UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estudio de las deformaciones superficiales por cambios de succión y su influencia en los fenómenos de subsidencia en la Ciudad de Bogotá

Leonardo Rojas Rojas

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Maestría en Ingeniería – Geotecnia
Bogotá D.C.
2013

Estudio de las deformaciones superficiales por cambios de succión y su influencia en los fenómenos de subsidencia en la Ciudad de Bogotá

Leonardo Rojas Rojas
Código: 296514

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el título de
Magister en Ingeniería - Geotecnia

Director:
Dr. Ing. Guillermo Eduardo Ávila Álvarez**.**

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Maestría en Ingeniería – Geotecnia
Bogotá D.C.
2013

A mis padres, mi hermana y mi esposa…

“La Imaginación es más importante que el conocimiento”

Albert Einstein

Agradecimientos

Quiero aprovechar la oportunidad para agradecer al director de mi tesis, el Ing. Guillermo Ávila, por su orientación, preocupación y valiosos aportes durante el desarrollo de mi trabajo de investigación. A los jurados, el Ing. Mario Camilo Torres y Octavio Coronado, por sus valiosos comentarios durante la sustentación de la tesis, tanto al contenido del informe escrito como a la metodología, análisis y resultados obtenidos en el análisis de deformaciones por cambios en la succión.

A los integrantes del laboratorio de suelos del Instituto de Ensayos e Investigaciones (I.E.I) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, por facilitarme las instalaciones para la realización de las campañas de exploración geotécnica en el campus universitario, y de los ensayos de laboratorio en las muestras recuperadas como resultado de estas campañas, así como sus valiosos aportes en la realización de los mismos.

A mis padres, María Antonia y Gustavo, mi hermana, Johanna y mi esposa, Leidy, por su apoyo incondicional y paciencia, y su acompañamiento permanente en el desarrollo del presente trabajo de investigación. Ellos fueron mi inspiración y modelo a seguir para lograr ser el profesional que soy y culminar satisfactoriamente esta etapa de mi formación profesional.

No me queda más que decir, gracias por todo.

Resumen

ESTUDIO DE LAS DEFORMACIONES SUPERFICIALES POR CAMBIOS DE SUCCIÓN Y SU INFLUENCIA EN LOS FENÓMENOS DE SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ

En esta tesis se presenta el estudio de las deformaciones que pueden generarse en la arcilla de Bogotá, específicamente en el sector de la Universidad Nacional de Colombia, para los primeros 6 m de profundidad, debido a cambios de humedad, que a su vez generan cambios de succión, cuya magnitud se estimó con base en las curvas de retención de humedad y de compresibilidad disponibles para estos materiales. Se hicieron cuatro campañas de muestreo en un año, a partir de la cuales se determinó la humedad en diferentes tiempos y a diferentes profundidades. Con estos datos fue posible conocer los cambios de humedad y de succión en el perfil estudiado. Para determinar las deformaciones producidas por cambios de succión, se utilizó el Modelo Básico de Barcelona (BBM) desarrollado por Alonso et al, 1990, el cual toma como variables los cambios en la succión y el esfuerzo neto medio, tanto en procesos de humedecimiento como de secado. Con base en los resultados obtenidos, se puede establecer que los cambios de volumen producidos por succión, representan una componente importante en el proceso de subsidencia y deben evaluarse con mayor detalle, midiendo localmente las deformaciones.

Palabras claves: Subsidencia, Succión, Esfuerzo Neto Medio, Zona Activa, Curvas de Retención de Humedad, Curvas de Compresibilidad, Deformación Volumétrica

Abstract

STUDY OF SUPERFICIAL STRAIN BY CHANGES IN SUCTION AND ITS INFLUENCE ON SUBSIDENCE PHENOMENA IN BOGOTA CITY

This thesis presents the study of deformations that can be generated on clay in Bogota, specifically in the area of the National University of Colombia, for the first 6 m of depth, due to changes in humidity, which in turn result in changes of suction, whose magnitude is estimated based on the moisture retention and compressibility curves available for these materials. It did make four sampling seasons in a year, from which moisture was determined at different times and at different depths. With these data it was possible to know the changes in humidity and suction in the studied profile. To determine the deformations produced by suction changes was used the Basic Barcelona Model (BBM) developed by Alonso et al, 1990, which takes as variables, the changes in the suction and average net stress both in wetting and drying processes. Based on the results obtained, it can establish that the volume changes caused by suction, represent an important component in the process of subsidence and should be evaluated in more detail, measuring local deformations.

Key Words: Subsidence, Suction, Average Net Stress, Active zone, Moisture Retention Curves, compressibility curves, volumetric strain.

Contenido

		Pág.
Resumen y Abstract		V
Lista de figuras		X
Lista de tablas		XIII
Indice de fotografías		XV
1	Introducción	1
1.1	Generalidades	1
1.2	Alcance de la investigación	1
1.3	Hipótesis	2
1.4	Objetivos	2
1.5	Metodología de trabajo	3
2	Planteamiento del problema	7
2.1	Definición de subsidencia	7
2.2	Casos históricos de subsidencia	8
2.3	Problemática actual del fenómeno en la ciudad de bogotá	10
2.4	Deformaciones superficiales en el terreno por cambios de succión y su influencia en los fenómenos de subsidencia	15
3	Definición del área de estudio	19
3.1	Area de influencia directa	19
3.2	Area de mayor subsidencia	20
3.3	Area de estudio para análisis	23
4	Características geotécnicas del área de estudio	27
4.1	Contexto geológico	27
4.2	Campañas de exploración geotécnica	29
4.2.1	Exploración del subsuelo	29
4.2.2	Ensayos de laboratorio	29
4.2.3	Pruebas de campo	30

4.3 Caracterización geotécnica 32
4.4 Perfil geotécnico promedio 36
4.5 Mineralogía 36
4.6 Microestructura 36
4.7 Curvas de retención de humedad del suelo 38
4.7.1 Curva de retención humedad natural – succión 40
4.7.2 Curva de retención grado de saturación – succión 42
4.7.3 Curva de retención humedad volumétrica – succión 45
4.8 Curvas de compresibilidad del suelo 47
4.8.1 Curva relación de vacíos – succión 47
4.8.2 Curva relación de vacíos – esfuerzo vertical efectivo 49
5. Análisis de deformaciones superficiales por cambios de succión en el área de estudio 51
5.1 Definición de perfiles estratigráficos 51
5.2 Curvas de retención de humedad utilizadas 53
5.2.1 Curva final humedad natural – succión 54
5.2.2 Curva final grado de saturación – succión 56
5.2.3 Curva final humedad volumétrica – succión 57
5.3 Curvas de compresibilidad utilizadas 60
5.3.1 Curva final relación de vacíos – succión 60
5.3.2 Curva final relación de vacíos – esfuerzo vertical efectivo 62
5.4 Identificación de la zona activa del suelo 64
5.4.1 Variación de la succión con la profundidad 65
5.4.2 Variación del esfuerzo neto medio con la profundidad 67
5.5 Formulación del modelo utilizado para el cálculo de deformaciones superficiales por cambios de succión 71
5.5.1 Modelo volumen específico – succión 72
5.5.2 Modelo volumen específico – esfuerzo neto medio 74
5.5.3 Integración de la succión y el esfuerzo neto medio para el cálculo de deformaciones
5.6 Escenarios de análisis 78
5.6.1 Escenario normal – suelo saturado 79
5.6.2 Escenario extremo – extrema sequía suelo parcialmente saturado 79
5.7 Resultados obtenidos en el cálculo de deformaciones 79
5.7.1 Escenario normal – suelo saturado 81
5.7.2 Escenario extremo – extrema sequía suelo parcialmente saturado 85

5.8 Comparación con otros resultados 88
6 Conclusiones y recomendaciones 91
Anexo A informe visita de inspección – zona de mayor subsidencia 93
Anexo B Tabla resumen de ensayos de laboratorio realizados en las diferentes campañas de exploración geotécnica 84
Anexo C ajuste de curvas de retención al modelo teórico de Van Genuthen 95
Anexo D ajuste de curvas de compresibilidad al modelo básico de Barcelona - BBM 96
Anexo E tablas de cálculo para el análisis de deformaciones por cambios de succión 97
Bibliografía 99

Lista de figuras

Pág.

