

Con base en la función de regresión lineal obtenida se pudo convertir el valor de gravedad de cada celda de la grilla de anomalía residual en valores de profundidad a la roca o el espesor de los sedimentos, (Figura 2.6). Al comparar los valores de profundidad obtenidos en el mapa con los puntos de control se observa que la diferencia no supera los 5 metros.

Es de anotar que el mapa obtenido no hace distinción entre los diferentes tipos de rocas presentes en el área de estudio y debe interpretarse como el límite entre sedimentos (arcillas y/o arenas) y roca (arcillolita y/o areniscas)

2.3 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Los estudios de zonificación geotécnica del subsuelo de la ciudad de Santafé de Bogotá realizados con anterioridad a este trabajo han puesto en evidencia la presencia de diferentes zonas con características geomecánicas homogéneas. De acuerdo con INGEOMINAS (1988) y Martínez et al (1990,1992), es posible identificar 5 zonas cuya descripción a grandes rasgos es la siguiente.

- Zona montañosa caracterizada por la presencia de areniscas duras resistentes a la erosión y arcillolitas cuya resistencia y deformabilidad dependen de su humedad.
- Zona de piedemonte o de conos de deyección conformada por materiales que bajo el efecto de la gravedad han sufrido movimientos y se han depositado en forma de cono o abanico
- Zona de suelos duros en donde predominan las arcillas preconsolidadas con intercalaciones de arena y suelos arenosos de origen aluvial.
- Zona de suelos blandos caracterizada por la presencia de arcillas blandas de alta compresibilidad.
- Zona de Rondas de ríos y humedales a la cual pertenecen los cuerpos de agua de la ciudad: humedales, antiguos lagos y zonas de inundación.

Si bien el subsuelo de la ciudad de Bogotá ha sido estudiado desde hace algún tiempo desde el punto de vista de su resistencia y compresibilidad, cabe destacar que el conocimiento de su comportamiento bajo cargas cíclicas similares a las producidas durante los sismos es prácticamente nulo. La investigación geotécnica realizada en el proyecto, trata de llenar este vacío.

El comportamiento dinámico de los suelos se investigó en laboratorio utilizando principalmente el aparato triaxial cíclico y un conjunto de elementos

piezoeléctricos formado por un generador y un receptor de ondas de corte. El aparato triaxial cíclico se utilizó para investigar las propiedades del suelo en el intervalo de medias a grandes deformaciones cortantes ($10^{-4} < \gamma_c < 10^{-2}$)*, para las deformaciones cortantes muy pequeñas ($\gamma_c < 10^{-6}$) se utilizó el aparato piezoeléctrico.

2.3.1 Localización de los sondeos

A partir de los resultados de la recopilación de información geotécnica (INGEOMINAS, 1995-b) y de las zonificaciones geotécnicas existentes, se determinaron los sitios para ejecutar las perforaciones necesarias con el fin de lograr la caracterización geotécnica de cada zona.

En total se realizaron 38 sondeos y 14 apiques cuya localización se indica en la Figura 2.7. La profundidad de los sondeos realizados varió desde 20 m hasta 250 m. Para asegurar la buena calidad de las muestras se utilizó un muestreador de pistón estacionario el cual, comparado con las otras técnicas de muestreo, ofreció las mejores características en cuanto a la inalterabilidad de las muestras.

Mediante los sondeos profundos se trató de encontrar el basamento rocoso y recuperar muestras inalteradas que permitieran su caracterización desde el punto de vista del comportamiento estático y dinámico. Aunque el objetivo principal de los sondeos profundos fue llegar al basamento rocoso, en razón de su costo la profundidad máxima se limitó a 250 m. Teniendo en cuenta esta restricción, 3 de los 5 sondeos profundos realizados lograron llegar hasta la roca. Estos sondeos están localizados en INGEOMINAS (CII 53 con Cra 30) en donde la roca se encuentra a 179 m de profundidad, Universidad Agraria (CII 170 con Autopista Norte) cuyo basamento se encuentra a 130 m de profundidad y en la calle 127 con autopista norte en donde la roca se encuentra a 190 m de profundidad. En los sondeos localizados en el Aeropuerto El Dorado y en Tibabuyes (CII 139 - Av. Cundinamarca) perforados hasta 250 m y 246 m, respectivamente, no fue posible llegar al basamento rocoso. En forma general se perforaron 2483 metros, donde se realizaron aproximadamente los siguientes ensayos: 2000 humedades, 2000 clasificaciones, 1000 densidades aparentes, 100 gravedades específicas, 100 granulometrias, 1000 compresiones simples, 170 triaxiales estáticos, 100 triaxiales dinámicos, 100 consolidaciones y 40 bender element, entre otros. Dentro de los ensayos de campo se hicieron ensayos de

