

**EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y  
LOCALIZACIÓN DE POZOS DE MONITOREO  
VERTEDERO DE JUNCOS  
JUNCOS, PUERTO RICO**



14 de agosto de 2008

Municipio de Juncos  
p/c Glenda M. Viera Rivera, Gerente General  
Pedregales Núm. 39  
Río Grande, PR 00745

Re: Evaluación Hidrogeológica y  
Localización de Pozos de Monitoreo  
Vertedero de Juncos  
Juncos, Puerto Rico  
(GEO-2008-637B)

Estimada señorita Viera:

Le estamos sometiendo nuestro informe sobre la evaluación hidrogeológica del proyecto en referencia. En caso de tener alguna pregunta al respecto o de requerir servicios adicionales, favor de comunicarse con nosotros. Será un placer reunirnos con usted o su representante para cualquier explicación relacionada con esta evaluación.

Le agradecemos nos haya brindado la oportunidad de realizar este trabajo.

Cordialmente,  
GEO Engineering



Carlos E. Rodríguez Pérez  
Ingeniero Geotécnico

Anejos

## **RESUMEN EJECUTIVO**

El Municipio de Juncos planifica crear un Sistema Integrado (SI) para el Manejo y Disposición de Desperdicios Sólidos No Peligrosos en el Vertedero Municipal de Juncos (VMJ). El SI incluye una expansión lateral del vertedero existente y la construcción de una Planta de Recuperación y Procesamiento de Materiales Reciclables dentro de un Área de Conveniencia para la disposición de material vegetativo, chatarra, etc. La expansión lateral propuesta tendrá una cabida aproximada de 30 cuerdas. La expansión lateral estará localizada al norte del vertedero existente, el cual se encuentra ubicado en el Bo. Gurabo Abajo, en la parte norte del Municipio de Juncos.

La geomorfología natural del sitio del proyecto consiste de colinas alargadas separadas por hondonadas profundas. Parte de la morfología ha sido cambiada por extracciones de terreno. Roca descompuesta y fracturada de origen metamórfico (por alteración hidrotérmica) subyace el área general del proyecto. Suelos arcillosos aluviales y relleno reciente subyacen el área baja situada al sur del vertedero existente.

El agua subterránea detectada en el área del proyecto proviene de la percolación de escorrentías pluviales y no corresponde a un nivel freático del área. El nivel freático fue detectado en el área baja situada al sur del vertedero existente y el mismo debe estar confinado dentro de los suelos aluviales presentes en esa área. El flujo del agua subterránea detectada en el área del proyecto ocurre solamente en sectores específicos localizados erráticamente debido a la condición de fracturación errática del manto rocoso. Durante periodos lluviosos, el flujo de agua subterránea aflora en sectores bajos de las hondonadas. En épocas de sequía, cesan las emanaciones de agua.

La dirección general del flujo de agua subterránea dentro del área del proyecto es hacia el sur-suroeste, hacia las partes bajas localizadas a cientos de metros fuera del área del proyecto. Localmente, la dirección del flujo de agua subterránea en sectores específicos es hacia el fondo de las hondonadas existentes.

Las escorrentías pluviales del área general fluyen en dirección suroeste debido a las condiciones topográficas del terreno definidas por condiciones geológicas. Gran parte del agua de lluvia que cae sobre el área del proyecto fluye como escorrentías hacia las hondonadas para después continuar por afluentes secundarios situados a elevaciones menores hacia el río Gurabo. El volumen de agua drenando por la quebrada se debe principalmente al área de captación definida por las condiciones topográficas del sitio del proyecto.

## TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN .....	1
DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y SITIO .....	2
MARCO GEOLÓGICO .....	3
Geología General de Puerto Rico.....	3
Geología del Área.....	4
Hidrografía y Condiciones de Agua Subterránea del Área General .....	8
Fotointerpretación Aérea del Sitio .....	11
Condiciones de Suelo y Agua Subterránea.....	13
RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	18
COMENTARIOS GENERALES.....	21
FIGURAS	
APÉNDICES	



**EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y  
LOCALIZACIÓN DE POZOS DE MONITOREO  
VERTEDERO DE JUNCOS  
JUNCOS, PUERTO RICO**

**INTRODUCCIÓN**

Este informe presenta la evaluación hidrogeológica del sitio donde se planifica llevar a cabo la expansión lateral del Vertedero Municipal de Juncos, Puerto Rico. Glenda M. Viera Rivera, Consultora Ambiental y Gerente General del proyecto, solicitó esta evaluación a nombre del Gobierno Municipal de Juncos, quien es el dueño del proyecto.

La evaluación está basada en información de suelo y roca obtenida a través de tres barrenos y pozos de observación instalados en el área general del proyecto, en reconocimientos de campo, información geológica del área y sus alrededores y en información de campo recopilada previamente para la evaluación geotécnica del área del proyecto. También se utilizó información topográfica del sitio suministrada por el Agrimensor José Miranda e información de fotografías aéreas del sitio y sus alrededores.

## **DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y SITIO**

El Municipio de Juncos planifica llevar a cabo una expansión lateral del vertedero municipal existente. La expansión lateral propuesta tendrá una cabida aproximada de 30 cuerdas. La expansión estará localizada al norte del vertedero existente, el cual se encuentra ubicado en el Bo. Gurabo Abajo, en la parte norte del Municipio de Juncos (Fig. 1).

La topografía general del terreno del proyecto es variable (Fig. 2). El área localizada al norte del vertedero existente contiene tres hondonadas en la parte este superior, las cuales están separadas por dos lomas alargadas. Las hondonadas se juntan al suroeste en una quebrada que continúa bajando en dirección sur-suroeste. La diferencia en elevación entre las partes baja y alta del área localizada al norte es aproximadamente de 100 metros (aproximadamente de Elevación 100 m a Elevación 200 m). Tanto las hondonadas como las lomas alargadas están orientadas aproximadamente hacia el sur-suroeste.

La porción norte del área de expansión mantiene su estado natural y se encuentra cubierta de vegetación tupida que incluye árboles altos. Por otro lado, la porción sur está siendo sometida a cortes de terreno para la extracción de material usado en el vertedero existente.

El área de la expansión lateral propuesta se encuentra bordeada al sur por el camino de acceso al vertedero existente y al este y norte por un camino municipal hecho en tierra.

## **MARCO GEOLÓGICO**

### **Geología General de Puerto Rico**

Puerto Rico es la isla más pequeña de las Antillas Mayores. En el pasado, actividad volcánica y tectónica en adición a sedimentación intensa, fallas geológicas, y plegamiento dieron origen a la cadena de montañas alineadas en la dirección este-oeste que al presente componen el núcleo rocoso central de la isla. Las montañas consisten de rocas volcánicas (tales como la limolita, arenisca, brecha, tobas volcánicas, etc.) y rocas asociadas a eventos intrusivos. Las rocas volcánicas datan del Cretácico mientras que las rocas intrusivas pueden ser del Cretácico o del Terciario. Durante el Cretácico y el Terciario, depósitos de caliza de gran espesor se formaron alrededor de las montañas para dar lugar a las plataformas de carbonatos que al presente se encuentran al norte y sur de la isla. El levantamiento del manto rocoso causado hace millones de años por eventos intrusivos y actividad tectónica, así como los cambios relativos en el nivel del mar asociados a glaciaciones durante el Pleistoceno, expusieron a las áreas montañosas y a las plataformas de carbonatos, dando origen a lo que actualmente es la isla de Puerto Rico.

Las fluctuaciones en los cambios relativos en el nivel del mar causaron erosión y depósitos de sedimentos en el manto rocoso, dando lugar a la formación de cauces profundos de ríos, quebradas, hondonadas y depósitos aluviales en diferentes sectores de la isla.

El área general del proyecto en estudio se encuentra localizada en la parte este de Puerto Rico. El área general está situada dentro del marco geológico de las rocas volcánicas altamente falladas y plegadas del Cretácico y Terciario Bajo. El área presenta rasgos geomorfológicos de hondonadas y zanjas profundas cavadas en las rocas volcánicas por escorrentías, muchas de los cuales posiblemente ocurrieron en la antigüedad debido a su gran profundidad. Depósitos superficiales de

sedimentos han ocurrido en las partes mas bajas del área y en áreas localizadas fuera del proyecto a cientos de metros al sur-suroeste.

### **Geología del Área**

Rocas Alteradas Hidrotérmicamente (TKa) del Cretácico Superior y Terciario Bajo conforman el área general del proyecto, según el Mapa Geológico del Cuadrángulo de Gurabo publicado por el U.S. Geological Survey (USGS) (Fig. 3). Las Rocas Alteradas Hidrotérmicamente (TKa) consisten de rocas metamórficas de color verde grisáceo provenientes posiblemente de brechas y areniscas volcánicas y lava que fueron sujetas a la acción diagenética (disolvente) del agua subterránea sometida a temperaturas muy altas.

El mapa geológico no incluye datos sobre la inclinación y orientación de las capas de roca en el área del proyecto. Sin embargo, la orientación e inclinación de las capas en los alrededores del área del proyecto son erráticas. Al sur del vertedero las capas de roca se encuentran orientadas en la dirección noroeste-sureste con un ángulo de buzamiento de 15 grados hacia el sur. Por otro lado, en sectores localizados cientos de metros al noroeste del área de expansión, las capas de roca están orientadas en dirección noreste-suroeste con un ángulo de buzamiento de 55 grados hacia el este.

El mapa geológico incluye también la presencia de depósitos aluviales y de terraza (Qat) en áreas comparativamente bajas situadas al sur del vertedero existente. Los depósitos aluviales consisten de arenas, gravas, limos y arcillas.

Durante reconocimientos de campo del sitio, no se observó ninguna estratificación en las rocas expuestas, incluyendo la roca expuesta en los cortes existentes del terreno. Esto confirma la ausencia de datos en el mapa geológico sobre la orientación e inclinación de estratos rocosos en el área del

proyecto. El material aflorando en los cortes de terreno consistía mayormente de roca volcánica (brecha y arenisca) altamente intemperizada (descompuesta) y fracturada de color marrón claro, en ocasiones con vetas grisáceas y violetas. Gran parte de la roca altamente intemperizada y fracturada era recuperada como material saprolítico arcilloso y limoso con fragmentos de roca angulares e intemperizados. En sectores confinados pequeños, la matriz de los fragmentos de roca era dura y con poco intemperismo. La fracturación de la roca observada se debía a la presencia de numerosas diaclasas (juntas) con orientación errática y espaciamiento irregular. Las diaclasas se encontraban oxidadas, indicando que habían estado expuestas a humedad. La estructura general de la roca altamente intemperizada era heterogénea.

En el fondo y bancos de las hondonadas localizadas al norte del área de estudio, la roca expuesta era de color gris y tenía un grado de intemperismo y fracturación mucho menor que el de las rocas expuestas en los cortes de las partes superiores. La orientación de las diaclasas que pudieron ser observadas en estas áreas era errática y variaba entre N85E y N48O con ángulos de buzamiento de 15 a 23 grados hacia el norte, noreste y noroeste. El contraste en las condiciones de la roca se debe posiblemente a que las escorrentías ya habían socavado el material superficial menos resistente. En el fondo de las hondonadas se pudo observar la presencia de quebradas intermitentes. El fondo de las hondonadas contenía bloques sueltos de roca de forma subangular, los cuales fueron posiblemente arrastrados por escorrentías intensas previas. Las quebradas mantuvieron flujo de agua durante o inmediatamente después de periodos lluviosos. Sin embargo, tanto la altura del agua como la velocidad del agua dentro de las quebradas eran bajas. Durante periodos de sequía, las quebradas permanecieron secas, lo cual indicaba que las quebradas dentro de las hondonadas no se alimentaban de agua subterránea proveniente del manto rocoso.