Figura 2-1 Mapa de Tasa Lineal de Deformación para el Área Urbana de Puente Aranda – Período comprendido entre Octubre de 1997 a Marzo de 2009 (ICC y FOPAE, 2009). 11
Figura 2-2 Mapa de Localización General de las estaciones de medición de la Red Geodésica de Bogotá (ICC y FOPAE, 2009). 13
Figura 2-3 Mapa de Deformación registrada por las estaciones de la Red Geodésica, para el Área Urbana de Bogotá – Campañas 17
Figura 2-4 Modelo conceptual del perfil de variación de la succión con la profundidad, en Suelos Parcialmente Saturados (Lu y Likos, 2004). 17
Figura 3-1 Delimitación del área de influencia directa del estudio según el Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá (Ingeominas y Uniandes, 1997). 20
Figura 3-2 Delimitación del área de mayor subsidencia según el Estudio de Interferometría Diferencial (ICC y FOPAE, 2009). 21
Figura 3-3 Localización general de la zona de Puente Aranda con evidencia de hundimiento del terreno, como resultado de la visita de inspección de campo realizada (Tomada de Google Earth). 22
Figura 3-4 Planta general de localización del área de estudio en el campus de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá (Tomada de Google Earth). 23
Figura 4-1 Corte Geológico Generalizado de la Sabana de Bogotá, en sentido E-W (Adaptado de Ingeominas y Universidad de los Andes (1997) en: Ávila, 2004). 28
Figura 4-2 Planta general de localización de las diferentes campañas de exploración geotécnica en el Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá (Tomada de Google Earth). 30
Figura 4-3 Carta de Plasticidad de Casagrande para los materiales encontrados en el área de estudio - Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. 33
Figura 4-4 Variación de la humedad natural y los límites de consistencia con la profundidad en el área de estudio – Sondeo 1. 34
Figura 4-5 Variación de la humedad natural y los límites de consistencia con la profundidad en el área de estudio – Sondeo 2. 34
Figura 4-6 Variación del peso unitario total y seco con la profundidad en el área de estudio – Sondeo 1. 35
Figura 4-7 Variación del peso unitario total y seco con la profundidad en el área de estudio – Sondeo 2. 35
Figura 4-8 Fotografía de la microfábrica de una muestra de arcilla tomada en el área de estudio, a una profundidad promedio de 2.5 m (Ávila, 2004). 37

Figura 4-9 Características de una curva de retención de humedad obtenida por procesos de secado y humedecimiento (Fredlund y Xing, 1994). 38
Figura 4-10 Curva de Retención de Humedad Natural - Succión - Proceso de Secado. 41
Figura 4-11 Curva de Retención de Humedad Natural - Succión – Proceso de Humedecimiento. 42
Figura 4-12 Curva de Retención de Grado de Saturación - Succión - Proceso de Secado. 44
Figura 4-13 Curva de Retención de Grado de Saturación - Succión – Proceso de Humedecimiento. 46
Figura 4-14 Curva de Retención de Humedad Volumétrica - Succión - Proceso de Secado. 46
Figura 4-15 Curva de Retención de Humedad Volumétrica - Succión – Proceso de Humedecimiento. 48
Figura 4-16 Modelo de Ajuste para la Curva Relación de Vacíos – Succión en procesos de Humedecimiento y Secado. 49
Figura 4-17 Curva Relación de Vacíos - Succión - procesos de Secado y Humedecimiento. 49
Figura 4-18 Modelo de Ajuste para la Curva Relación de Vacíos – Esfuerzo Vertical Efectivo. 50
Figura 4-19 Curva Relación de Vacíos - Esfuerzo Vertical Efectivo. 53
Figura 5-1 Perfil de Variación de Humedad Natural con la profundidad - Puntos de inspección 1 y 2. 55
Figura 5-2 Curva de Retención de Humedad Natural - Succión para el Punto de inspección 1. 56
Figura 5-3 Curva de Retención de Humedad Natural - Succión para el Punto de inspección 2. 57
Figura 5-4 Curva de Retención de Grado de Saturación - Succión para los Puntos de inspección 1 y 2. 59
Figura 5-5 Curva de Retención de Humedad Volumétrica - Succión para el Punto de inspección 1. 59
Figura 5-6 Curva de Retención de Humedad Volumétrica - Succión para el Punto de inspección 2. 61
Figura 5-7 Curva Relación de Vacíos - Succión para el Punto de inspección 1. 62
Figura 5-8 Curva Relación de Vacíos - Succión para el Punto de inspección 2. 63
Figura 5-9 Curva Relación de Vacíos - Esfuerzo Vertical Efectivo para el Punto de inspección 1. 64
Figura 5-10 Curva Relación de Vacíos - Esfuerzo Vertical Efectivo para el Punto de inspección 2. 64
Figura 5-11 Profundidad de la zona activa y variaciones estacionales de la humedad (AIS y SCG, 2010). 67
Figura 5-12 Perfil de Variación de la Succión con la profundidad - Punto de análisis 1 y 2. 71
Figura 5-13 Perfil de Variación del Esfuerzo Neto Medio con la profundidad - Punto de análisis 1 y 2. 73
Figura 5-14 Curva Volumen Específico - Succión para el Punto de análisis 1. 74
Figura 5-15 Curva Volumen Específico - Succión para el Punto de análisis 2.

Figura 5-16 Curva Volumen Específico - Esfuerzo Neto Medio para el Punto de análisis 1. 76
Figura 5-17 Curva Volumen Específico - Esfuerzo Neto Medio para el Punto de análisis 2. 76
Figura 5-18 Perfil de Variación de la succión con la profundidad para la condición extrema y su incidencia en la humedad natural y el esfuerzo neto medio del suelo - Punto de análisis 1 y 2. 80
Figura 5-19 Variación de la deformación con la profundidad (Condición Normal) - Punto de análisis 1. 82
Figura 5-20 Variación de la deformación con la profundidad (Condición Normal) - Punto de análisis 2. 83
Figura 5-21 Variación de la deformación volumétrica acumulada (a nivel superficial) con el tiempo - Punto de análisis 1 y 2. 84
Figura 5-22 Variación del desplazamiento vertical acumulado (a nivel superficial) con el tiempo - Punto de análisis 1 y 2. 85
Figura 5-23 Variación de la deformación con la profundidad (Condición Extrema) - Punto de análisis 1. 86
Figura 5-24 Variación de la deformación con la profundidad (Condición Extrema) - Punto de análisis 2. 87
Figura 5-25 Variación de la deformación volumétrica acumulada (a nivel superficial) con la succión - Punto de análisis 1 y 2. 87
Figura 5-26 Variación del desplazamiento vertical acumulado (a nivel superficial) con la succión - Punto de análisis 1 y 2. 88
Figura 5-27 Comparación entre los valores de desplazamiento vertical en superficie y el régimen de precipitación del área de estudio – Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. 89

Lista de tablas

Tabla 2-1 Localización General de las estaciones de medición de la Red Geodésica de Bogotá 12
Tabla 4-1 Perfil Geotécnico Promedio del Área de Estudio (Tomado de Pineda, 2003) 36
Tabla 4-2 Composición Mineralógica de los materiales presentes en el sitio de estudio (Ávila, 2004) 36
Tabla 4-3 Ecuaciones de calibración del papel filtro utilizadas en la medición de la succión matricial, para procesos de humedecimiento y secado (Tomado de Pineda, 2003). 39
Tabla 4-4 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva Humedad Natural – Succión – Proceso de Secado. 40
Tabla 4-5 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva Humedad Natural – Succión – Proceso de Humedecimiento. 40
Tabla 4-6 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva Grado de Saturación – Succión – Proceso de Secado. 43
Tabla 4-7 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva Grado de Saturación – Succión – Proceso de Humedecimiento. 43
Tabla 4-8 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva Humedad Volumétrica – Succión – Proceso de Secado. 45
Tabla 4-9 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva Humedad Volumétrica – Succión – Proceso de Humedecimiento. 49
Tabla 4-10 Parámetros básicos para la curva Relación de Vacíos – Succión – Procesos de Secado y Humedecimiento. 48
Tabla 4-11 Parámetros básicos para la curva Relación de Vacíos – Esfuerzo Vertical Efectivo. 50
Tabla 5-1 Datos de Variación de Humedad Natural con la profundidad - Punto de Inspección 1. 52
Tabla 5-2 Datos de Variación de Humedad Natural con la profundidad - Punto de Inspección 2. 52
Tabla 5-3 Parámetros básicos de las curvas de retención corregidos por efectos de la humedad de saturación (Wns) – Puntos de Inspección 1 y 2. 54
Tabla 5-4 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva humedad Natural – Succión – Punto de Análisis 1. 55

