráfico, ya que es posible la presencia de diferentes tipos de acuíferos coexistiendo en la misma área. Por ejemplo, los lentes de arena y grava pueden estar conformando un sistema de “acuíferos colgados” almacenando el agua en zonas de poca extensión tanto vertical como lateral, mientras que las láminas de gran extensión lateral pueden estar formando acuíferos libres cerca de la superficie, motivado a la ausencia de una capa confinante de baja permeabilidad (arcilla o arena arcillosa) en el tope de la secuencia sedimentaria. Más aún, considerando que los estudios geotécnicos previos (Galavís, 1983; Salcedo y Ortas, 2004) han demostrado la existencia de variaciones laterales de la granulometría de los estratos, es factible también la existencia de acuíferos confinados por la presencia de estratos impermeables que rodean al estrato saturado.

Adquisición y procesamiento de datos

La adquisición se diseñó para lograr la mayor cantidad de sondeos eléctricos distribuidos de una manera uniforme a lo largo del área plana del Jardín Botánico. Este diseño se denomina saturación y tiene por propósito disponer de una alta densidad de información en espacios confinados, lo que permite construir mapas de propiedades físicas del subsuelo con un nivel de resolución elevado.

El diseño por saturación se contrapone a la clásica metodología de muestreo, en la cual se realiza una serie de sondeos diseminados (preferiblemente de manera uniforme) en grandes áreas. El inconveniente del muestreo es que dificulta la correlación lateral de la información geológico-geofísica, ya que los sondeos quedan muy distanciados unos de otros. Esta dificultad se hace particularmente importante cuando se requiere un estudio a detalle en zonas con gran variabilidad estratigráfica lateral, por tal razón el muestreo se suele utilizar sólo como método de exploración inicial.

Estudio hidrogeofísico en el Jardín Botánico de Caracas

El resultado del diseño por saturación para el J.B.C. fue la adquisición de 54 SEV distribuidos en un área inferior 20 hectáreas.

El procesamiento de los datos de SEV es bastante simple y se puede dividir en dos fases. En la primera se trabajó exclusivamente con los datos de resistividad aparente, con los que se generaron mapas de resistividad a diferentes profundidades calculadas con la fórmula empírica:

$$h = 0,3 * \overline{AB} \quad (1)$$

donde h es la profundidad estimada (dada en m) y \overline{AB} es la distancia máxima que separa a los dos electrodos de emisión de corriente.

Con estos mapas es posible visualizar la variación de la resistividad tanto lateral como verticalmente a lo largo del área en estudio.

En la segunda fase se utilizó el programa IPI2Win® para procesar los datos de resistividad aparente y generar las secciones de resistividad real o modelos geológicos del área estudiada. El procedimiento para procesar estos datos se sintetiza en la figura 2.

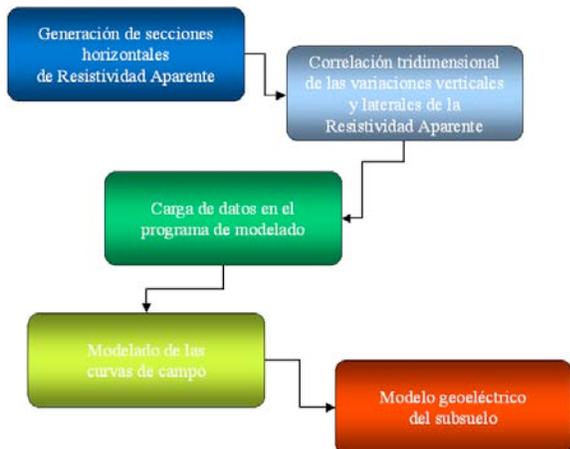


Fig. 2 Secuencia de procesamiento aplicada a los datos de resistividad.

Correlación geológico-geofísica

En el área del Jardín Botánico, se realizó en fechas recientes (Salcedo y Ortas, 2004), una perforación geotécnica de donde se extrajeron muestras de rocas que fueron posteriormente caracterizadas. La información aportada por esta perforación es de valiosa ayuda para correlacionar los resultados cuantitativos obtenidos mediante los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) con las realidades geológicas propias de la zona.

Esta correlación se realizó utilizando el SEV 22, el cual fue ubicado justo al lado del pozo (Figura 1) para poder

comparar las mediciones de resistividad del subsuelo con las litologías descritas en el mismo. En la figura 3 se sintetiza la información geológica y su respectiva correlación con los datos geoelectricos.