El mapa geológico del USGS infiere la presencia de una falla geológica de desplazamiento lateral en el área general del proyecto y otra falla geológica situada a varias decenas de metros al norte del

proyecto (Fig. 3). Según la información geológica, ambas fallas deben ser de segundo orden y están probablemente asociadas a dos fallas de primer orden, la falla Cerro Mula y la falla Leprocomio, las cuales se encuentran a más de uno y tres kilómetros al sur y norte, respectivamente, del área del proyecto. Según el mapa geológico, la falla dentro del área del proyecto tiene una trayectoria aproximada de este a oeste, mientras que la falla al norte del proyecto tiene una trayectoria noroeste-sureste.

La falla localizada al norte del proyecto divide a la formación rocosa TKa de la Formación Lomas (Kl), la cual consiste de brechas y areniscas volcánicas con estratificación muy gruesa. Las rocas de la formación Kl se encuentran orientadas en la dirección noroeste-sureste y buzan de 35 a 50 grados hacia el sur. La formación Kl es mas antigua que la formación TKa.

Las Figuras 4 y 5 muestran dos secciones transversales a través del área general, incluyendo el área del proyecto (Fig. 6). La sección de la Figura 4 está orientada en la dirección noreste-suroeste, mientras que la sección de la Figura 5 está orientada en la dirección noroeste-sureste. Ambas secciones muestran esquemáticamente la localización del proyecto, las formaciones rocosas y las fallas geológicas antes mencionadas.

La experiencia ha demostrado que las rocas dentro del entorno de fallas geológicas generalmente presentan un alto grado de intemperismo debido principalmente al alto grado de fracturación al cual las rocas fueron sometidas durante el fallamiento. Esta explica las condiciones de intemperismo y fracturamiento altos observados en los afloramientos de roca en el sitio del proyecto. De igual manera, el fallamiento explica lo errático de las orientaciones y buzamientos de las capas de rocas en sectores localizados fuera del área del proyecto.

De acuerdo a la información contenida en el cuadrángulo geológico, la actividad hidrotérmica que afectó a las rocas del sitio ocurrió probablemente después de las fallas geológicas. Como resultado, las dos fallas geológicas deben haber ocurrido también durante el Cretácico (hace millones de años). Las fallas geológicas no aparentan haber sido reactivadas al presente, tal como lo confirma el hecho de que solo han sido inferidas en el mapa geológico y no presentan rasgos visibles o expresión superficial (tales como grietas, desplazamientos, cambios abruptos en la vegetación, etc.) que sugieran movimiento posterior a la actividad hidrotérmica. Por tal razón, la presencia de las fallas geológicas no debe ser una preocupación sísmica para el proyecto.

La permeabilidad del terreno dentro del área del proyecto es variable debido a los cambios en el tipo de material geológico. La permeabilidad de la roca altamente intemperizada es baja debido a su naturaleza arcillosa y limosa. De hecho, no se observó agua subterránea emanando por las caras de los cortes donde la roca está más intemperizada. Por otro lado, la permeabilidad de la roca fracturada con menor grado de intemperismo, como las condiciones de la roca observada en el fondo de las hondonadas, es mayor, debido a la presencia de las diaclasas, las cuales se convierten en posibles canales de flujo. La permeabilidad de la matriz rocosa entre diaclasas es, sin embargo, muy baja. La permeabilidad de la matriz rocosa se denomina permeabilidad primaria. La permeabilidad debida a las diaclasas se conoce como permeabilidad secundaria. De acuerdo a esto, la permeabilidad secundaria del manto rocoso definida por las fracturas y diaclasas controla el flujo del agua subterránea del área del proyecto. Por otro lado, la percolación de escorrentías dentro de la mayor parte del terreno es controlada por la permeabilidad primaria de la roca altamente intemperizada.

## **Hidrografía y Condiciones de Agua Subterránea del Área General**

De acuerdo a información publicada por el USGS, el área de estudio se encuentra ubicada dentro de la cuenca superior del Río Grande de Loíza (Fig. 6) (Ground-Water Resources of the Caguas-Juncos Valley, Puerto Rico; Puig, J.C. and Rodríguez, J.M., USGS Water-Resources Investigations Report 91-4079). Esta cuenca contiene la sub-área Gurabo-Juncos del Valle Caguas-Juncos, la cual se encuentra al sur del área de estudio. La sub-área Gurabo-Juncos es relativamente plana, alargada y angosta de aproximadamente 12 millas de largo y 0.5 a 1.5 millas de ancho. Las dos corrientes de agua superficial fluyendo por la sub-área Gurabo-Juncos son: 1) el Río Gurabo, el cual fluye de este a oeste a lo largo de la sub-área, y 2) el Río Valenciano, el cual fluye de sur a norte al sur de la sub-área.

La sub-área Gurabo-Juncos se encuentra subyacida por un acuífero aluvial formado de arcillas, limos, arenas y gravas (Fig. 7). El acuífero aluvial alcanza su mayor espesor a lo largo del centro de la sub-área y disminuye sustancialmente hacia los bordes norte y sur de la sub-área. El espesor del acuífero aluvial en el sector situado al sur del área de estudio varía aproximadamente de menos de 50 pies en el límite norte de la sub-área a 140 pies en el centro. Rocas volcánicas limitan al acuífero aluvial en la parte norte. El área de estudio se encuentra localizada dentro del área subyacida por las rocas volcánicas. Según la información publicada por el USGS, las rocas volcánicas son unidades de bajo almacenamiento de agua subterránea debido a su permeabilidad baja. La transmisividad de estas rocas es sumamente baja. La fuente principal de agua del acuífero aluvial es la lluvia.

La Figura 8 muestra el mapa potenciométrico del área general publicado por el USGS para el año de 1987, el cual incluye el sector del acuífero aluvial localizado al sur del área de estudio. Según este mapa, la elevación que puede alcanzar el nivel del agua en la frontera norte del acuífero aluvial al sur del área de estudio es de aproximadamente 200 pies (61 metros). Esta elevación está muy por debajo

de la elevación del terreno del área de estudio (aproximadamente entre las elevaciones de 100 a 200 metros). El mapa de la Figura 8 muestra también la dirección del flujo regional de agua subterránea al sur del área del proyecto estimada por el USGS a base de información de campo de pozos. La dirección del flujo es hacia el sur-suroeste hacia la localización del cauce del río Gurabo.

En el sector más cercano al área de estudio, el río Gurabo fluye en dirección oeste-noroeste a aproximadamente 1.3 km del área del vertedero existente. En el área general, el río tiene varios afluentes secundarios localizados al norte del río y que fluyen mayormente en dirección suroeste (Fig. 9). Varios de los afluentes provienen de hondonadas cavadas en las formaciones rocosas. Los afluentes secundarios tienen a su vez otros afluentes terciarios intermitentes provenientes de los taludes que forman los lados de las hondonadas.

El río Gurabo fluye sobre un terreno relativamente llano y de poca elevación (aproximadamente entre Elevación 55 y 60 m). En las partes bajas del terreno, los afluentes secundarios fluyen dentro del valle aluvial del río siguiendo un patrón de drenaje dendrítico. En las partes altas, el drenaje superficial de los afluentes secundarios es intermitente y tiene un patrón longitudinal y paralelo debido a un patrón de diaclasas bien definido dentro de las formaciones rocosas. Por otro lado, el patrón de drenaje de los afluentes terciarios intermitentes varía de rectangular a dendrítico grueso.

La mayor parte del área del proyecto bajo estudio contiene afluentes secundarios y terciarios intermitentes localizados a elevaciones mayores de 120 m. Los dos afluentes secundarios con flujo permanente más cercanos al área del proyecto comienzan cerca de los límites sur y sureste, los cuales se encuentran en las partes bajas del área del proyecto (aproximadamente en la elevación 100 m). Como resultado, la mayor parte del agua superficial fluyendo dentro del sitio del proyecto se debe a escorrentías pluviales recogidas por los afluentes secundarios y terciarios intermitentes.

A base de las condiciones hidrográficas del terreno, el flujo de las aguas superficiales (escorrentías pluviales) sobre el área general es en dirección suroeste hacia el cauce del río Gurabo. Esta dirección del flujo coincide con la dirección general del flujo regional de aguas subterráneas. Localmente, la dirección del flujo de las escorrentías pluviales está controlada por factores topográficos específicos definidos por las condiciones de las formaciones rocosas. Las escorrentías pluviales recolectadas por los afluentes terciarios intermitentes y los afluentes secundarios son conducidas hacia el cauce del río Gurabo.

### **Fotointerpretación Aérea del Sitio**

La fotointerpretación de un sitio se lleva a cabo comparando fotografías aéreas del área tomadas en un periodo de varios años. Estas fotografías muestran las características físicas generales y sirven para identificar los cambios que el área ha sufrido a través del tiempo. Las fotos se ven en parejas por medio de un estereoscopio, el cual permite ver el área en tres dimensiones con su escala vertical amplificada. La fotointerpretación de un sitio se ha convertido en una técnica efectiva para reconocer mejor las características geomorfológicas (topografía, drenaje, etc.), los cambios hechos por el hombre (cortes, rellenos, etc.), áreas con inestabilidad, etc.

La evaluación del sitio se llevó a cabo utilizando fotografías aéreas de los años 1967, 1977, 1985 y 2006. Las fotografías de 1985 y anteriores a 1985 muestran la condición física del área general del proyecto previo a la construcción del vertedero existente. Las fotografías del 2006 muestran el vertedero existente y los cortes realizados en el área localizada al norte.

La topografía del área general de la expansión lateral propuesta previo a la construcción del vertedero existente se caracterizaba por tener tres colinas alargadas separadas por dos hondonadas o vaguadas profundas (Fig. 9). La colina localizada al norte y parte de la colina intermedia han mantenido prácticamente su condición natural. La colina y la hondonada localizadas al sur fueron grandemente afectadas por los cortes de terreno para la construcción del vertedero existente. La alineación de la colina intermedia cambia ligeramente de dirección en su parte superior. Este cambio en la alineación es lo que posiblemente lleva a inferir la presencia de una falla geológica antigua. Sin embargo, las hondonadas que limitan a la colina no muestran el cambio en alineación. Por lo tanto, de estar presente, la falla geológica debe ser previa a las hondonadas y debe estar inactiva.