Tabla 5-5 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva humedad Natural – Succión – Punto de Análisis 2. 55
Tabla 5-6 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva Grado de Saturación – Succión – Puntos de inspección 1 y 2. 57
Tabla 5-7 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva Humedad Volumétrica – Succión – Punto de Inspección 1. 58
Tabla 5-8 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva Humedad Volumétrica – Succión – Punto de Inspección 2. 59
Tabla 5-9 Parámetros básicos de análisis para la curva Relación de Vacíos – Succión – Punto de Inspección 1. 61
Tabla 5-10 Parámetros básicos de análisis para la curva Relación de Vacíos – Succión – Punto de inspección 2. 61
Tabla 5-11 Parámetros básicos de análisis para la curva Relación de Vacíos – Esfuerzo Vertical Efectivo – Punto de Inspección 1. 63
Tabla 5-12 Parámetros básicos de análisis para la curva Relación de Vacíos – Esfuerzo Vertical Efectivo – Punto de Inspección 2. 63
Tabla 5-13 Datos de Variación de Succión con la profundidad – Punto de Análisis 1. 66
Tabla 5-14 Datos de Variación de Succión con la profundidad – Punto de Análisis 2. 66
Tabla 5-15 Datos de Variación del Esfuerzo Neto Medio con la profundidad – Punto de Análisis 1. 76
Tabla 5-16 Datos de Variación del Esfuerzo Neto Medio con la profundidad – Punto de Análisis 2. 70
Tabla 5-17 Parámetros básicos para la curva Volumen Específico – Succión – Punto de Análisis 1. 73
Tabla 5-18 Parámetros básicos para la curva Volumen Específico – Succión – Punto de Análisis 2. 73
Tabla 5-19 Parámetros básicos para la curva Volumen Específico – Esfuerzo Neto Medio – Punto de Análisis 1. 75
Tabla 5-20 Parámetros básicos para la curva Volumen Específico – Esfuerzo Neto Medio – Punto de Análisis 2. 75

Indice de fotografías

Pág.

Fotografía 3-1 Vista general del Punto de Inspección No. 1 localizado en el área externa al Instituto de Ensayos e Investigaciones I.E.I – Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. 24

Fotografía 3-2 Vista general del Punto de Inspección No. 2 localizado en el área externa al Edificio de Ingeniería Nuevo – Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. 25

Fotografía 4-1 Vista general de las campañas de exploración geotécnica realizada en el área externa del I.E.I – Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

Fotografía 4-2 Vista general de las campañas de exploración geotécnica realizada en el Edificio de Ingeniería Nuevo – Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. 31

Fotografía 4-3 Tipo de muestras recuperadas durante la ejecución de las campañas de exploración geotécnica en el Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. 32

1. Introducción

1.1 Generalidades

La subsidencia es la deformación generalizada de grandes extensiones del terreno, debida a múltiples causas, principalmente a la reducción de los niveles piezométricos del terreno en profundidad, desecación superficial por cambios de niveles freáticos, efectos de la vegetación, sobrecarga del terreno, descensos de la superficie del terreno por efectos tectónicos, consolidación secundaria de los depósitos de arcilla, y obras subterráneas y explotaciones mineras en profundidad (Tomado de Ávila y Castro, 2011).

Este fenómeno se ha presentado en varias ciudades del mundo, y existen casos muy documentados como el de Ciudad de México o el Valle de San Joaquín en Estados Unidos, en donde se han experimentado descensos de los niveles del terreno con una magnitud superior a 8 m, los cuales han generadonumerosos daños en su infraestructura y pérdidas económicas. Por tal razón, es importante conocer claramente los mecanismos que la producen en un sitio particular, con el fin de mitigar sus efectos sobre el terreno circundante y las estructuras aledañas.

1.2 Alcance de la investigación

Con este trabajo de investigación se pretende abordar la problemática del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá, estudiando las deformaciones superficiales debidas a cambios de succión, que corresponden a cambios estacionales en el terreno (a corto plazo) relacionados con los regímenes de lluvia y sequía de un sitio en particular, a partir de la aplicación de un modelo analítico de deformaciones para suelos parcialmente saturados.

Inicialmente, se definió el área de estudio con base en la información existente en el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá(INGEOMINAS y UNIANDES, 1997) y el estudio de InterferometríaDiferencial (ICC y FOPAE, 2009). Después, se realizó un

inventario de la información previa existente relacionada con el tema (condición geológica, geomorfológica e hidrogeológica de la ciudad de Bogotá, caracterización geotécnica de los materiales existentes superficialmente, lecturas de deformaciones en superficie obtenidas de monitoreos topográficos e interferometría diferencial, características de succión y curvas de retención de humedad, información hidrometeorológica, entre otros).

Con base en esta información y la ejecución de campañas de exploración geotécnica en dos puntos específicos ubicados en el área de estudio, se analizó el comportamiento de la humedad con el tiempo y en profundidad para los suelos existentes superficialmente, con el fin de detectar cambios u oscilaciones en estos materiales. Como resultado de estas campañas, se realizaron algunos ensayos de laboratorio en muestras tomadas en campo, encaminados a la caracterización geotécnica y a la generación de perfiles de variación de humedad natural con la profundidad.

Por último, se analizó el comportamiento de las deformaciones superficiales generadas por cambios de humedad en el tiempo y su efecto sobre la tasa de subsidencia en los suelos blandos de la ciudad de Bogotá, por medio de la aplicación del Modelo Básico de Barcelona (BBM) para suelos parcialmente saturados.

1.3 Hipótesis

La hipótesis del presente trabajo de investigación es, que “las deformaciones que se han medido como subsidencia del terreno obedecen tanto a fenómenos profundos relacionados con cambios en los niveles piezométricos, como a fenómenos superficiales generados por cambios de succión”.

1.4 Objetivos

El objetivo general de esta investigación es analizar las deformaciones superficiales presentes en un sector de los suelos blandos de la ciudad de Bogotá por cambios de succión, a partir de la información existente relacionada con el tema, la ejecución de campañas de exploración geotécnica y ensayos de laboratorio, y la aplicación de un modelo analítico de evaluación de deformaciones para suelos parcialmente saturados.

Entre los objetivos específicos se encuentran los siguientes:

- Conocer el comportamiento de los suelos blandos ante cambios estacionales de humedad, a partir de la caracterización de las curvas de retención de humedad disponibles para los materiales existentes superficialmente, en el campus de la Universidad Nacional, considerado como crítico por fenómenos de subsidencia.

- Establecer la variación de la succión y esfuerzo neto medio con la profundidad, y para diferentes períodos de tiempo, a partir de los datos de humedad natural obtenidos en las diferentes campañas de exploración geotécnica y la aplicación de las curvas de retención de humedad disponibles para los materiales existentes superficialmente.

- Establecer la variación de la deformación superficial (volumétrica y vertical) con la profundidad y para diferentes períodos de tiempo, a partir de los datos de succión y esfuerzo neto medio obtenidos como resultado del análisis de las diferentes campañas de exploración geotécnicay la aplicación del Modelo Básico de Barcelona (BBM) para suelos parcialmente saturados.

1.5 Metodología de trabajo

Para cumplir con los objetivos propuestos en esta investigación, se realizaron las siguientes actividades:

Definición del área de estudio: A partir de la información existente en el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá (INGEOMINAS y UNIANDES, 1997) y el Estudio de Interferometría Diferencial (ICC Y FOPAE, 2009), se definió el área de estudio, la cual comprende un sitio considerado como crítico por fenómenos de subsidencia en la ciudad de Bogotá, que en este caso corresponde al Campus de la Universidad Nacional.

Recopilación, revisión y análisis de información secundaria: Consiste en la recopilación, revisión y análisis de la información previa existente relacionada con el tema para el área de estudio (condición geológica, geomorfológica e hidrogeológica de la ciudad de Bogotá, caracterización geotécnica de los materiales existentes superficialmente, lecturas de deformaciones en superficie obtenidas de monitoreos

topográficos e interferometría diferencial, características de succión y curvas de retención de humedad, información hidrometeorológica, entre otros):

- Variaciones de nivel superficial con base en la información existente en algunas entidades públicas, como el INGEOMINAS, el IGAC y la DPAE.

- Caracterización geológica y geotécnica de los materiales existentes superficialmente (entre 0 y 5 m de profundidad).

- Información existente sobre características de succión y curvas de retención de humedad para los materiales existentes superficialmente (entre los 0 y 5 m de profundidad).

- Información existente sobre estudios hidrometeorológicos realizados en la ciudad de Bogotá, durante los últimos 15 años.

- Información existente sobre otras características de estos suelos, tales como mineralogía, estudios de fábrica, compresibilidad, entre otros.

Exploración geotécnica y ensayos de laboratorio: Se realizó un programa de exploración geotécnica en el área de estudio, el cual consistió principalmente en la ejecución de cuatro campañas de dos sondeos manuales para diferentes épocas del año, los cuales fueron distribuidos convenientemente en el área de estudio.