* Como convención en este informe las deformaciones axiales y de cortante se presentan en términos de deformación unitaria. Siempre que las deformaciones se expresen en porcentaje se indicará explícitamente con el símbolo %

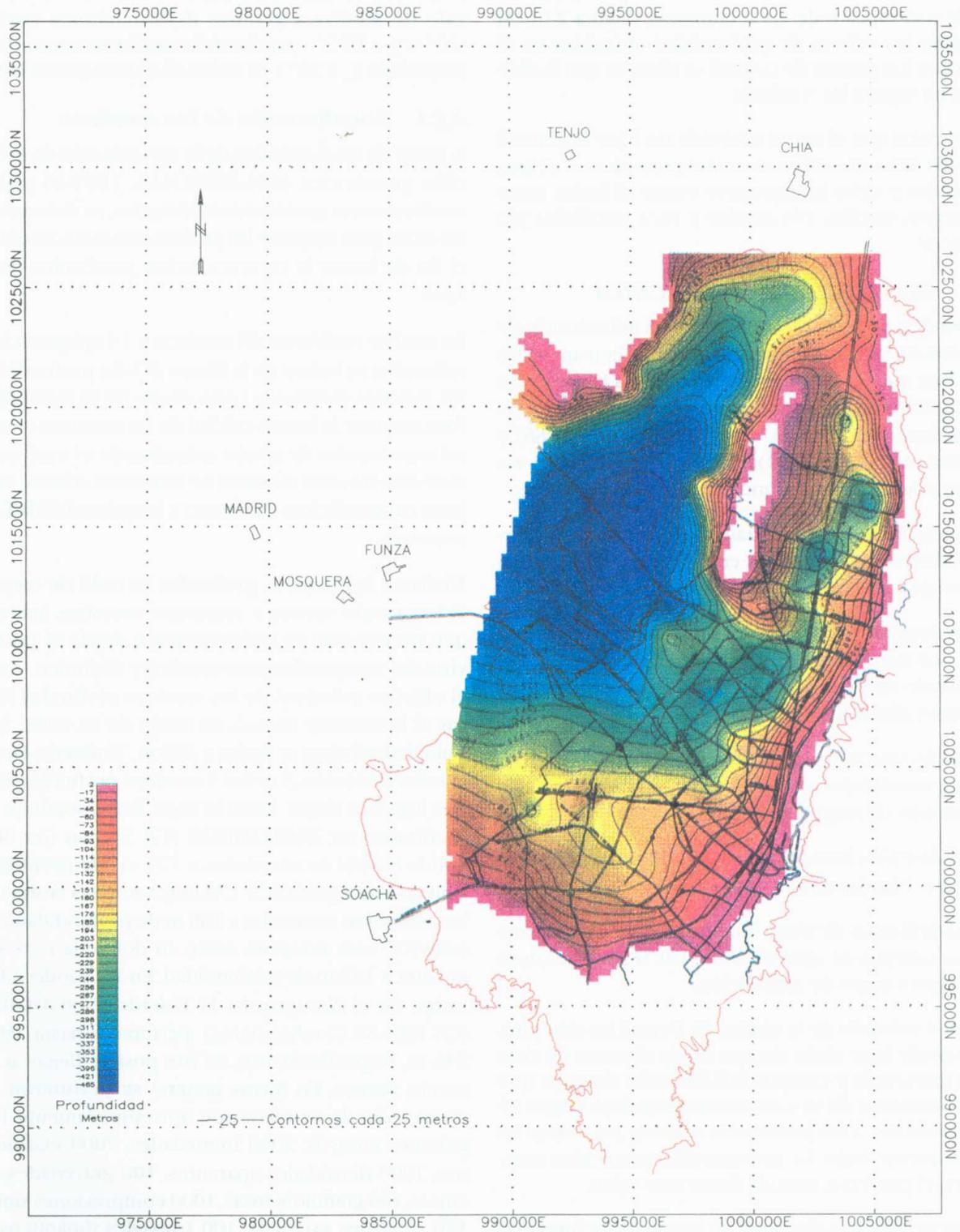


FIGURA 2.6 MAPA DEL ESPESOR DE SEDIMENTOS



FIGURA 2.7 LOCALIZACIÓN DE LOS SONDEOS

presiómetro de Menard y de down-hole. El detalle de los resultados obtenidos se encuentran en el informe de "Ensayos de Laboratorio y Zonificación Geotécnica". (Universidad de los Andes e INGEOMINAS, 1996)

2.3.2 Propiedades básicas del subsuelo de Santafé de Bogotá

Para el análisis de las propiedades básicas del subsuelo de la ciudad se tuvieron en cuenta la totalidad de los sondeos realizados. Como ejemplo típico en la Figura 2.8 se presenta el perfil de propiedades básicas encontradas en el sondeo realizado en INGEOMINAS.

A continuación se hace una breve descripción de cada una de las propiedades básicas del subsuelo.

2.3.2.1 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg se determinaron por los métodos usuales de laboratorio. En la zona de arcillas blandas de la ciudad de Bogotá, la cual se encuentra en la parte norte de la ciudad, es posible obtener límites líquidos superiores a 200% e índices de plasticidad superiores a 100% principalmente en las capas más superficiales. Esta característica ubica al subsuelo de la ciu-

dad de Bogotá entre los suelos con mayor dificultad ingenieril en el mundo.

Variación del límite líquido con la profundidad

En la zona de arcillas blandas, el perfil de variación de los límites de Atterberg con la profundidad muestra un comportamiento típico de las formaciones lacustres. En el sondeo realizado en INGEOMINAS se observa que el límite líquido pasa de un máximo de 200% en superficie hasta un mínimo de 30% en