La hondonada localizada en la parte norte del proyecto se divide al este en dos hondonadas de menor longitud que se encuentran separadas por una loma (Fig. 9). Además, se observa varias zanjas de erosión en la ladera sur de la colina norte buzando hacia la hondonada. Las zanjas de erosión se ven angostas y con paredes empinadas. El patrón de drenaje es del tipo rectangular a dendrítico grueso. Estas condiciones de drenaje son indicativas de la presencia de roca de grano grueso (e.g. arenisca y brecha) localizada a poca profundidad en la ladera. La vegetación de baja altura en la mayor parte del área confirma también la presencia de material rocoso llano. Por otro lado, la vegetación observada a lo largo de las hondonadas es tupida debido a la presencia de sedimentos depositados por las escorrentías y a la presencia de humedad. Esta información confirma los hallazgos observados en varios sectores durante el reconocimiento de campo del sitio del proyecto.

La morfología natural del terreno indica que en el pasado el área de las hondonadas estuvo cubierta de roca. La profundidad de las hondonadas es de varias decenas de metros. Las fotografías aéreas no mostraron ningún indicio significativo de inestabilidad de taludes *dentro* del área del proyecto, excepto en las zanjas de erosión donde ha ocurrido lavado de terreno talud abajo. Por lo tanto, las hondonadas fueron probablemente formadas por un proceso de erosión superficial que debe haber tomado mucho tiempo y no por la presencia de agua subterránea aflorando por el terreno. Consecuentemente, de existir, el nivel freático dentro del área del proyecto debe encontrarse a gran profundidad.

El área general (incluyendo varios cientos de metros al este y oeste del sitio del proyecto) contiene varias colinas alargadas en la dirección sur-suroeste. En la Figura 9 se puede apreciar estas colinas. Las colinas se encuentran separadas por hondonadas profundas con afluentes secundarios y terciarios intermitentes que drenan en dirección sur-suroeste hacia afluentes secundarios localizados en áreas de menor elevación. La topografía del área general se debe a la presencia de unos patrones de diaclasas específicos dentro del manto rocoso. Estos patrones de diaclasas tienen una orientación de

norte-noreste a sur-suroeste y noreste a suroeste. Por lo tanto, el patrón general del drenaje superficial actual del área general es hacia el sur-suroeste.

La falla geológica inferida en el mapa geológico fuera del sitio del proyecto a varias decenas de metros al norte se distingue por el cambio súbito en la elevación del terreno de la cima de la colina alargada, y por la presencia de hondonadas siguiendo la misma alineación en ambas laderas de la colina. La falla separa topográficamente al área del proyecto del terreno localizado más al norte. Tomando en cuenta esta separación topográfica y la presencia de hondonadas profundas en las colinas situadas al norte de la falla, es poco probable que las escorrentías pluviales cayendo sobre las colinas localizadas al norte de la falla logren drenar subterráneamente hacia el área del proyecto. En la Figura 9 se muestra esquemáticamente los afluentes terciarios y secundarios del área localizada al norte de la falla. Estos afluentes drenan hacia el oeste-noroeste, alejándose del área de la expansión propuesta. Posiblemente, el flujo de agua subterránea en esa área siga la misma dirección.

Resumiendo, la fotointerpretación aérea del área del proyecto confirmó lo siguiente: 1) las escorrentías pluviales del área propuesta para la expansión lateral son recolectadas por afluentes secundarios y terciarios intermitentes que drenan hacia afluentes secundarios localizados en las partes bajas en la vecindad del límite sur del área de la expansión propuesta, 2) las hondonadas profundas existentes fueron probablemente cavadas por escorrentías pluviales y no por agua subterránea aflorando a la superficie del terreno, y 3) de existir, el nivel freático dentro del área del proyecto debe encontrarse a gran profundidad.

### **Condiciones de Suelo y Agua Subterránea**

Se realizaron tres barrenos para la instalación de pozos de observación (H1, H2 y H3). Las Figuras 2 y 9 muestran esquemáticamente la localización de los pozos de observación. La profundidad de los

pozos fue de 45 pies, 50 pies y 70 pies. El pozo H1 fue instalado aguas abajo del vertedero existente, en la parte baja situada al sur. La elevación aproximada del terreno en el pozo H1 fue de 85 metros. El pozo H2 se instaló también aguas abajo del vertedero existente cerca del límite sur pero a una elevación aproximada de 98 metros, mientras que el pozo H3 se localizó aguas arriba del área propuesta para la expansión del vertedero a la elevación aproximada de 147 metros. La diferencia en elevación entre el pozo H1 y el pozo H3 fue de 62 metros (aproximadamente 203 pies). Los pozos H2 y H3 fueron instalados cerca de quebradas intermitentes. El pozo H3 se instaló cerca del pozo 2A instalado previamente para la investigación geotécnica del proyecto. El número, la profundidad y la localización de los pozos de observación fueron definidos tomando en cuenta la información geológica, la topografía del sitio, los resultados de la fotointerpretación y del reconocimiento de campo, la información de campo previa, las características del terreno expuesto en los cortes, la accesibilidad del área y las condiciones de suelo que se iban obteniendo conforme se hacían los barrenos para los pozos. El Apéndice 1 presenta una descripción breve de los procedimientos de barrenado y muestreo que fueron usados. El Apéndice 2 contiene los registros de los barrenos.

Cuatro tipos de terreno se encontraron con los barrenos: 1) relleno, 2) depósitos aluviales de terraza, 3) saprolita de roca volcánica, y 4) roca volcánica intemperizada (descompuesta) y/o fracturada. El relleno se encontró en los tres pozos y consistió de arcilla arenosa y arena arcillosa marrón con grava angular. El espesor del relleno varió de 4 a 6 pies.

Los depósitos aluviales de terraza se encontraron en los pozos H1 y H2, los cuales se encontraban en área bajas al sur del proyecto. Los depósitos consistían de arcilla arenosa y arena arcillosa marrón con fragmentos de grava intemperizada. El pozo H1 se completó dentro de estos depósitos a una profundidad de 45 pies. La profundidad alcanzada por los depósitos aluviales en el pozo H2 fue de 8 pies.

La saprolita de roca volcánica consistía de arcilla limosa y limo arcilloso de color variegado en la parte superior y de arena limosa y arcillosa y limo arenoso de color crema y gris claro en la parte inferior. El pozo H2 se completó dentro de la saprolita a la profundidad de 50 pies.

La roca volcánica intemperizada o descompuesta se recobró solamente en el pozo H3 y consistía mayormente de una mezcla de fragmentos de roca angulares con limo arenoso y arcilloso, arcilla limosa y arena arcillosa de color marrón claro, en ocasiones verdosa o con vetas grisáceas y violetas. La mezcla contenía planos de diaclasas oxidados. El grado de intemperismo disminuía con la profundidad. La roca menos intemperizada consistía de roca metamórfica brechada de color verdoso y grisáceo. Algunas de las muestras contenían pequeñas cavidades de disolución, lo cual confirmaba el efecto de alteración hidrotérmica al que fue sometida la roca volcánica madre. En su mayoría las muestras tenían un RQD menor de 50 por ciento debido a la condición fracturada de la roca. Este valor de RQD indica que la roca es de pobre calidad. Sin embargo, la matriz rocosa de las muestras era relativamente dura.

La permeabilidad de la roca descompuesta es baja debido a su naturaleza arcillosa y limosa. Por otro lado, la permeabilidad de la roca fracturada pero con menor grado de intemperismo es mayor debido a las fracturas. La permeabilidad de la matriz de la roca fracturada es también baja. Por tal razón, la percolación del agua de lluvia dentro de la roca descompuesta debe estar ocurriendo principalmente a través de las fracturas y diaclasas presentes en la roca.

Las condiciones de suelo y roca específicas encontradas en cada barreno se hallan en los registros contenidos en el Apéndice 2. La estratificación o cambios demarcados en los registros están basados en la inspección visual de las muestras recuperadas en los barrenos y en la información presentada en los registros de campo de los barrenos. Por esta razón, estos cambios son aproximados y esquemáticos. La transición actual entre los diferentes tipos de suelo y roca puede llegar a ser

gradual. Las profundidades dadas en este informe se encuentran referidas a la superficie del terreno existente durante el barrenado.

Los pozos de observación incluían dos partes: una parte inferior ranurada y una parte superior ciega (sin ranuras). La parte ranurada llegaba al fondo de los pozos. Se colocó un sello de bentonita entre la parte ciega y la parte ranurada y un sello de mortero alrededor de los pozos para asegurarse que el agua entrando en los pozos provenía exclusivamente de las profundidades donde se encontraba la parte ranurada. El sello de mortero evitaría la percolación de escorrentías hacia los pozos. Los registros de los barrenos incluyen la profundidad del agua subterránea encontrada durante el barrenado. A base de esta profundidad se definió la longitud de la sección ranurada de los pozos H1 y H2.

Tal como se mencionó anteriormente, el pozo H3 se instaló cerca del pozo 2A previamente instalado para la evaluación geotécnica del proyecto. El pozo 2A alcanzó una profundidad de 30 pies y la parte ranurada comenzaba a la profundidad de 10 pies. Lecturas realizadas anteriormente en el pozo 2A indicaban que el nivel de agua dentro del pozo se mantenía a una profundidad promedio de 5 pies 3 pulgadas durante los periodos lluviosos en los cuales se hizo la evaluación geotécnica del proyecto. Como se sospechaba que el agua detectada dentro del pozo 2A provenía de venas de agua relativamente llanas localizadas dentro de la roca fracturada, se decidió que la sección ranurada del pozo H3 se instalara hasta alcanzar la profundidad de 30 pies, ya que durante el barrenado del pozo H3 a profundidades mayores de 26 pies dejó de detectarse la presencia de agua subterránea.

El nivel del agua dentro de los pozos fue medido usando un galvanómetro. El Apéndice 3 presenta secciones transversales esquemáticas de los pozos de observación y un resumen de las lecturas hechas de los pozos.

Para la evaluación geotécnica del proyecto, se llevó a cabo varias catas de campo en el área de la expansión propuesta. El agua detectada dentro de las catas fluía localmente a diferentes profundidades a través de algunas de las diaclasas y fracturas que se encontraban dentro de la roca descompuesta. Durante el reconocimiento de campo, se observó varias emanaciones de agua subterránea en las cercanías del pozo H3 después de periodos lluviosos. El agua emanaba a través de diaclasas y fracturas que se encontraban dentro de la roca descompuesta. Sin embargo, las emanaciones de agua cesaron durante un periodo de sequía. Por lo tanto, las emanaciones de agua observadas no correspondían a un nivel freático general sino a agua subterránea intermitente proveniente de esorrentías que percolaban en sectores aguas arriba.

El nivel de agua dentro de los pozos H1 y H2 se encontró a la profundidad promedio de 28.9 pies. En el pozo H3 no se detectó agua durante el periodo de evaluación. Sin embargo, el pozo 2A mantuvo agua a una profundidad aproximada de 4 pies 9 pulgadas. La quebrada situada cerca del pozo H3 se mantuvo seca. Por lo tanto, el agua detectada en el pozo 2A corresponde a agua subterránea fluyendo a profundidades relativamente llanas a través de diaclasas y fracturas del manto rocoso. Sin embargo, el agua subterránea detectada en el pozo 2A no corresponde a un nivel freático ya que no se detectó en el pozo H3. Asimismo, el agua fluyendo dentro de la quebrada durante periodos lluviosos corresponde a esorrentías pluviales. El agua detectada en el pozo 2A se encontraba en condiciones semi-artesiana debido a la presencia de sectores de terreno con mayor elevación.