En cada sondeo se recuperaron muestras inalteradas en tubos de pared delgada, las cuales fueron utilizadas para hacer descripción visual y algunos ensayos de laboratorio, encaminados principalmente a la clasificación geotécnica del suelo y generación de perfiles de variación de la humedad natural y la succión con la profundidad, en los materiales existentes superficialmente.

No fue necesario realizar ensayos de succión, debido a que se dispone de información de curvas de retención de humedad y consolidación unidimensional, para los materiales existentes superficialmente.

Análisis de las deformaciones superficiales por cambios de humedad: Con base en la información obtenida en las actividades anteriores, se realizó un análisis de las deformaciones superficiales generadas por cambios de humedad en el tiempo y su efecto sobre la tasa de subsidencia en los suelos blandos de este sector de la ciudad de Bogotá.

Para esto, se generaron dos perfiles estratigráficos de análisis en el área de estudio, en los cuales se puede apreciar la distribución en profundidad de los materiales existentes superficialmente. Este análisis incluyó las siguientes etapas:

- Cambios de humedad natural y succióncon el tiempo (períodos de humedecimiento y secado del suelo a nivel superficial).
- Cambios en el esfuerzo neto mediodel suelo con el tiempo.

- Evaluación simplificada unidimensional de los cambios de volumen y deformaciones generadas (expansión y contracción) con el tiempo, utilizando el Modelo Básico de Barcelona (BBM), a partir de la variación de la succión y el esfuerzo neto medio, con respecto a la relación de vacíos del suelo a nivel superficial.

2. Planteamiento del problema

La subsidencia es un fenómeno que ha sido estudiado en varias ciudades del mundo,tales como Ciudad de México, Venecia, Japón o el Valle de San Joaquin (USA), en donde se han presentado deformaciones diferenciales en el terreno con una magnitud mayor a 8 m, asociadas principalmente a la extracción de aguas subterráneas para uso industrial.

El estudio de la subsidencia en la ciudad de Bogotá se viene efectuandodesde hace unos 20 años, como una iniciativa para dar explicación a los diferentes interrogantes planteados por técnicos y científicos respecto a la evidencia de deformaciones superficiales en el terreno que han afectado diversos tipos de estructuras. Entre los estudios más relevantes se encuentran, el de Ávila (1998), ICC Y FOPAE (2009), y las mediciones directas a nivel superficial realizadas por el IGAC desde el año 2003 (niveles y GPS de precisión).

Las lecturas que se tienen hasta el momento, indican que efectivamente se presenta una tasa de subsidencia en los suelos blandos de la ciudad de Bogotá, del orden de 7 cm por año. Por otra parte, se han detectado oscilaciones tanto de expansión como de contracción, que al parecer están relacionadas con los cambios estacionales, que a su vez producen variaciones en la succión del suelo (ICC Y FOPAE, 2009).

Esta investigación pretende evaluar los órdenes de magnitud de las deformaciones superficiales en los suelos blandos de la ciudad de Bogotá, debidas a los cambios estacionales, para lo cual se hace necesario tener una adecuada caracterización de la relación succión-humedad (curvas de retención del suelo) y de la interacción del suelo con la atmósfera.

2.1 Definición de subsidencia

En términos generales, la subsidencia es el descenso del nivel del terreno en un área relativamente extensa, producido por fenómenos internos del suelo. De acuerdo con su

causa principal se puede clasificar en dos tipos: endógeno natural y exógena o antrópica (Prokopovich, 1979).

Subsidencia Endógena: Está relacionada con movimientos internos de la corteza terrestre como son tectonismo o vulcanismo, con procesos de consolidación natural de sedimentos blandos, con fenómenos de consolidación de suelos afectados por desbalances hídricos naturales de mediano o largo plazo, con contracción de suelos debido a la alteración de minerales, o con efectos de succión producida por la vegetación, especialmente árboles que demandan volúmenes de agua.

Subsidencia Exógena: Se presenta como consecuencia de la actividad humana. Se ha distinguido a nivel mundial como causa principal, la extracción de fluidos del subsuelo, especialmente agua e hidrocarburos. Esta extracción reduce la presión de poros y aumenta los esfuerzos efectivos en el suelo, lo cual da lugar a asentamientos por consolidación, cuya magnitud y velocidad dependen de las características de compresibilidad del material que se consolida y de los volúmenes de fluidos extraídos.

2.2 Casos históricos de subsidencia

En varios lugares del mundo se han presentado algunos problemas de subsidencia, asociados principalmente a la extracción de aguas subterráneas para uso industrial. El caso que más se asemeja a las condiciones geotécnicas de los suelos blandos de la ciudad de Bogotá, corresponde al de la ciudad de México, donde el depósito de origen lacustre ha presentado deformaciones diferenciales de hasta 8.5 m, entre los años 1830 y 1990, y tasas de subsidencia entre 15 y 46 cm por año, lo cual ha provocado rompimientos del sistema de drenaje, inundaciones en períodos lluviosos, y deformaciones en vías y edificios (Lesser y Cortes, 1998).

Otras ciudades que han evidenciado problemas de subsidencia en el terreno, son Nueva Orleans, Londres, Bangkok, las cuales se encuentran asentadas sobre arenas aluviales; y Houston – Galveston, Tokio, Shanghái y Venecia, las cuales se encuentran localizadas sobre complejos costeros, cenagosos o deltaicos(Dolany Goodell, 1986).

De acuerdo a lo observado por varios investigadores, el problema de subsidencia en las zonas costeras es el de mayor atención a nivel mundial, puesto que puede ocasionar grandes inundaciones en las áreas urbanas. Uno de estos casos es el de la ciudad de Venecia, donde en épocas de mareas altas del mar Adriáticola ciudad se inunda parcialmente, por tal razón, a medida que aumenta la subsidencia, los sectores bajos son más vulnerables. Esta situación ha obligado a ejecutar algunas obras de protección, tales como la construcción de diques entre las islas que la circundan (Poland, 1972).

Si se realiza un recuento histórico del desarrollo de la subsidencia en esta ciudad, se puede apreciar que a partir del año 1950, ocurrió un incremento significativo de este fenómeno como consecuencia del bombeo de grandes volúmenes de agua para abastecer la demanda industrial, lo cual generó descensos en la presión de los pozos artesianos (Leonardi, 1960; Fontes yBortolami, 1972).Desde 1969 no se han perforado más pozos y al reducirse el consumo de agua subterránea, la subsidencia prácticamente se detuvo(Serandrei Barbero, 1972)e incluso, entre 1969 y 1975 se ha presentado una pequeña elevación del nivel del terreno, del orden de 2 cm, sin embargo, la recuperación es muy baja debido a los colapsos por compactación que sufrieron varios acuíferos (Folloni et al., 1974).

En Japón, se han identificado alrededor de 46 localidades que sufren problemas de subsidencia, entre las que se incluyen algunas de las principales ciudades como Tokio, que está localizada sobre depósitos deltaicos y aluviales, conformados principalmente por arcillas marinas y limos, con espesores entre 30 y 50 m, los cuales contienen estratos delgados de turbas y suelos orgánicos (Poland, 1972).

Estos suelos finos subyacen a un nivel de sedimentos arenosos de unos 10 m de espesor. En la década de 1950 se presentó un considerable incremento en la extracción de agua subterránea debido a la gran expansión industrial y al aumento de la población, esto causó hasta 1961, cuando se iniciaron los controles a la extracción de agua, un descenso de los niveles de agua hasta de 24 m, lo cual produjo una subsidencia cercana a los 4.5 m, a una tasa que en algunos casos alcanzó valores de 1 m al año. Este fenómeno afectó un área de más de 3000 km^2 (Inaba et al, 1969; ishi et al, 1977; Miyabe, 1962).

Finalmente, en los Estados Unidos la mayor subsidencia se presentó en el Valle San Joaquín, en un área de 13500 Km2, donde algunos sitios han presentado subsidencias hasta de 8.5 m en los últimos 50 años, a causa de la extracción de agua subterránea para riego a gran escala (Evans, 1986).

Otro caso importante de subsidencia se presentó en la región de Houston-Galveston, a causa de la extracción de aguas subterráneas para consumo municipal e industrial, la cual se extrae de una secuencia de arenas y arcillas con un espesor de 800 m. Como consecuencia, se produjeron caídas en los niveles piezómetricos de hasta 100 m durante la década de los 70, y en un área cercana a los 12000 Km^2 se generó una subsidencia por lo menos de 15 cm, y en algunos sectores se presentaron valores máximos de 2.7 m de descenso del nivel del terreno (Poland, 1984).

2.3 Problemática actual del fenómeno en la ciudad de Bogotá

La inquietud sobre el estudio del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá surgió desde hace unos 20 años, como una iniciativa para dar explicación a los diferentes interrogantes planteados por técnicos y científicos respecto a la evidencia de deformaciones superficiales en el terreno que han afectado diversos tipos de estructuras.