profundidad. Adicionalmente, es importante notar que la dispersión del límite líquido disminuye con la profundidad. Particularmente se encuentra que de 0 a 60 m de profundidad es posible encontrar valores que varían de 30 a más de 200%. Existen diversas explicaciones a estos fenómenos fundamentadas en el proceso de sedimentación y en los aportes de eventos volcánicos, sin embargo, es conveniente esperar los resultados de los estudios de palinología que adelanta INGEOMINAS para plantear hipótesis bien fundamentadas sobre el proceso de depositación.

Hacia el sur de la ciudad se puede identificar una zona de suelos duros en la que se encuentran principalmente dos tipos de suelo: el primero, formado por arcillas limosas secas y preconsolidadas ubicado en la parte oriental y el segundo, al occidente formado principalmente por suelos más arenosos de origen aluvial en su mayoría, que son producto del transporte de sedimentos del río Tunjuelito, entre otros. La zona arcillosa se caracteriza por su plasticidad baja a media, encontrándose el límite líquido en un rango entre 20 y 70% en los primeros 30 m, en profundidad la arcilla tiende a volverse más arenosa y presenta un límite líquido de alrededor del 30%. Adicionalmente se encuentra una capa de turba aproximadamente a 30 m de profundidad con un espesor de 4 m en promedio. La parte occidental, como ya se mencionó, se caracteriza principalmente por la presencia de arenas de grano fino a muy fino, con poca presencia de arcillas. Hacia los límites con las zonas arcillosas (la zona blanda y la zona de arcillas duras) el contenido de arcillas aumenta aunque no presentan una alta plasticidad (límite líquido alrededor de 30%). Esta diferencia en plasticidad con respecto a las otras zonas puede explicarse por una mayor influencia del transporte de sedimentos de los ríos.