El nivel de agua detectado en los pozos H1 y H2 tiene una elevación aproximada de 76 m y 89 m, respectivamente. El pozo H2 se instaló cerca de una quebrada intermitente que se mantuvo seca durante el periodo de sequía. Tomando en cuenta las elevaciones del terreno de las partes bajas del área general por donde fluyen quebradas con flujo permanente, el nivel de agua detectado en los pozos H1 y H2 corresponde al nivel freático del acuífero aluvial del área general. Los suelos

aluviales fueron encontrados en estos pozos. El nivel freático debe estar confinado dentro de los suelos aluviales y es poco probable que exista debajo del manto rocoso que conforma el área de la expansión propuesta debido a las condiciones de permeabilidad muy baja de la matriz de la roca.

A base de lo discutido anteriormente, el flujo de agua subterránea en el área del proyecto se debe a escorrentías pluviales percolando en áreas de mayor elevación. Este flujo ocurre solamente en sectores específicos localizados erráticamente, debido a la condición de fracturación errática de la roca descompuesta. Durante periodos lluviosos, el agua subterránea aflora en las partes bajas de las hondonadas, intersecando en algunos sectores a la superficie del terreno para producir pequeños manantiales que drenan hacia las quebradas. Sin embargo, esta condición de agua no existe durante periodos de sequía. Según esto, el impacto que el proyecto propuesto pueda tener en el sistema de agua subterránea del acuífero aluvial localizado al sur del proyecto es remoto ya que el proyecto se encuentra localizado fuera del acuífero y el terreno subyacente al proyecto es de permeabilidad relativamente baja. Por otro lado, el proyecto propuesto debe incluir un manejo adecuado de las escorrentías cayendo sobre el proyecto para evitar que las mismas alcancen los afluentes cercanos al proyecto y, a su vez, lleguen al área del acuífero aluvial.

## **RESUMEN Y CONCLUSIONES**

A continuación se somete un resumen de los hallazgos de este estudio:

1. El área general del proyecto se encuentra localizada dentro de un marco geológico de rocas metamórficas alteradas hidrotérmicamente del Cretácico Superior que han sido sometidas a fallas geológicas y a un grado variable de intemperismo. Las fallas geológicas ocurrieron durante el Cretácico y se han mantenido inactivas por mucho tiempo (millones de años), por lo que no presentan un peligro sísmico o estructural para el proyecto.

2. Roca descompuesta con alto grado de intemperismo subyace la mayor parte del área del proyecto. La roca descompuesta consiste de una mezcla heterogénea y competente de fragmentos y bloques de roca dentro de una matriz de suelo limoso y arcilloso. El grado de intemperismo disminuye con la profundidad. La roca con menor grado de descomposición consiste de roca fracturada de matriz dura.
3. La geomorfología natural del sitio del proyecto consistía de tres colinas alargadas separadas por dos hondonadas profundas que se juntaban cerca del límite oeste del área del proyecto. La morfología de la parte sur ha sido cambiada por cortes realizados para la extracción de material para el vertedero existente.
4. El agua subterránea detectada en el área del proyecto proviene de la percolación de escorrentías pluviales y no corresponde a un nivel freático del área. El nivel freático fue detectado en el área baja situada al sur del vertedero existente y el mismo corresponde al nivel freático del acuífero aluvial que se encuentra al sur.
5. El flujo del agua subterránea detectada en el área del proyecto ocurre solamente en sectores específicos localizados erráticamente debido a la condición de fracturación errática del manto rocoso. Durante periodos lluviosos, el flujo de agua subterránea aflora en sectores bajos de las hondonadas. En épocas de sequía, cesan las emanaciones de agua.
6. La dirección general del flujo de agua subterránea dentro del área del proyecto es hacia el sur-suroeste, hacia las partes bajas localizadas a cientos de metros fuera del área del proyecto. Esta dirección coincide con la dirección general del flujo del acuífero aluvial

localizado al sur del proyecto. Localmente, la dirección del flujo de agua subterránea en sectores específicos es hacia el fondo de las hondonadas existentes.

7. Las escorrentías pluviales del área general fluyen en dirección suroeste debido a las condiciones topográficas del terreno definidas por condiciones geológicas. Gran parte del agua de lluvia que cae sobre el área del proyecto fluye como escorrentías hacia las hondonadas para después continuar por afluentes secundarios situados a elevaciones menores hacia el río Gurabo. El volumen de agua drenando por la quebrada se debe principalmente al área de captación definida por las condiciones topográficas del sitio del proyecto.

**COMENTARIOS GENERALES**

El presente informe se ha preparado para evaluar el proyecto desde el punto de vista hidrogeológico. El alcance del estudio se limita a la localización y proyecto descritos. La descripción y análisis del proyecto representa nuestro entendimiento de los aspectos relevantes a las características físicas e ingenieriles de los suelos y rocas. La evaluación sometida en el informe está basada en los datos obtenidos con los barrenos realizados en las localidades indicadas y en cualquier otra información discutida en el informe. El informe no refleja cualquier variación en las condiciones de suelo y roca que pueda surgir entre los barrenos o con cualquier otra localidad del proyecto. Si las variaciones son evidentes, será necesario reevaluar las conclusiones después de llevar a cabo en el sitio las observaciones pertinentes y anotar las características de las variaciones.