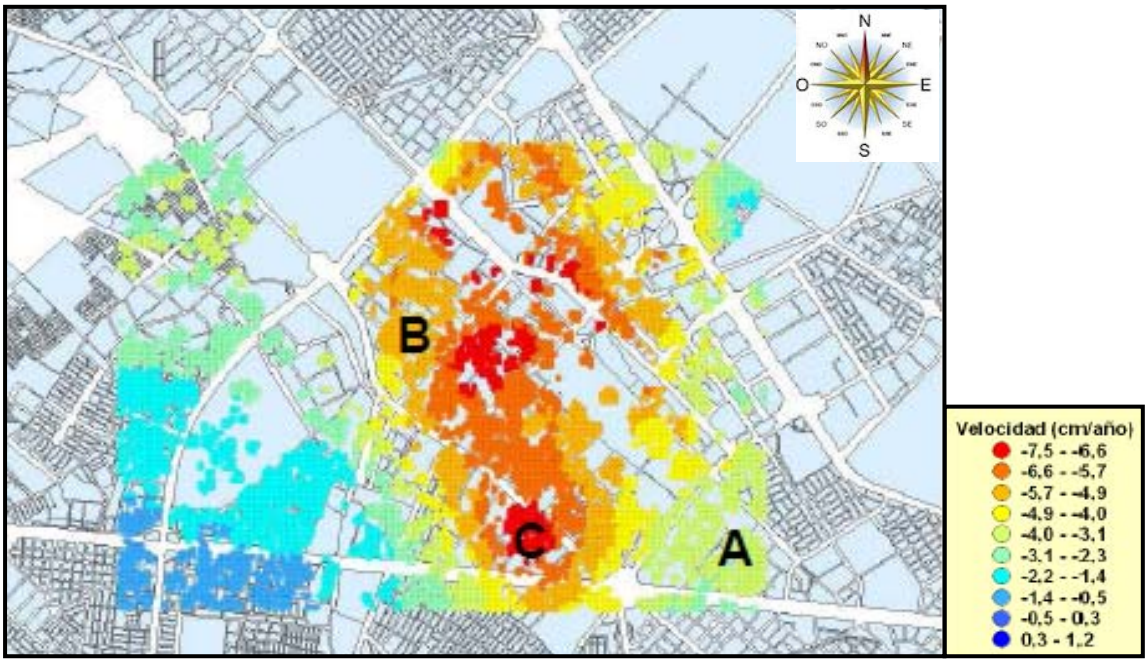
El primer estudio fue realizado por el INGEOMINAS (Ávila, 1998), enfocándose en la evaluación del fenómeno de subsidencia del suelo en la Sabana de Bogotá, el cual contempló varias etapas, entre las que se destacan la búsqueda sistemática de información disponible relacionada con el tema, la elaboración de una base de datos geotécnicos de la sabana, la realización de ensayos de laboratorio (especialmente tendientes a obtener parámetros confiables de compresibilidad y resistencia), la medición de deformaciones del terreno (mediante nivelaciones topográficas y lecturas de extensómetros), y presiones de agua en el subsuelo (monitoreo de piezómetros instalados en diferentes sitios de la ciudad).

Este estudio se adelantó de manera paralela a la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Bogotá (INGEOMINAS y UNIANDES, 1997). De acuerdo con Ávila y Castro (2011), se instaló una red piezométrica cuyos detalles y lecturas iniciales fueron reportados por

Ávila (1998), conformada por piezómetros independientes a diferentes profundidades, y en donde se mostró que entre 50 y 250 m la presión de agua tiende a ser inferior a la correspondiente presión hidrostática deducida a partir de la profundidad del nivel freático, y se observaron descensos de presión hasta de 22 m, los cuales deben ocasionar descensos en los niveles freáticos y por consiguiente consolidación del suelo.

Entre el año 1996 y 2006 no se ha avanzado mucho en el tema (Espinosa, 1997), a excepción de los trabajos que retomó la DPAE (ICC Y FOPAE, 2009), en donde se hicieron mediciones de deformaciones superficiales con métodos satelitales (Interferometría diferencial). Como resultado de estos trabajos, se encontró un foco principal de subsidencia en la zona de Puente Aranda, donde la magnitud del movimiento alcanza los 7.5 cm/año. Del mismo modo, se encontró un gradiente de deformación con centro en dicha zona. Por otra parte, se observa que el comportamiento de las deformaciones es de carácter lineal. La máxima deformación registrada para la zona de Puente Aranda (en el periodo de octubre de 1997 a marzo de 2009) fue de 80 cm, tal como se aprecia en la Figura 2-1

Figura 2-1 Mapa de Tasa Lineal de Deformación para el Área Urbana de Puente Aranda – Período comprendido entre Octubre de 1997 a Marzo de 2009 (ICC y FOPAE, 2009).

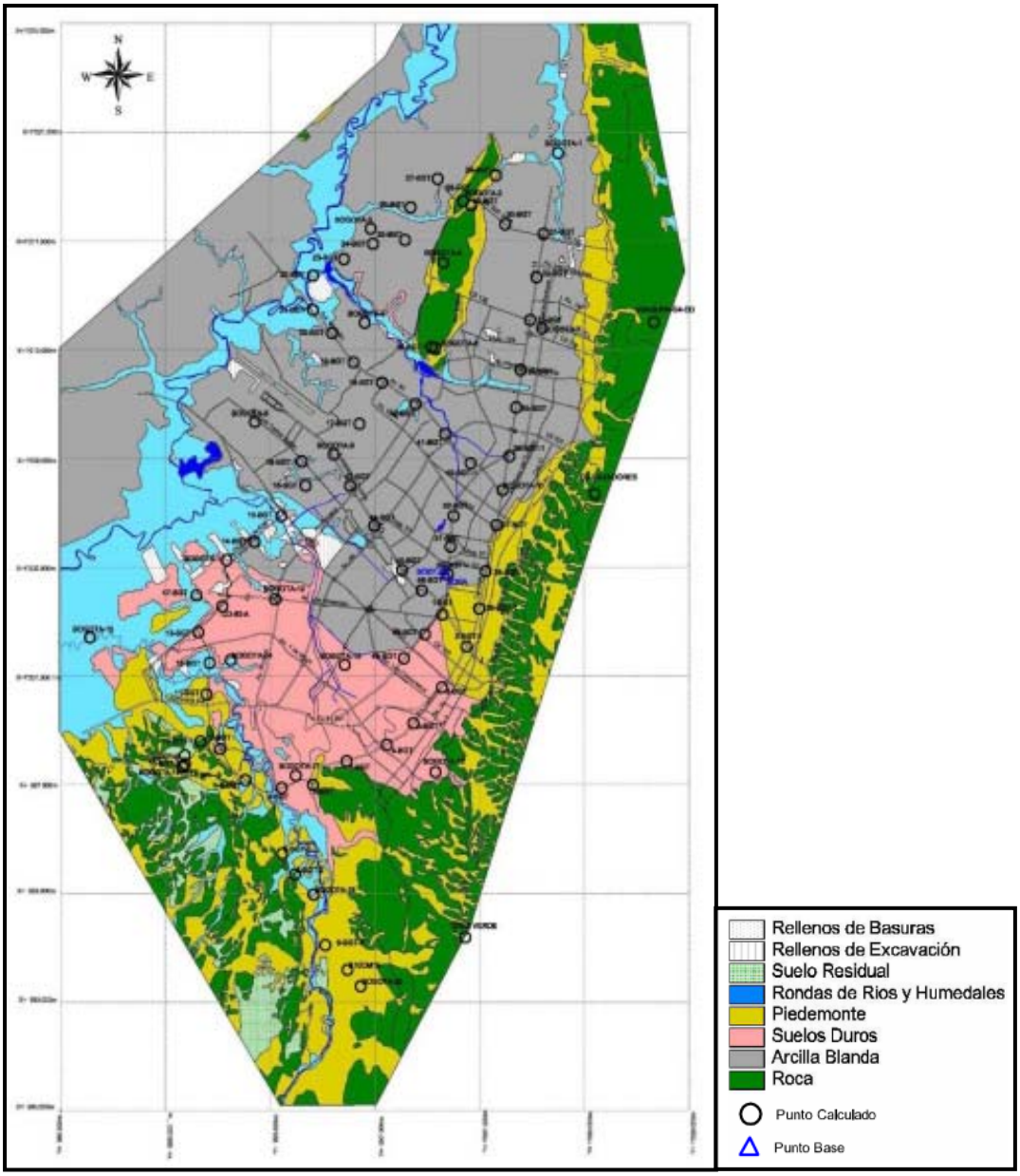


Además, el IGAC realizó algunas mediciones directas de deformación superficial mediante niveles y GPS de precisión (durante los años 2003 y 2007), utilizando la Red Geodésica de Bogotá. Esta red consta de 22 puntos de medición instalados en varias zonas de la ciudad, los cuales están materializados en campo por mojones en concreto y placa de bronce debidamente identificada. En la Tabla 2-1 y la tabla 2-2 se presenta la localización general de las estaciones de medición de la Red Geodésica de Bogotá.