En la Figura 2.9 están agrupados la totalidad de los resultados de límite líquido en función de la profundidad en la zona de arcillas blandas. En este gráfico se observan las características ya anotadas: gran dispersión en los primeros 50 m, disminución del límite líquido con la profundidad y presencia de un estrato de alta plasticidad a 160 m.

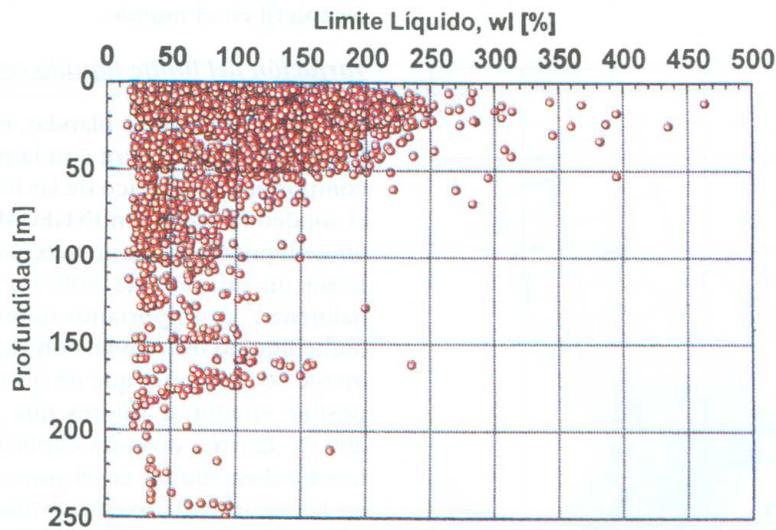


FIGURA 2.9 GRÁFICO DEL LÍMITE LÍQUIDO EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD - ZONA DE ARCILLAS BLANDAS

Correlación entre el índice de plasticidad y el límite líquido

Es conocido en geotécnica que los suelos de un mismo origen tienden a ubicarse en el gráfico de plasticidad de Casagrande en una franja bien definida, esto implica la existencia de una relación entre el índice de plasticidad y el límite líquido.

Con base en el resultado de todos los puntos estudiados es posible proponer la siguiente correlación entre el índice de plasticidad y el límite líquido para los suelos de Bogotá:

$$I_p = 0.7792 * (w_l - 15.2), \quad r = 0.967 \quad \text{Ec.2.3}$$

En la Figura 2.10 se presentan los resultados de los ensayos de límites líquido y plástico de la totalidad del estudio en el gráfico de plasticidad de Casagrande. Igualmente se presenta en esta figura la relación propuesta y la franja correspondiente a los suelos de Bogotá.

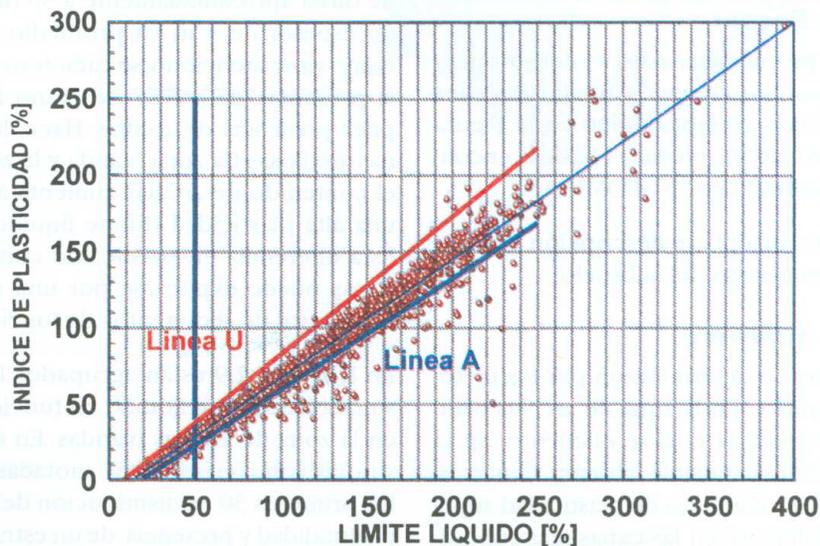


FIGURA 2.10 GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE PARA TODOS LOS SUELOS ESTUDIADOS