Sometido por,  
GEO Engineering



Carlos E. Rodríguez Pérez, PhD, PE  
Ingeniero Geotécnico

14 de agosto de 2008  
GEO-2008-637B  
Anejos

FIGURAS

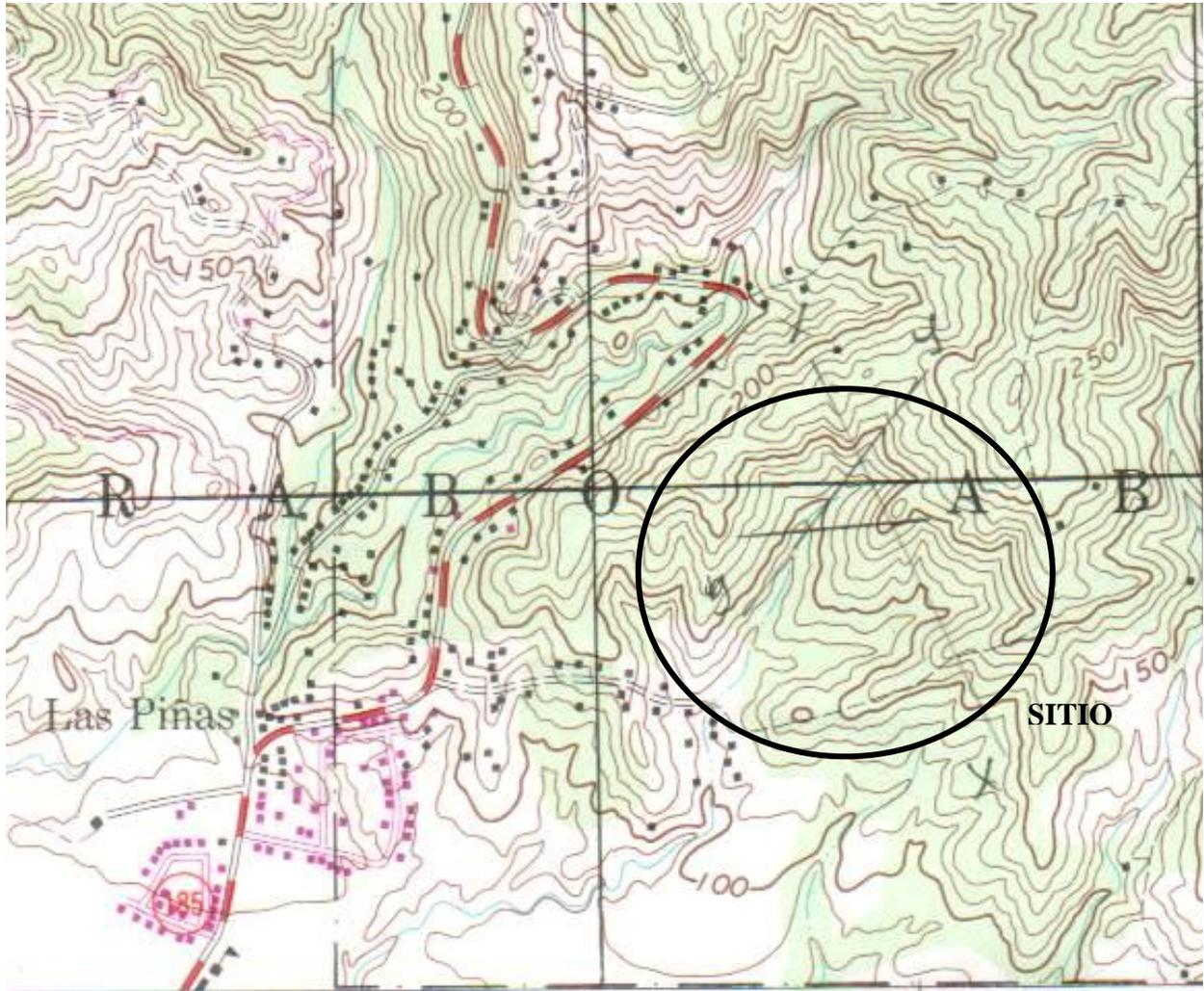


FIGURA 1

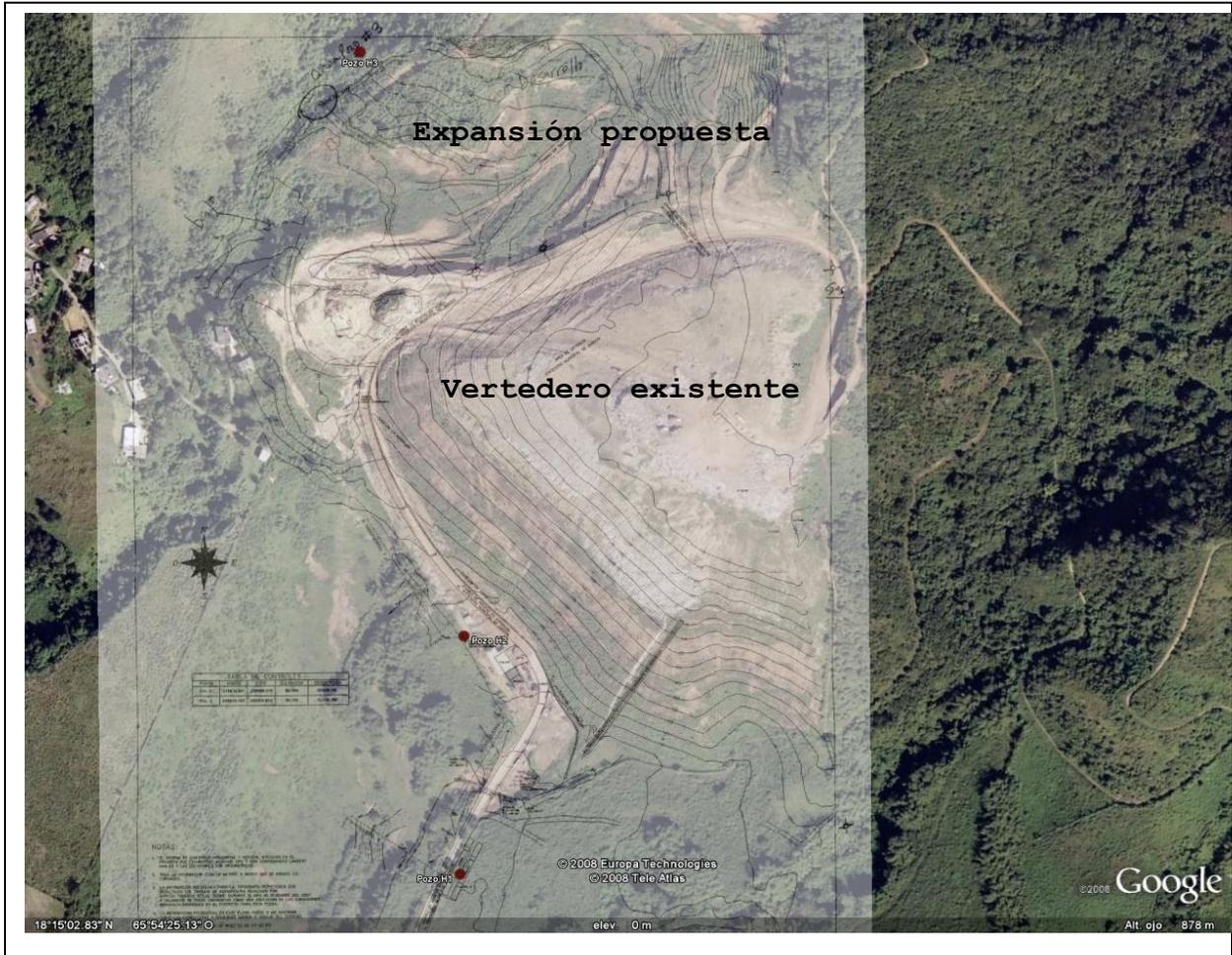


FIGURA 2

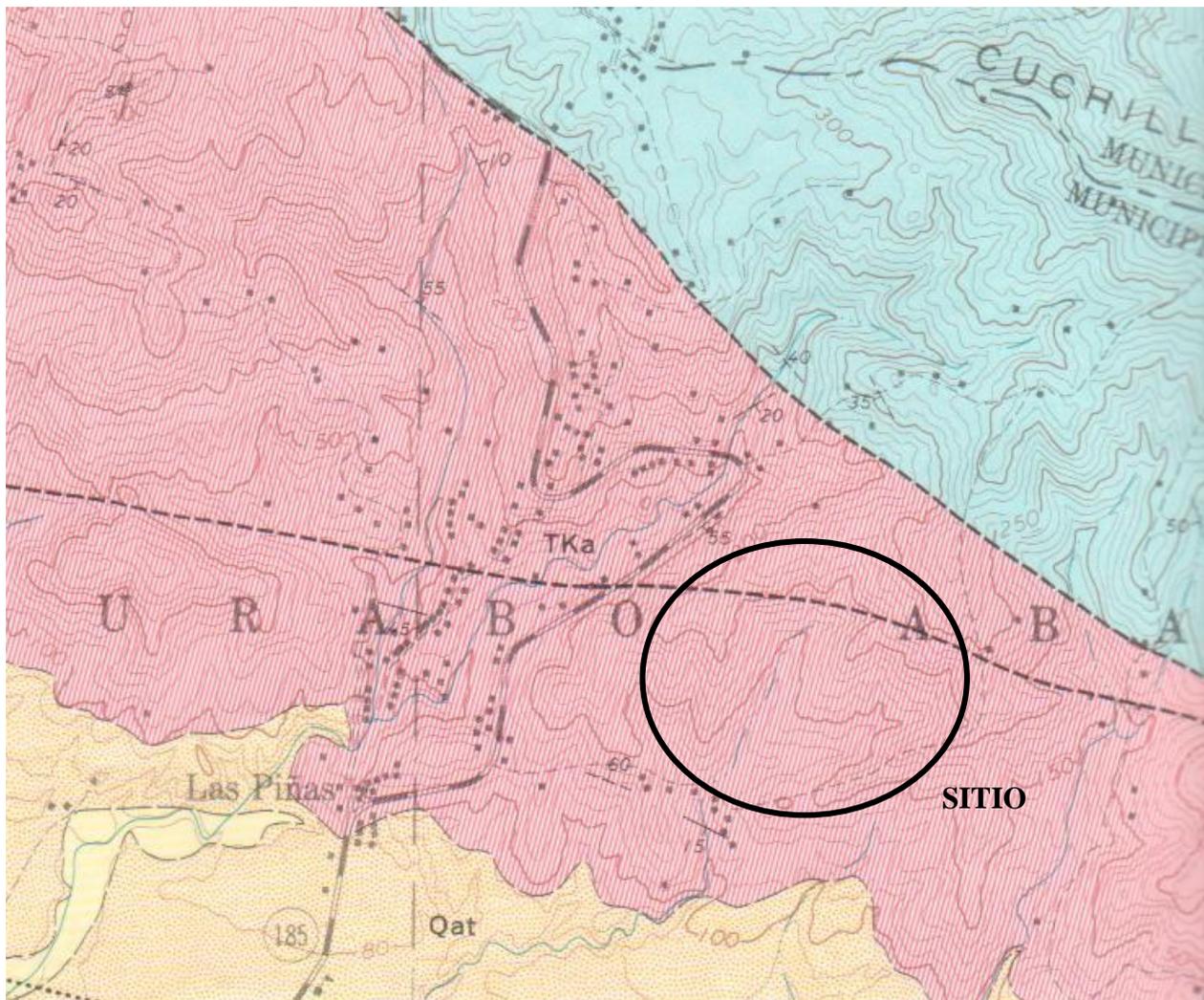
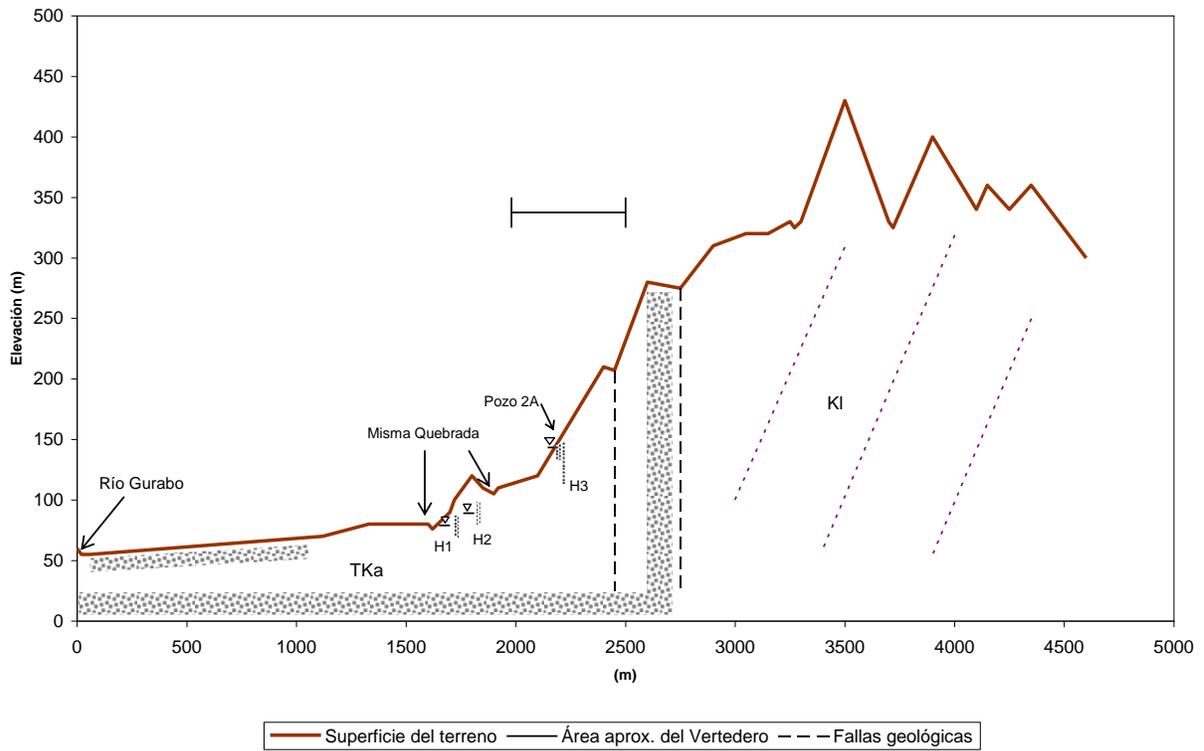


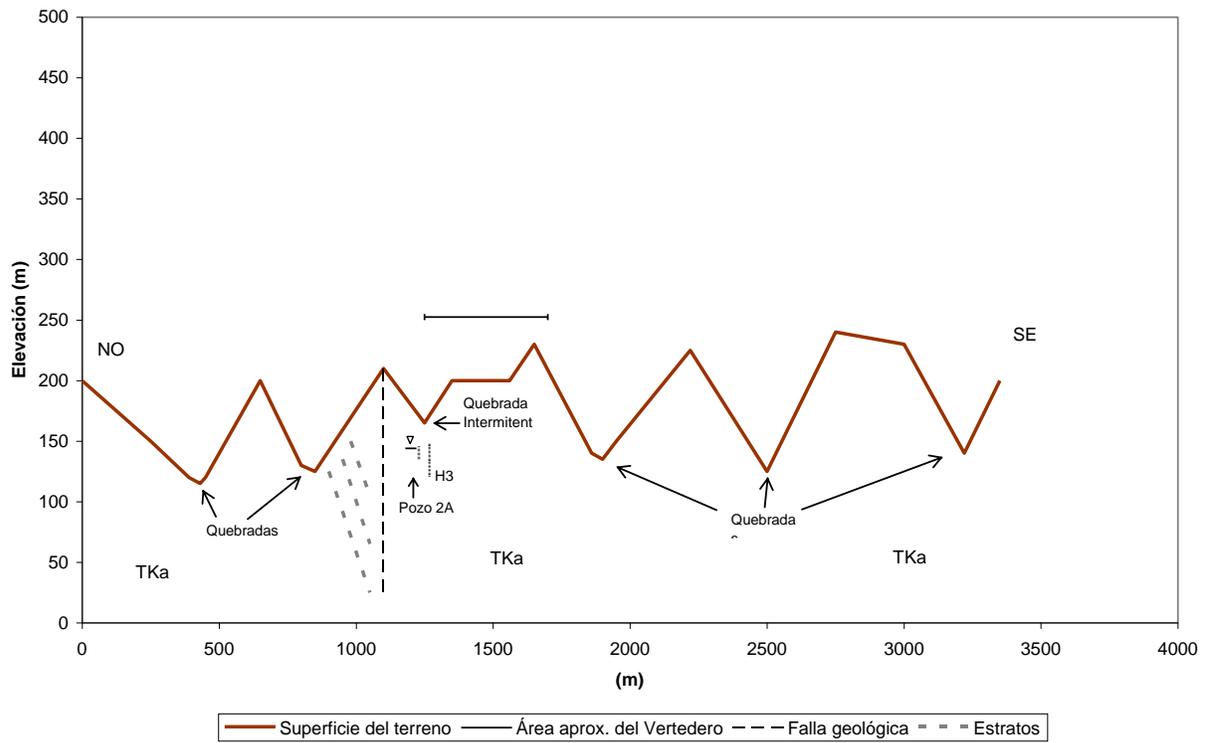
FIGURA 3 – Imagen del Mapa Geológico del Cuadrángulo de Gurabo (USGS Map I-657)