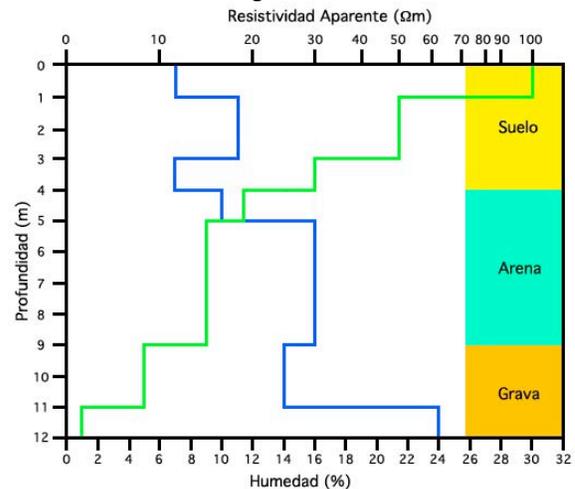


Fig. 3 Modelos 1D que correlacionan la información obtenida del pozo con los valores de resistividad. El modelo en verde corresponde a la resistividad aparente obtenida con el SEV 22 (escala superior logarítmica). El modelo en azul corresponde al porcentaje de humedad medido en el pozo (escala inferior lineal). A la derecha se muestra el modelo geológico generalizado para toda el área a partir de la información del pozo.

Gracias a esta información es posible complementar los datos geoelectricos con una visión geológica a todo lo largo del área estudiada.

Según los resultados que se derivaron de la perforación exploratoria, Salcedo y Ortas (2004) dividen la secuencia sedimentaria del subsuelo en dos grupos principales: un suelo arcilloso, ligeramente calcáreo, de color marrón negruzco, con un espesor de 4,5 m, particularmente húmedo en los dos primeros metros y con un porcentaje de arcillas y limos de 75%. Por debajo del primer grupo, se identificó un suelo constituido por arenas gravosas y gravas arenosas con fragmentos de cuarzo y gneises.

Un dato adicional y de gran importancia es que el nivel freático medido en el pozo se ubica a 7,90 m de profundidad, lo cual lo coloca en la parte basal de las arenas gravosas. Adicionalmente, el porcentaje de humedad muestra un incremento desde ese estrato hasta la arena fina descrita en la base del pozo a 12 m de profundidad.

Las referencias de mediciones piezométricas disponibles para la parte oriental del Campus de la C.U.C. (Galavís, 1983) indican que el nivel freático varía entre 4 y 7,4 m de profundidad y las litologías típicas en las que se forman los acuíferos son arenas con grava y arenas con limo.

Estudio hidrogeofísico en el Jardín Botánico de Caracas

Análisis de resultados

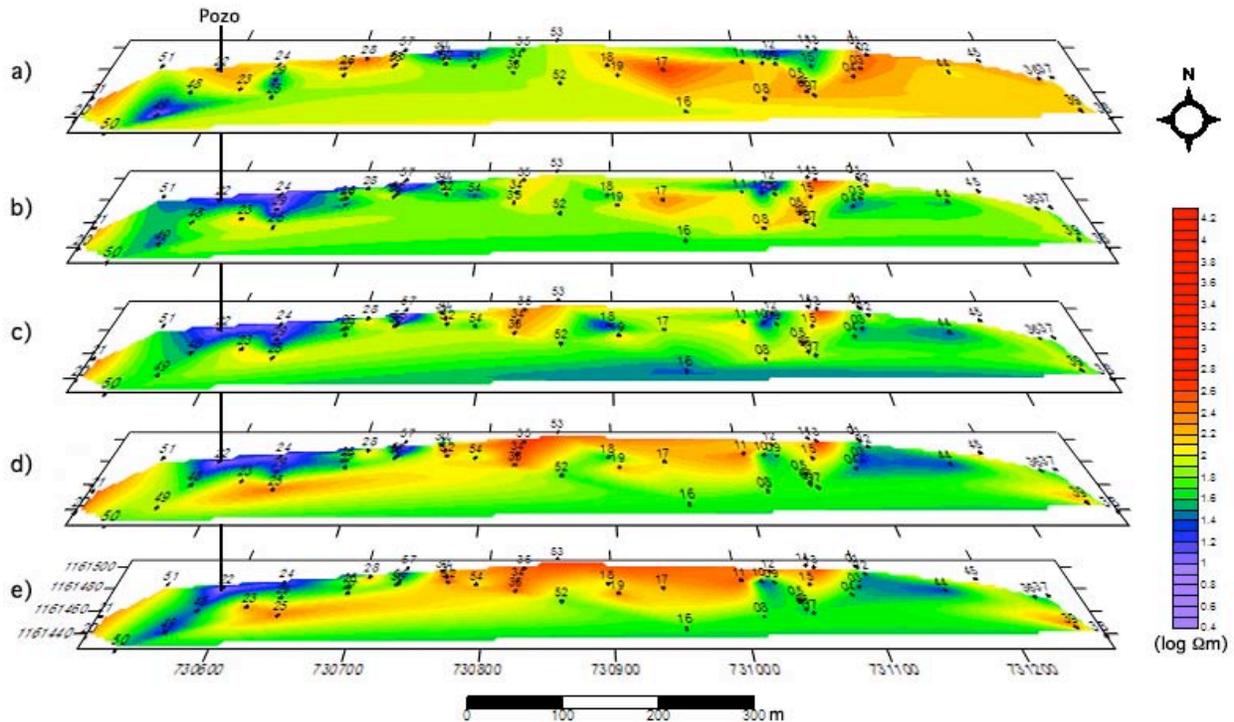
Mediante la ecuación (1) se estimaron cinco profundidades diferentes a 0,6m, 3m, 6m, 12m y 24 m (Figura 4) para evaluar las variaciones tanto verticales como laterales de resistividad.