Tabla 2-1Localización General de las estaciones de medición de la Red Geodésica de Bogotá

No.	Referencia Estacion	Coordenadas			Localización general
		Norte	Este	Cota	
1	BOGOTA-01	1020282.68	1004003.06	2575.21	Hacia la Calle 188 con Autopista Norte - Hacia el Este
2	BOGOTA-02	1018501.25	1000382.41	2661.34	Cerro de "La Conejera" - Costado Sur
3	BOGOTA-03	1017498.81	996848.99	2574.55	Lote Calle 145 con Carrera 115 - Sector Suba, hacia el N-W
4	BOGOTA-04	1016233.17	999613.84	2671.35	Parque Mirador de Los Nevados - Hacia Calle 147 con Carrera 90 - Este
5	BOGOTA-05	1014033.88	996620.62	2571.05	Avenida Bolivia (Carrera 110) con Calle 88 - Cerca al río
6	BOGOTA-06	1013096.29	999307.83	2649.77	Hacia Cerros de Niza - Av. Boyaca con Calle 128 - Oeste
7	BOGOTA-07	1013821.17	1003390.64	2578.96	Lote sobre la Avenida 19 con Calle 137
8	BOGOTA-08	1010378.55	992426.86	2571.80	Lote adyacente al Aeropuerto - Calle 24 con Avenida 116
9	BOGOTA-09	1009176.79	995437.94	2577.08	Avenida Ciudad de Cali con Calle 26 - Área de Oreja N-E (Puente)
10	BOGOTA-10	1007864.74	1001882.97	2578.76	Héroes - Autopista Norte entre Calle 79 y 80
11	BOGOTA-11	1005282.58	991347.29	2567.53	Parque Biblioteca El Tintal - Calle 6D con Av. Ciudad de Cali
12	BOGOTA-12	1003840.58	993196.47	2579.56	Avenida Boyaca con Avenida de Las Americas - Área de Oreja N-W (Puente)
13	BOGOTA-13	1001429.51	995858.54	2580.55	Lote en El Jazmín - Hacia la Calle 2 con Carrera 44
14	BOGOTA-14	1001602.11	991501.50	2581.02	Parque Timiza (Kennedy) - Hacia Calle 40 Sur con Avenida Boyaca - N-W
15	BOGOTA-15	1002441.32	986130.20	2569.38	Lote hacia la Carrera 87C con Calle 78Sur - Cerca al río (costado S-E)
16	BOGOTA-16	997481.65	999322.90	2642.71	Parque Distrital del Sur - Hacia Avenida Calle 11Sur con Carrera 2 - Sur
17	BOGOTA-17	997348.55	993991.44	2583.77	Hacia el oeste de la Biblioteca El Tunal - Parque (Cra. 24 con Cll. 51Sur)
18	BOGOTA-18	992966.07	994667.75	2626.02	Cementerio "Serafin" (Norte) - Avenida Boyacá con Calle 71Sur - Oeste
19	BOGOTA-19	997651.33	989672.09	2829.93	I.Educ. Sierra Morena (III Sector) - Transversal 50 con Calle 78Sur - N-W
20	BOGOTA-20	989591.21	996469.31	2792.98	Lote hacia Calle 90Sur con Avenida Boyacá - Comuneros (Gran Yomasa)
21	BOGA	1004697.24	999729.13	2610.23	IGAC - Edificio hacia la Carrera 30 (Calle 47)
22	BOGT	1004851.23	999619.22	2576.61	IGAC - Lote hacia el costado y limite de INGEOMINAS

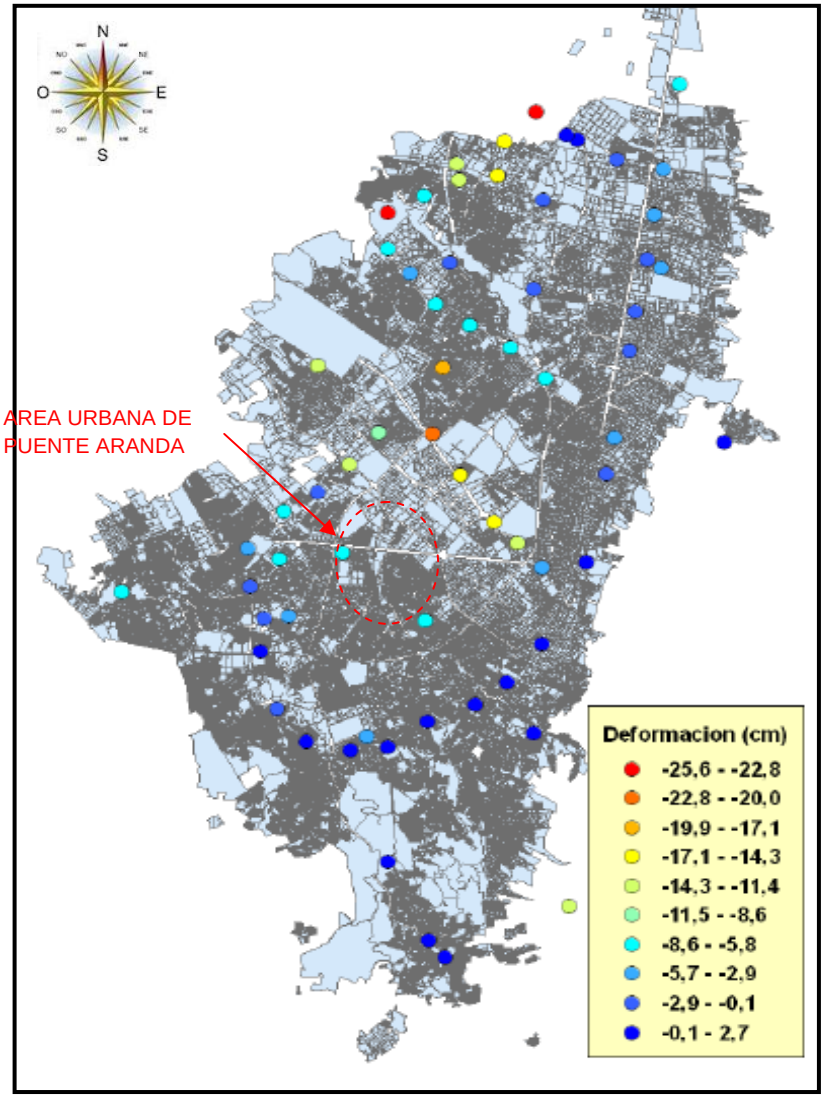
Figura 2-2 Mapa de Localización General de las estaciones de medición de la Red Geodésica de Bogotá (ICC y FOPAE, 2009).



Como resultado de estas mediciones, se encontraron dos focos de deformación superficial por fenómenos de subsidencia, en la parte norte de la ciudad, en donde predominan suelos blandos de composición arcillosa. El rango de deformación registrada para este sector, se encuentra entre 22.8 y 25.6 cm. Los menores valores de

deformación superficial se registraron en la parte oriental y sur de la ciudad, con un rango entre 0 y 6 cm, en donde predominan suelos duros, de piedemonte y niveles rocosos.
No se encuentran estaciones de medición en la zona de Puente Aranda, por lo cual no se puede establecer una comparación con las mediciones realizadas por el método DInSAR, lo cual es una falencia importante de este sistema de medición, ya que no se puede establecer si las deformaciones medidas por Interferometría Diferencial son locales o por efectos regionales, tal como se aprecia en la Figura 2-2 y la Figura 2-3

Figura 2-3 Mapa de Deformación registrada por las estaciones de la Red Geodésica, para el Área Urbana de Bogotá – Campañas realizadas entre los años 2003 y 2007 (ICC y FOPAE, 2009).



Por último, en el año 2011 se realizó un estudio denominado “Estudio de la Modelación Geotécnica de Subsidencia de la ciudad de Bogotá” (UNAL y FOPAE, 2011), en donde se encontró que para la zona de mayor Subsidencia (Área Urbana de Puente Aranda), no hay evidencias significativas de deformaciones superficiales, agrietamientos o deterioros, adicionales a las afectaciones viales en la zona industrial, que pueden atribuirse a las altas cargas de tráfico y posibles deficiencias en las estructuras de pavimento.