**Sección Noreste-Suroeste**



**FIGURA 4**

**Sección Noroeste - Sureste**



**FIGURA 5**

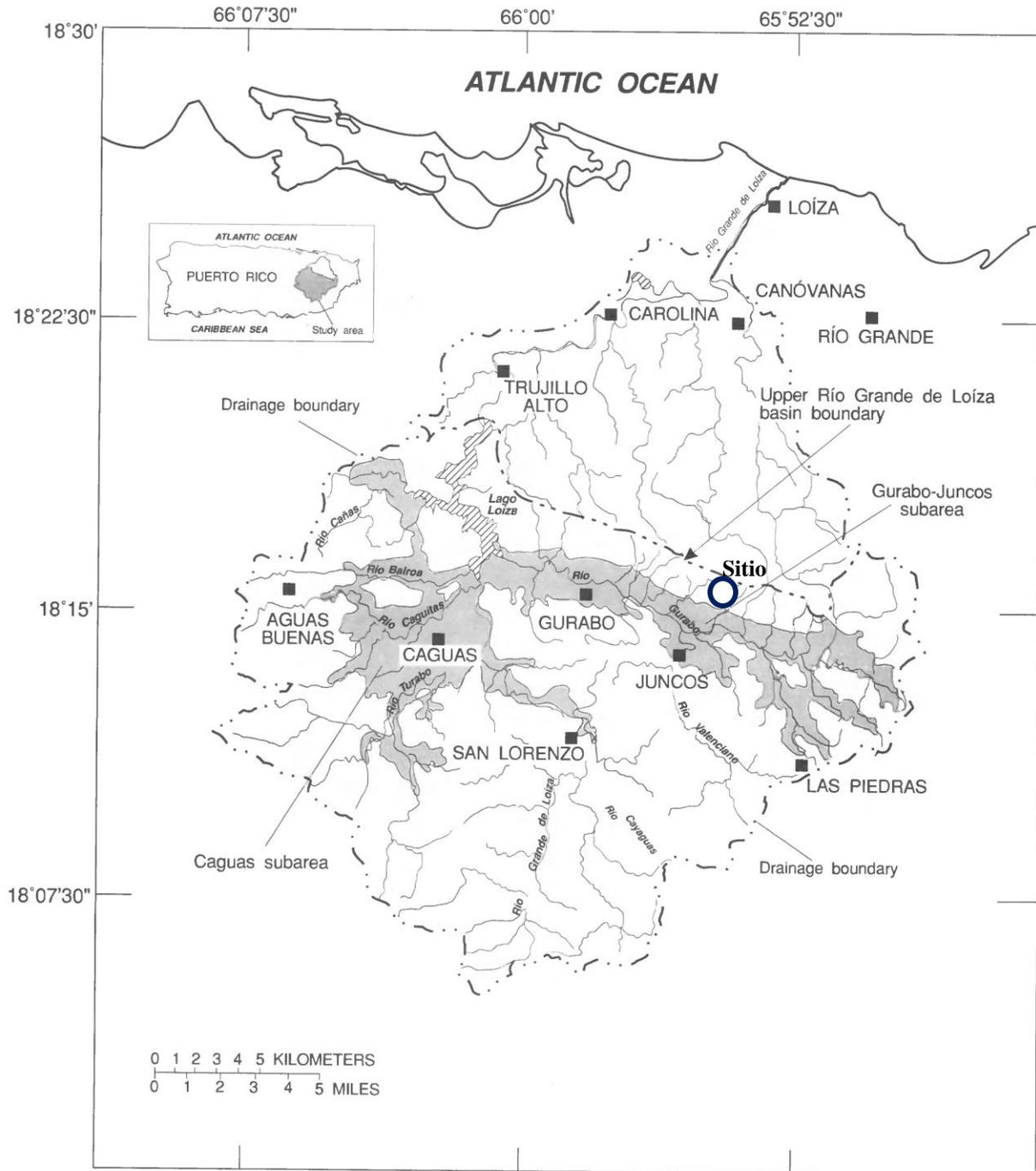


FIGURA 6 – Localización del Área del Estudio Dentro del Valle Caguas-Juncos  
(Publicado por USGS)

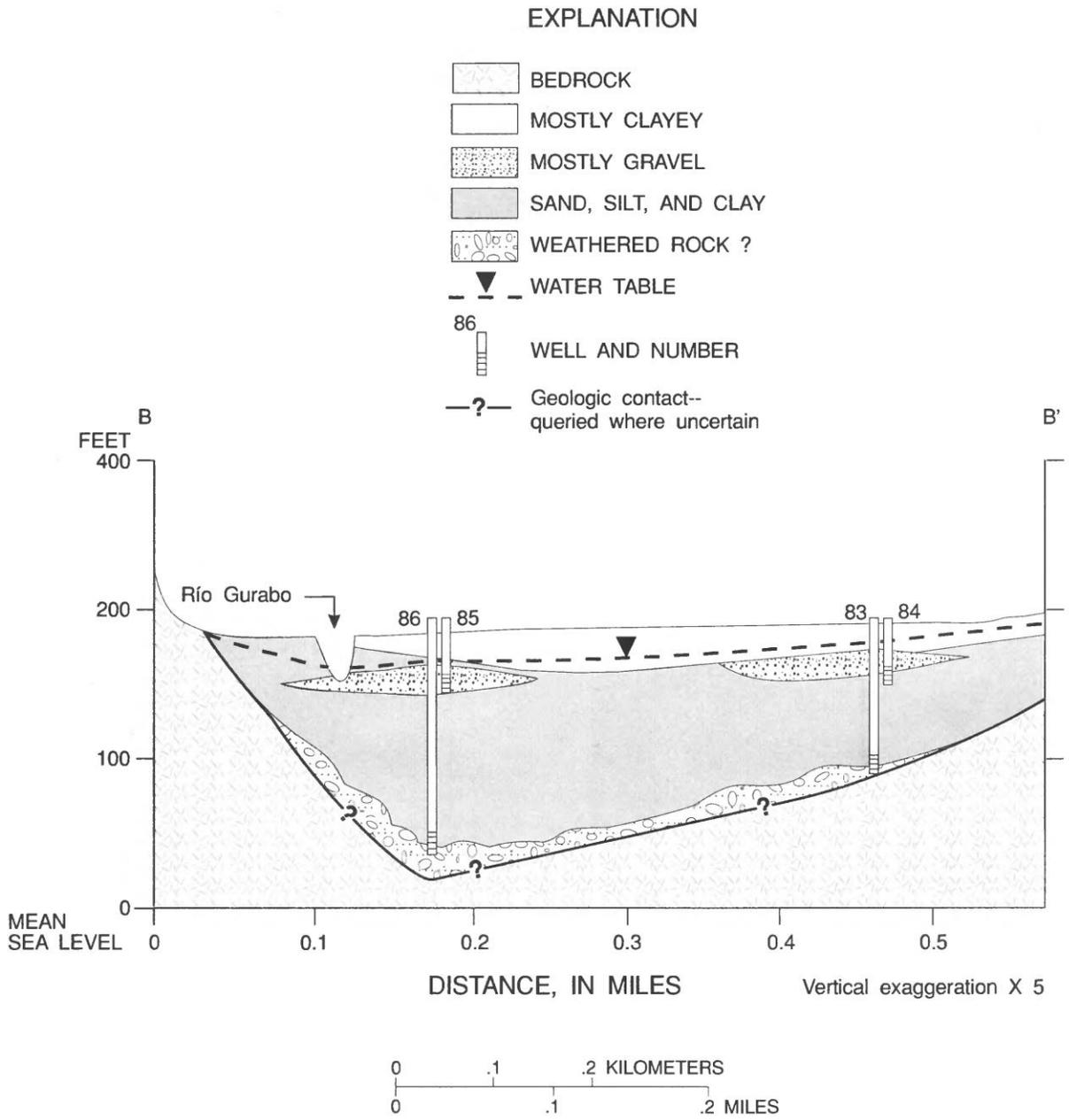


FIGURA 7 – Perfil Transversal del Acuífero Aluvial de la Sub-Área Gurabo-Juncos  
(Publicado por USGS)