El mapa de resistividad aparente a 0,6 m de profundidad (Figura 4a) muestra las características de un suelo arcilloso con presencia de zonas de alta y baja resistividad respondiendo directamente al mayor o menor contenido de finos y materia orgánica en la composición del mismo.

A 3m de profundidad (Figura 4b) el contenido de finos en la composición del suelo permanece alta pero disminuye la cantidad de materia orgánica, por lo que la resistividad es menor en casi toda el área si se le compara con la capa inmediatamente superior. En torno al SEV 22 se observa una sustancial disminución de los valores de resistividad. Al comparar este datos con la descripción litológica realizada en el pozo, la zona está caracterizada por un estrato de arena con grano fino y contenido de humedad

entre 2,7 y 15%. Por otra parte el resto del área está caracterizado por valores de resistividad intermedios que sugieren la presencia de estratos con mayor contenido de finos y menor contenido de humedad en el espacio intersticial.

En el mapa de la figura 4c que corresponde con una profundidad de 6 m se observa que la alternancia entre material con alto contenido de finos y arena se mantiene de forma silmilar para toda el área estudiada; sin embargo, la zona cercana al SEV 22 muestra como el acuífero presenta una geometría más definida. Utilizando el modelo geológico de la figura 3 y la descripción litológica del pozo se observa que a esta profundidad predominan las arenas mezcladas con gravas con un contenido de humedad de 16% al 18% y que se incrementa con la profundidad. Hacia la zona oriental (entorno a los SEV 03, 04 y 44) se observan también zonas con el mismo rango de resistividades lo que hace presumir la existencia de estratos saturados.



En la figura 4d (profundidad de 12 m) se observa que las bajas resistividades se han diferenciado en dos zonas

separadas, una al oeste en la localización del pozo y la otra al este en la localización de los SEV 03, 04 y 44. Entre

Estudio hidrogeofísico en el Jardín Botánico de Caracas

estas dos zonas se observa una estructura de alta resistividad, lo que hace presumir que los estratos saturados no están conectados lateralmente. Las litologías predominantes para estas profundidades son gravas y arenas con gravas con un contenido de humedad del 23%, lo que sugiere que estos estratos representan los acuíferos buscados.

La figura 4e muestra las variaciones de resistividad a 24 m de profundidad aproximadamente. Los valores de resistividad en la región central del mapa se incrementan hasta 16540 Ωm lo que sugiere que se trata de un estrato de naturaleza rocosa mas que sedimentaria y está separando a los dos acuíferos detectados. Se observa que el acuífero de la zona occidental se prolonga hacia el sur y hacia el este de la localización del pozo, mientras que el potencial acuífero de la zona oriental se muestra limitado tanto en su desarrollo vertical como lateral, lo que sugiere que puede tratarse de un lente de material granular grueso embebido en sedimentos de grano fino.

Conclusiones

Los resultados obtenidos revelan que el área plana del Jardín Botánico de Caracas presenta una gradación vertical de los tipos litológicos con variaciones en el contenido de finos, factor que controla de forma determinante el valor de resistividad del subsuelo. Esta gradación abarca desde arcillas de grano fino en la superficie hasta arenas y gravas a 12 m de profundidad, siendo este estrato el de mayor contenido de humedad. Las variaciones verticales de resistividad pudieron ser correlacionadas con los cambios litológicos, gracias a la existencia de información geológica proveniente de muestras de rocas extraídas de un pozo exploratorio que fue perforado en la parte noroccidental del área estudiada. Para facilitar la correlación se realizó un sondeo eléctrico vertical al lado del pozo de forma que se pudiera comparar el valor de resistividad medido con el perfil litológico, e incrementar de esta manera la certidumbre en el análisis final de los resultados.