De acuerdo con Ávila y Castro (2011), este hecho se atribuye a la magnitud de las deformaciones superficiales presentes en la zona, debido a que se pueden estimar deflexionesde 0.4 m/km, correspondientes a distorsionesangulares de 1/2500, las cuales son admisibles poruna edificación convencional, puesto que losagrietamientos comienzan a aparecer paradistorsiones angulares del orden de 1/250.

Sin embargo, es posible que incremente la magnitud de estas deformaciones y ocasione daños importantes en la infraestructura y las redes de servicios públicos de la zona.Como resultado de los análisis de deformaciones realizados en la zona, a partir de los datos de lecturas piezométricas tomadas en campo, se estableció que esta zona coincide con la de mayores tasas de extracción de agua subterránea y existe una buena correlación entre los descensos de presiónen profundidad y la subsidencia del terreno.

2.4 Deformaciones superficiales en el terreno por cambios de succión y su influencia en los fenómenos de subsidencia

La subsidencia en el terreno se manifiesta de multiples formas, entre las que se encuentran, la reducción de los niveles piezométricos del terreno en profundidad, desecación superficial por cambios de niveles freáticos, efectos de la vegetación, sobrecarga del terreno, descensos de la superficie del terreno por efectos tectónicos, consolidación secundaria de los depósitos de arcilla, obras subterráneas y explotaciones mineras en profundidad.

Como ya se ha mencionado anteriormente, en el presente trabajo de investigación, se pretende abordar la problemática del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá,

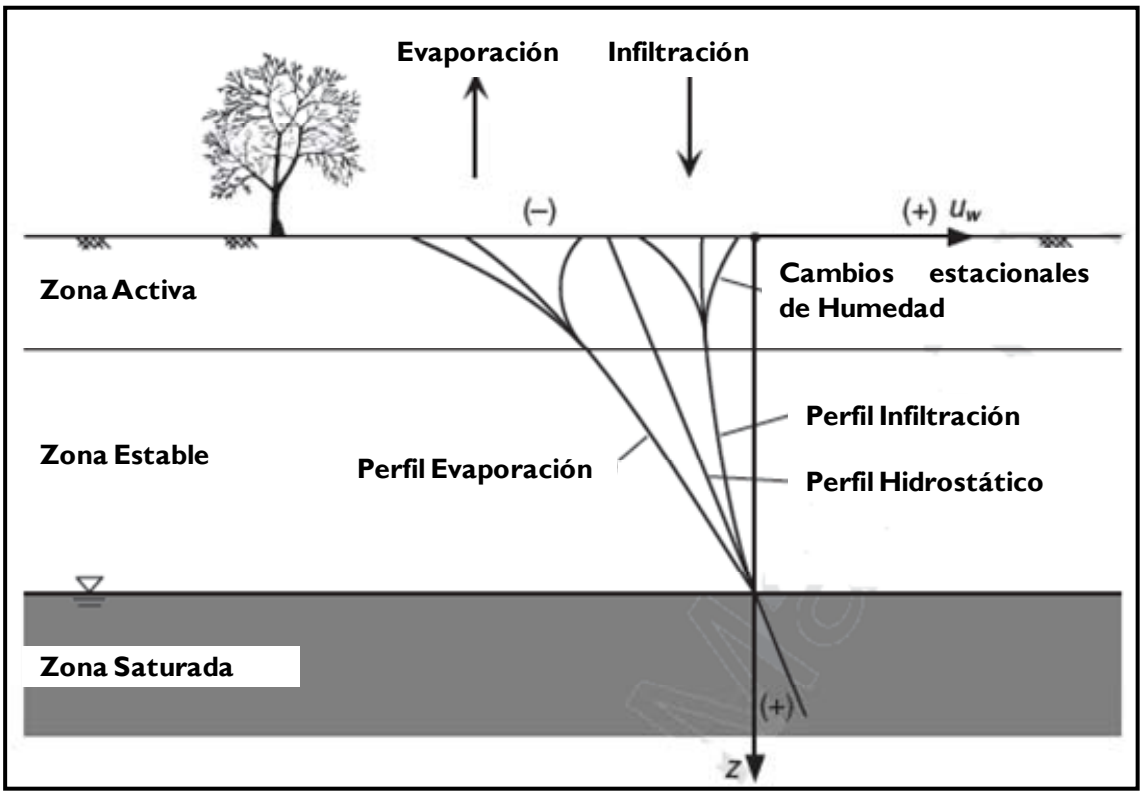
estudiando las deformaciones superficiales debidas a cambios de succión, que corresponden a cambios estacionales en el terreno (a corto plazo) relacionados con los regímenes de lluvia y sequia del área de estudio.

Estos cambios estacionales ocurren en los suelos existentes por encima del nivel freático, en la zona más próxima a la superficie, en donde experimentan procesos de humedecimiento y secado en períodos relativamente cortos, que ocasionan a su vez, variaciones importantes en los valores de humedad natural del suelo. En general, estos suelos se en encuentran en condición parcialmente saturada.

En el perfil de estos suelos se puede identificar dos zonas bien definidas: una zona activa, la cual corresponde a la máxima profundidad en donde se observan fluctuaciones estacionales de humedad (épocas de invierno y verano), que a su vez generan cambios en la succión del suelo; y una zona estable, en donde los cambios de succión son independientes del tiempo y están controlados por factores tales como el tipo de suelo, la velocidad de recarga estacional (flujo hacia abajo causado por el gradiente hidráulico que se presenta por efecto de la reducción de las cargas piezométricas en profundidad cuando se extrae agua del subsuelo), la topografía del terreno, y la localización del nivel freático.

En la Figura 2-4se presenta un modelo conceptual del perfil de variación de la succión con la profundidad, en suelos parcialmente saturados (Lu y Likos, 2004).

Figura 2-1 Modelo conceptual del perfil de variación de la succión con la profundidad, en Suelos Parcialmente Saturados (Lu y Likos, 2004).



Para el estudio de las deformaciones superficiales debidas a cambios de succión, es necesario definir claramente las características del perfil estratigráfico del área de estudio (discretización de los estratos de suelo y variación de la humedad natural en profundidad, con base en campañas de exploración geotécnica), las curvas de retención de humedad (variación de la humedad natural, grado de saturación, y humedad volumétrica con la succión), las curvas de compresibilidad del suelo (variación de la relación de vacíos con la succión y el esfuerzo efectivo vertical), y las bases teóricas del modelo de análisis de deformaciones (en este caso, se utilizará el Modelo Básico de Barcelona BBM para suelos parcialmente saturados, desarrollado por Alonso et al, 1990).

3. Definición del área de estudio

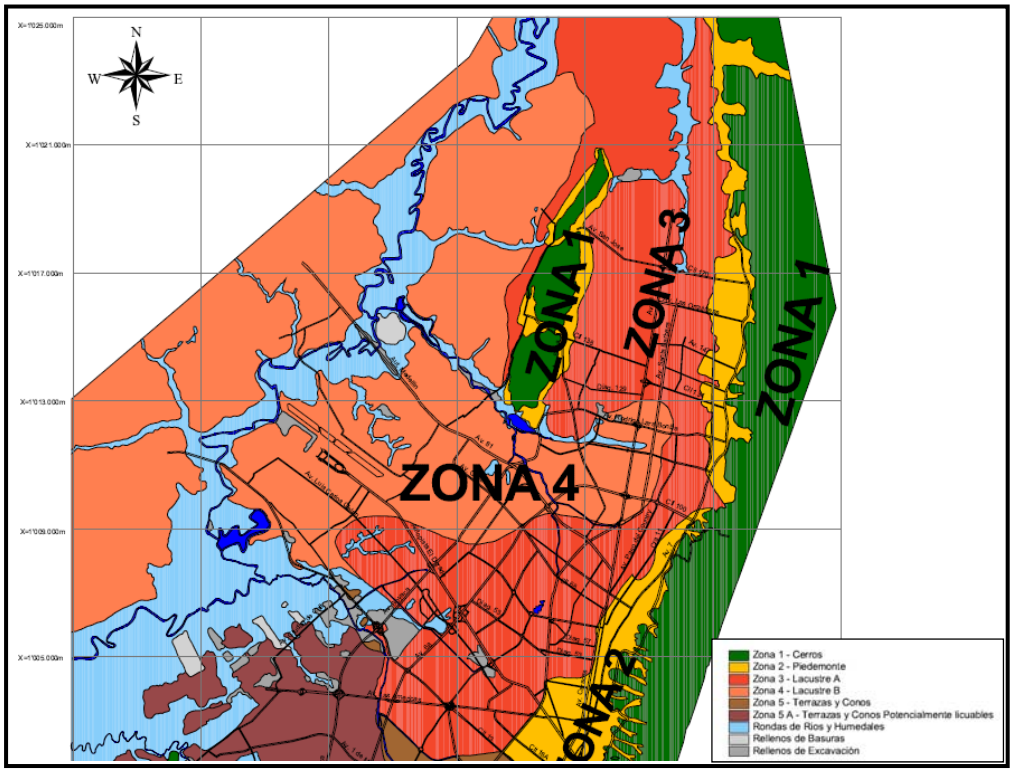
A partir de la información existente en el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá (INGEOMINAS y UNIANDES, 1997) y el estudio de Interferometría Diferencial (ICC y FOPAE, 2009), se definirá el área de influencia directa, de mayor subsidencia y de análisis para el estudio, la cual comprende un sitio considerado como crítico por fenómenos de subsidencia en la ciudad de Bogotá.