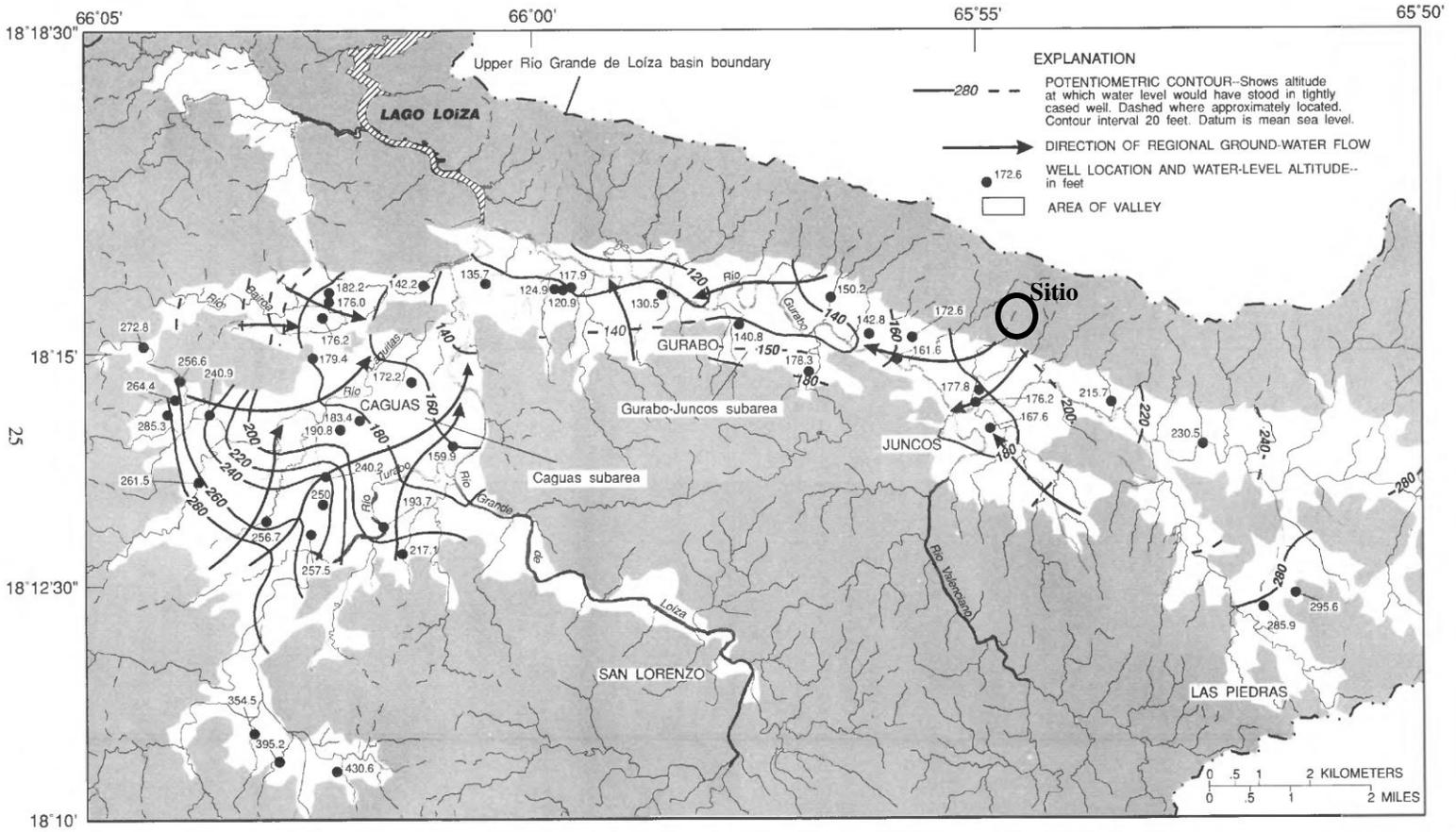
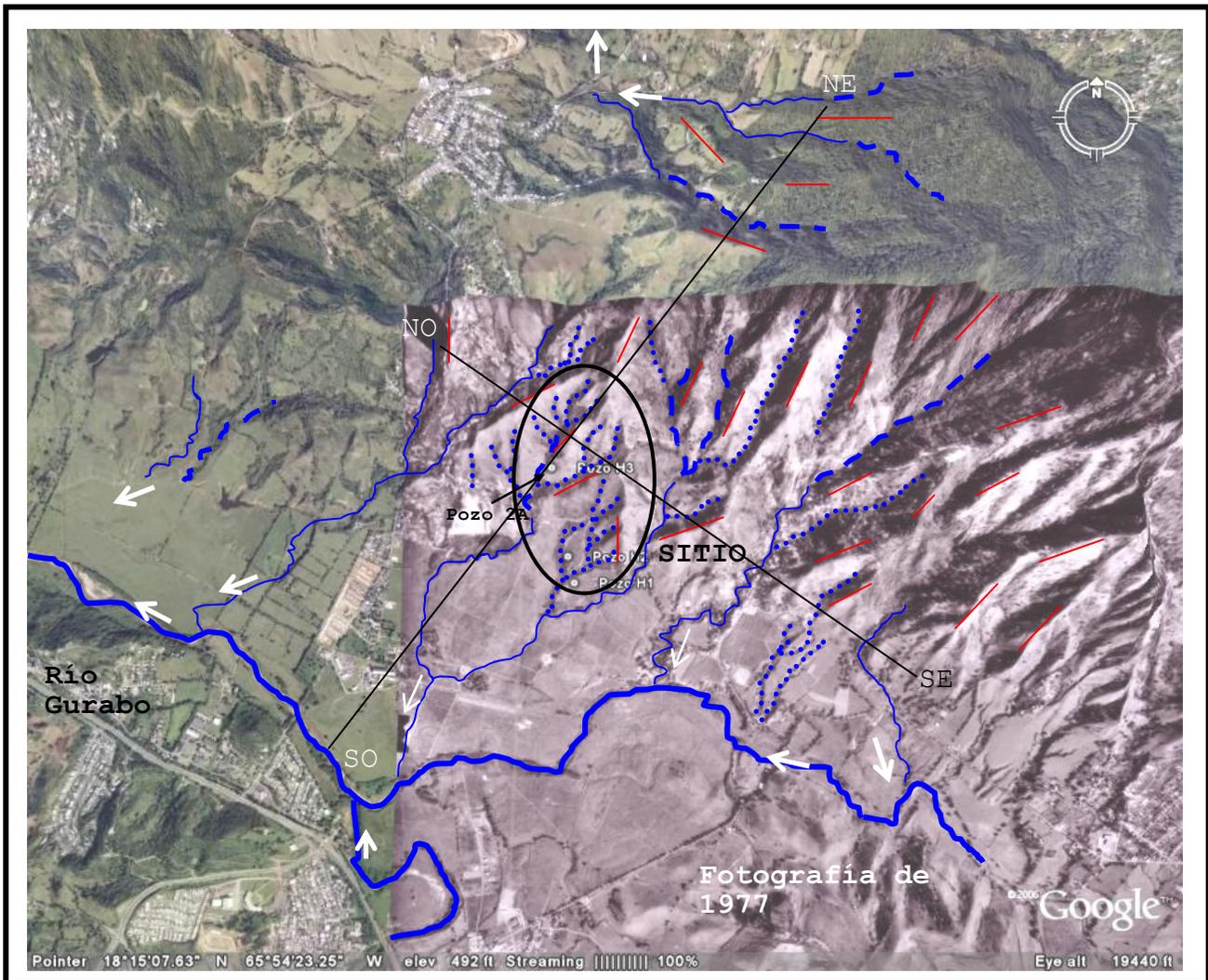


FIGURA 8 – Mapa Potenciométrico del Acuífero Aluvial y Localización del Área del Estudio (Publicado por USGS)



- Afluente secundario con flujo permanente
- - Afluente secundario con flujo intermitente
- ..... Afluente terciario con flujo intermitente
- Alineación aproximada de colinas alargadas

FIGURA 9

## **APÉNDICE 1**

Resumen de Procedimientos

## Resumen de Procedimientos

### Procedimientos de Muestreo

#### **Muestreador de Cuchara Partida (Especificación de ASTM D-1586-67)**

Los barrenos son realizados con un equipo de barrenar provisto de barrenas huecas. Las muestras de suelo se obtienen usando un muestreador de cuchara partida de 2 pulgadas de diámetro externo y 18 (o 24) pulgadas de largo. La resistencia a la penetración se obtiene contando el número de golpes requerido para introducir el muestreador en el suelo por medio de un martillo de 140 libras de peso cayendo una distancia de 30 pulgadas. El valor N de la Prueba de Penetración Estándar (SPT) se obtiene contando el número de golpes requerido por el martillo para penetrar el muestreador 12 pulgadas, después de una penetración inicial de 6 pulgadas. Este valor se da en golpes por pie (bpf) y se usa como un indicador de la densidad relativa de los suelos granulares (arenas y gravas) y de la consistencia de los suelos cohesivos (suelos arcillosos) usando los valores incluidos abajo. El valor N se usa también para tener una idea de la resistencia a la penetración de las rocas intemperizadas y fracturadas. Sin embargo, cuando el suelo contiene fragmentos de roca, se puede obtener valores altos de N sin que esto signifique que el suelo es denso o de consistencia rígida. Las muestras de suelo y roca recuperadas de los barrenos se identifican en el campo y laboratorio y se someten a pruebas específicas.

<b>Valor - N</b> <b><u>golpes / pie</u></b>	<b>Consistencia de</b> <b><u>Suelos Cohesivos</u></b>	<b>q<sub>u</sub></b> <b>(tsf)</b>
< 2	Muy Suave	0-0.25
2-4	Suave	0.25-0.5

4-8	Mediana	0.5-1.0
8-15	Rígida	1.0-2.0
15-30	Muy Rígida	2.0-4.0
> 30	Dura	> 4.0

**Densidad Relativa de**  
**Suelos Granulares**

0-5	Muy suelta
5-10	Suelta
10-30	Mediana
30-50	Densa
> 50	Muy densa

Las muestras de suelo recuperadas con este procedimiento son alteradas y por lo tanto la estructura natural de las mismas queda destruida.

**Barrenado en Suelos**

En este procedimiento, se utiliza una serie de barrenas huecas para hacer una perforación en el suelo y avanzar la misma. Las barrenas huecas permiten la utilización del muestreador sin tener que removerlas. Además, las barrenas proveen soporte a las paredes de la perforación durante el proceso de barrenado.

### **Barrenado en Roca**

En este procedimiento, se rota una serie de tubos mientras se ejerce una presión constante sobre una broca colocada al fondo de la perforación. Al mismo tiempo, se vierte agua dentro del barreno para enfriar la broca. Para hacer un muestreo en roca, se conecta un barril muestreador a los tubos y se recupera la muestra a intervalos de 2 a 5 pies. La calidad de la roca es evaluada utilizando el índice RQD, que se define como la razón entre la suma de todos los pedazos de 4 pulgadas o más de largo y el largo total de la corrida de 5 pies. La siguiente correlación es utilizada para el RQD:

<b><u>RQD (%)</u></b>	<b><u>Calidad de la Roca</u></b>
90-100	Excelente
75-90	Bueno
50-75	Regular
25-50	Pobre
0-25	Muy pobre

### **Procedimientos del Laboratorio**

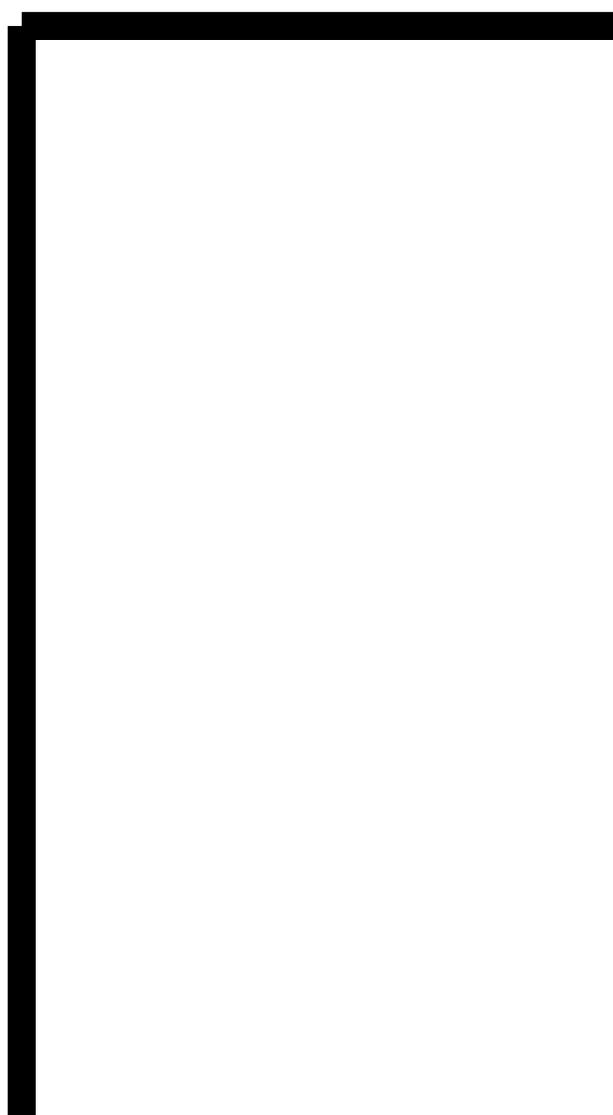
**Contenido de Humedad** – El contenido de humedad de un suelo es definido por la razón entre el peso del agua que contiene el suelo en su estado natural y el peso del suelo después de haber sido secado. El contenido de humedad se expresa en por ciento.