Gracias a la densa malla de datos que se colectaron durante el trabajo de campo aplicando el método de saturación, constituida por 54 sondeos eléctricos verticales, se pudo generar un conjunto de mapas a diferentes profundidades que permitieron evaluar las variaciones verticales y laterales de la resistividad aparente a todo lo largo del área en estudio. Estos mapas revelaron la existencia de una zona de alta resistividad ($>10000 \Omega\text{m}$) ubicada en la parte central del área que la divide en dos regiones diferenciadas. La estructura resistiva se extiende verticalmente desde los 6 m de profundidad aproximadamente, hasta la base de la secuencia geológica y a medida que se incrementa la profundidad también incrementa su extensión lateral de forma que delimita los estratos sedimentarios de alto contenido de humedad. Estos estratos se pudieron identificar en los extremos de la

estructura resistiva desde una profundidad de 6 o 7 m hasta la base de la secuencia sedimentaria entre 15 a 30 m de profundidad aproximadamente, tienen una reducida extensión lateral y su forma está controlada por la geometría de la estructura resistiva central.

El estrato saturado de la región occidental fue alcanzado por el pozo exploratorio encontrando el nivel freático a 7,9 m de profundidad, lo cual correlaciona bastante bien con las resistividades observadas. En la región oriental se identificó un segundo estrato que se perfila como objetivo prospectivo ya que posee las mismas características de su vecino.

Correlacionando verticalmente los mapas de resistividad se esclarece la razón por la cual estos estratos de interés poseen un marcado desarrollo vertical más no lateral, ya que se puede inferir que poseen forma de lentes embebidos en estratos de menor resistividad (10 a 70 Ωm), posiblemente constituidos por arenas o gravas mezcladas con arcillas. Esta geometría coincide con la información disponible a partir de los estudios geotécnicos realizados durante la construcción de la línea 3 del Metro de Caracas.

Adicionalmente, se deduce que el estrato resistivo (probablemente roca metamórfica meteorizada) está fungiendo como basamento de la secuencia sedimentaria y, probablemente, sea la prolongación en profundidad del macizo rocoso que constituye la Colina del Jardín Botánico.

A partir de lo expuesto con anterioridad se puede plantear un modelo simplificado del subsuelo del J.B.C. constituido por una estructura de roca metamórfica en forma de doble cuenca que alberga dos secuencias sedimentarias que constituyen dos acuíferos bien desarrollados. A grandes profundidades es probable que estos acuíferos no estén conectados por lo que se reduce su capacidad de producción al limitarse su extensión lateral; sin embargo, la forma lenticular que los caracteriza implica que poseen gran desarrollo vertical con espesores que pueden variar entre 6 y 10 m.

Por otra parte, el método de adquisición por saturación demostró ser el más idóneo al momento de hacer estudios geofísicos en áreas reducidas, pero donde se requiere gran detalle y se dispone de poca información geológica. El incremento en el volumen de datos geofísicos compensa en gran medida la ausencia de información geológica y permite realizar análisis y generar modelos del subsuelo con un alto nivel de certidumbre. Sin embargo, la adquisición de un mayor número de sondeos geofísicos encarece en gran medida cualquier proyecto exploratorio por lo que a la hora de realizar el diseño de la adquisición, se debe establecer un equilibrio entre los objetivos del proyecto, la cantidad y calidad de la información que se desea obtener, el nivel de detalle que se requiere lograr

Estudio hidrogeofísico en el Jardín Botánico de Caracas

durante la etapa exploratoria y el costo total de la adquisición.

Referencias

Acero, B. y J. Domínguez, 2005, Estudio geológico – geotécnico y evaluación de las condiciones del terreno que constituye el Campus de la Ciudad Universitaria de Caracas (C.U.C.). Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 97p.

Galavís, L., 1983, Estudio de suelo, Tramo Plaza Venezuela – Los Símbolos, Línea III del Metro de Caracas. Informe técnico de Oficina de Suelos C.A., Caracas, 111p.

Salcedo, D. y J. Ortas, 2004, Estudio de factibilidad geológico – geotécnico y potencial de uso de los terrenos ubicados en la zona del Jardín Botánico, y estudio geotécnico para los tanques A y C, Universidad Central de Venezuela. Informe técnico de Ingeotec C.A., Caracas, 35p.