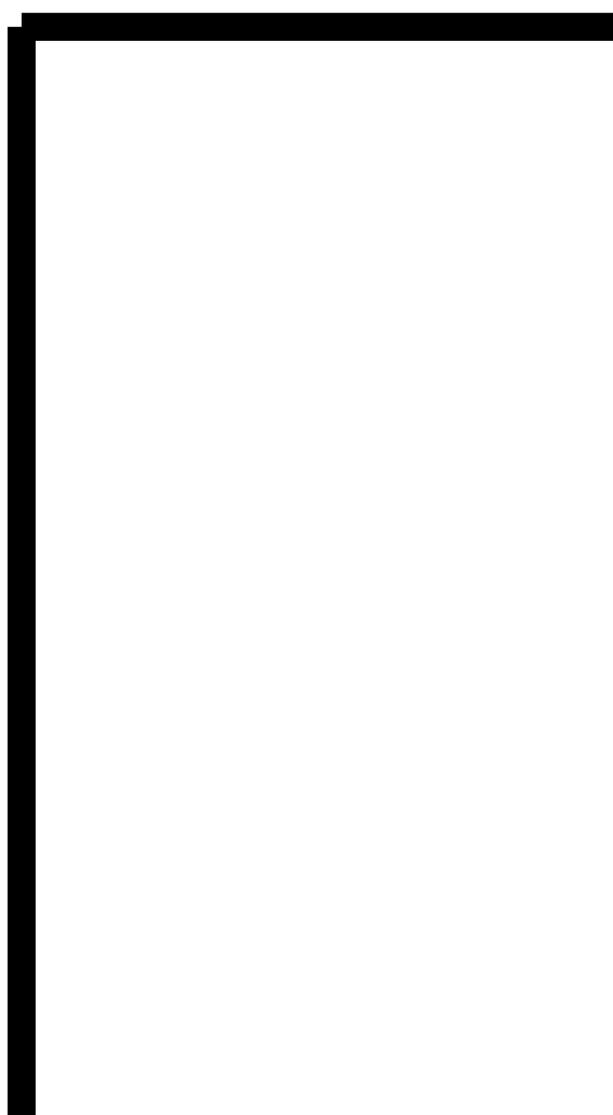
**Descripción de Suelos** – Los suelos son descritos de acuerdo a sus componentes, textura y plasticidad. Los suelos granulares son suelos compuestos principalmente de granos gruesos (grava y arena). Las arcillas y limos son suelos de grano fino que pueden o no presentar cohesión y plasticidad.

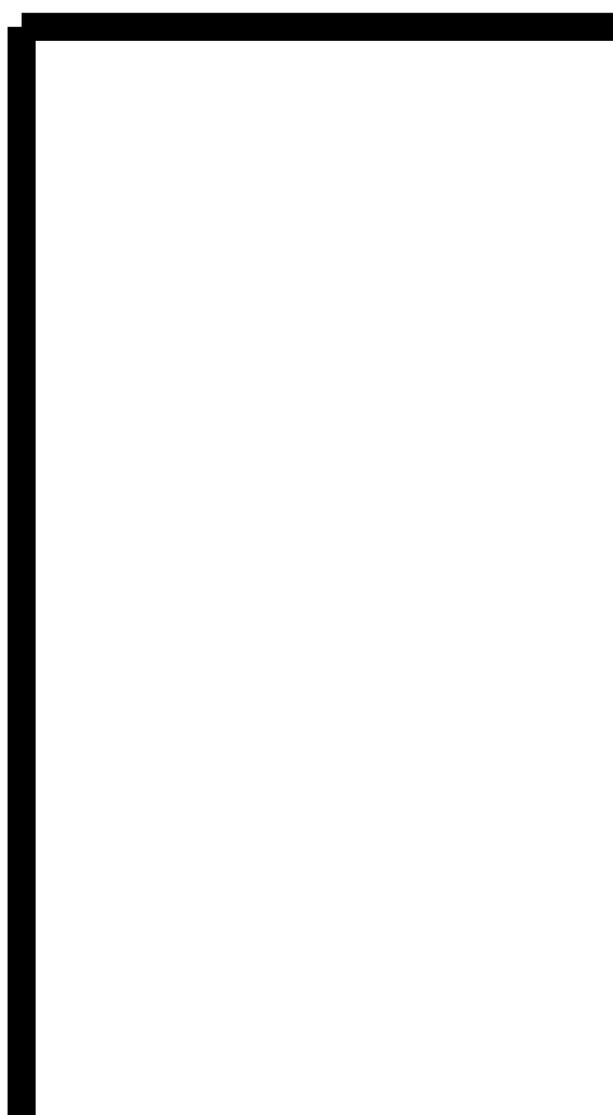
**Resistencia a la Compresión Simple ( $q_u$ )** – Esta resistencia es determinada sometiendo una muestra cilíndrica de suelo cohesivo a una carga axial en compresión o utilizando un penetrómetro de mano.

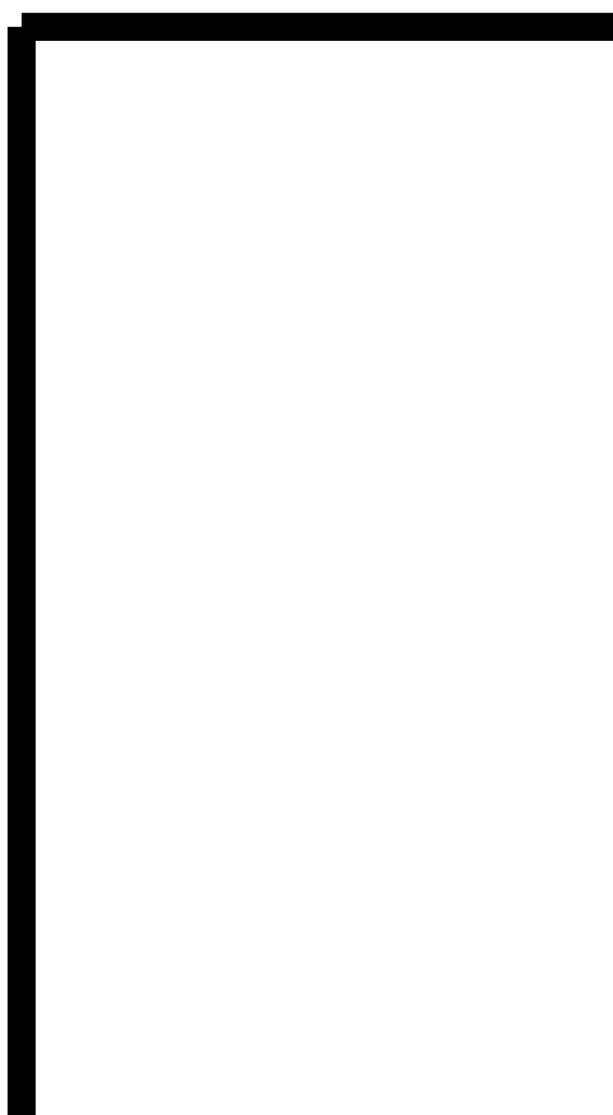
## **APÉNDICE 2**

Registro de barrenos y Resultados de Pruebas











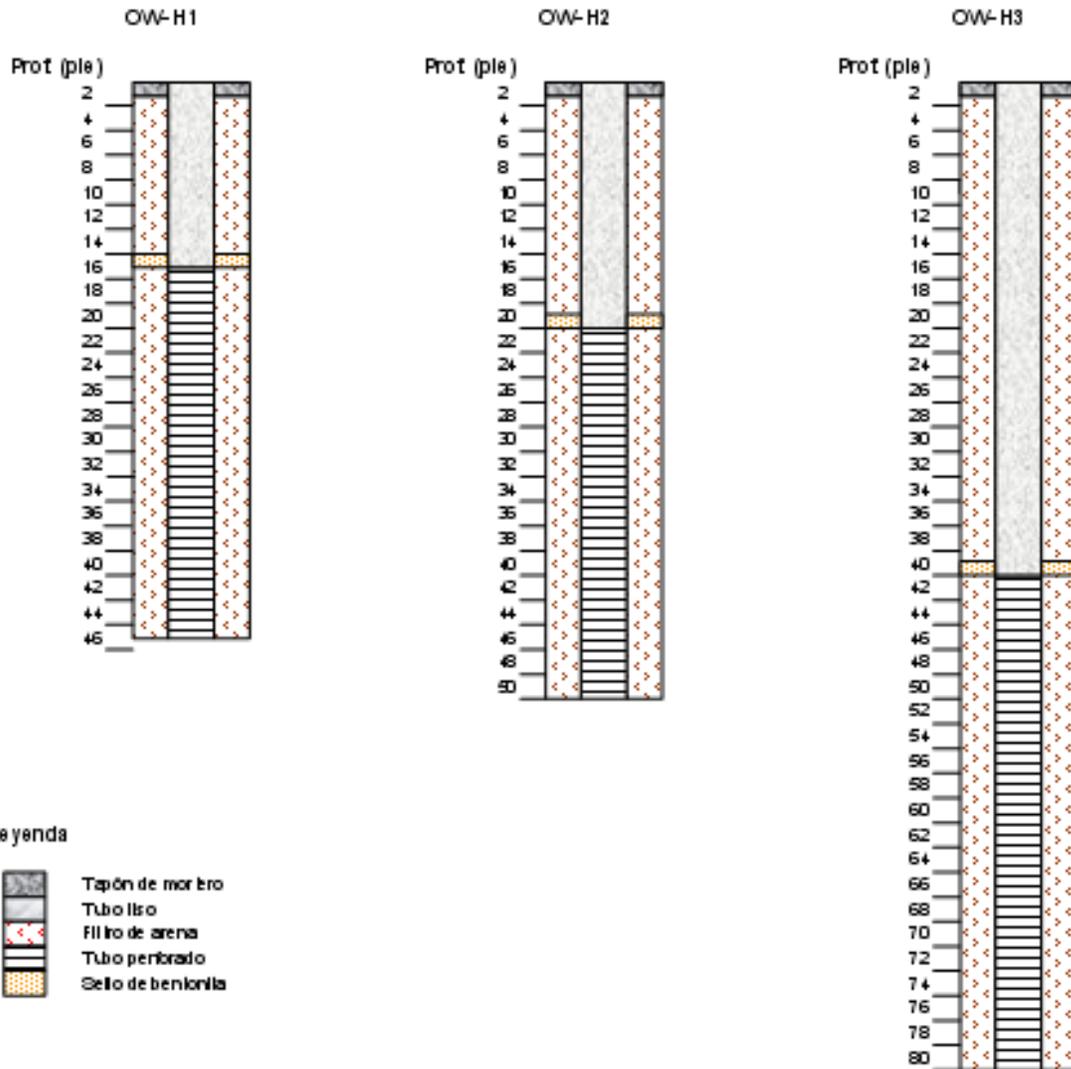




## **APÉNDICE 3**

Pozos de observación

## Pozos de observación (DW) - Vertedero de Juncos



Lecturas				Lecturas				Lecturas			
Fecha	OW	Leotura (pie)	Avg.	Fecha	OW	Leotura (pie)	Avg.	Fecha	OW	Leotura (pie)	Avg.
5/15/08	1	28	28.88	5/15/08	2	30	28.89	6/17/08	3	0	0.00
6/17/08	*	29.75		5/19/08	*	28.25		6/18/08	*	0	
	*			6/17/08	*	28.42			*		