3.1 Área de influencia directa

El área de influencia directa de este tema de investigación está constituida por los suelos blandos de la ciudad de Bogotá. De acuerdo con el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá (INGEOMINAS y UNIANDES, 1997), estos suelos corresponden a la Zona 3 Lacustre A, la cual se compone principalmente por depósitos de arcillas blandas con profundidades mayores de cincuenta (50) metros. Pueden aparecer depósitos ocasionales de turbas y/o arenas de espesor intermedio a bajo. Presenta una capa superficial preconsolidada de espesor variable no mayor de diez (10) metros.

En la Figura 3-1se presenta la delimitación del área de influencia directa del estudio, con base en el Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá.

Figura 3-1 Delimitación del área de influencia directa del estudio según el Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá (Ingeominas y Uniandes, 1997).

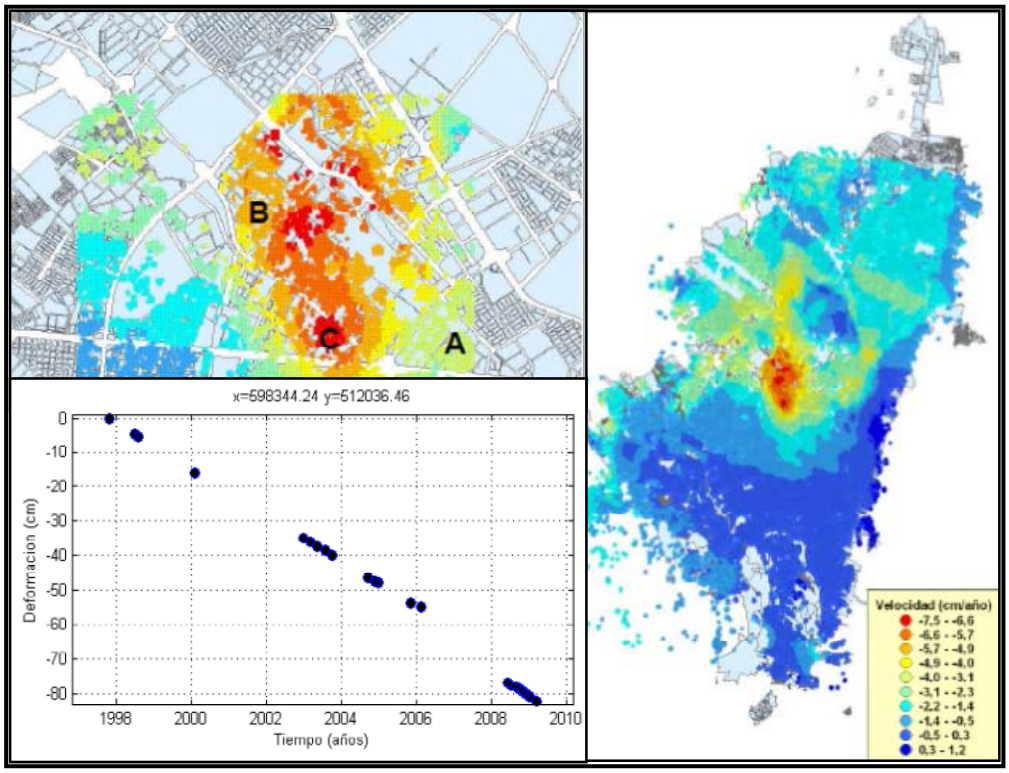


Desde el punto de vista geológico, los suelos blandos de la ciudad de Bogotá pertenecen a la Formación Sabana. Presenta una topografía relativamente plana, y está conformada principalmente por arcillas, limos, lentes de arena y gravas, y localmente por cenizas volcánicas y turbas, las cuales se depositaron (en ambiente fluvio lacustre) sobre un basamento rocoso constituido por arcillolitas y areniscas (cretácicas y terciarias).

3.2 Área de mayor subsidencia

El área de mayor subsidencia en la ciudad de Bogotá se definió con base en el Estudio de Interferometría Diferencial(ICC y FOPAE, 2009). De acuerdo con este estudio, se encontró un foco principal de subsidencia en la zona de Puente Aranda, donde la magnitud del movimiento alcanza los 7.5 cm/año. El comportamiento de las deformaciones es de carácter lineal, y el máximo valor registrado fue de 80 cm (en el periodo de Octubre de 1997 a Marzo de 2009), tal como se aprecia en la Figura 3-2.

Figura 3-1 Delimitación del área de mayor subsidencia según el Estudio de Interferometría Diferencial (ICC y FOPAE, 2009).



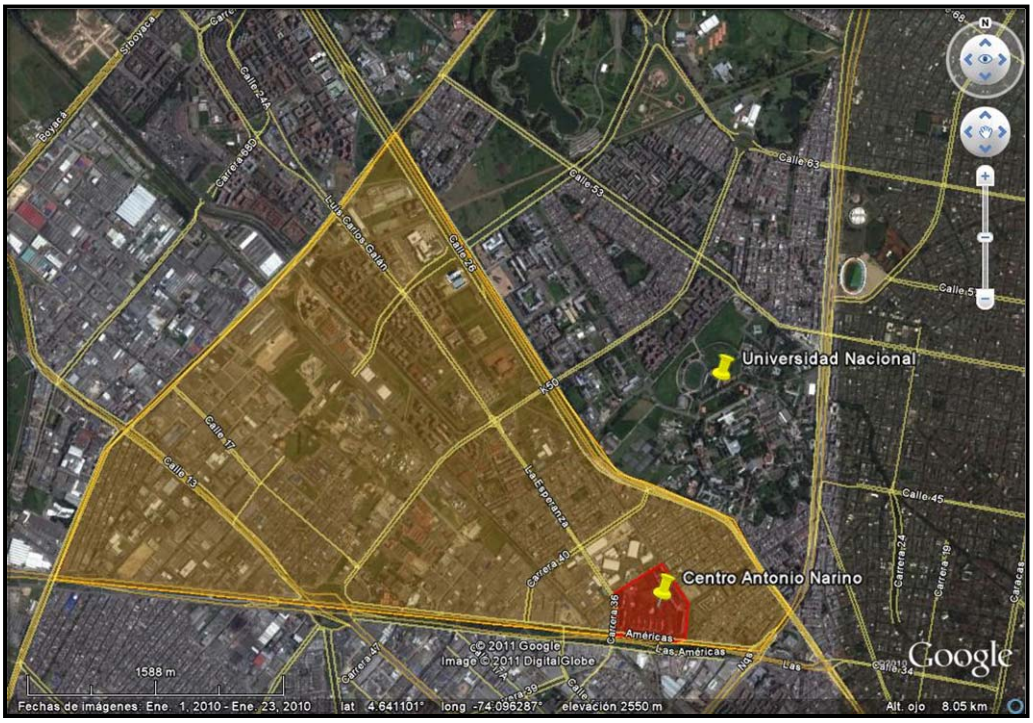
Por otra parte, el día 18 de Abril de 2010 se realizó una visita de inspección a la zona de Puente Aranda, con el fin de verificar en campo los resultados obtenidos en el estudio.
En el Anexo A **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**se presenta el informe técnico de la visita de inspección de campo realizada a esta zona.

Durante la visita de inspección se realizó la caracterización de la zona, en cuanto al tipo de construcción, presencia de árboles, evidencia de asentamientos y afectación en la infraestructura vial o en las construcciones vecinas, cuyo recorrido fue el siguiente:

“Se realizó un recorrido perimetral, iniciando en la Calle 26 con Carrera 30 en sentido norte-sur, se continuó desde la carrera 30 por la Avenida de las Américas hasta la Avenida Carrera 68 en sentido oriente-occidente, posteriormente por la Avenida Carrera 68 hasta la Calle 26 en sentido sur-norte y finalmente, en sentido occidente-oriente por la Calle 26 hasta la Carrera 30.El recorrido finalizó por algunas de las vías principales de la localidad de Puente Aranda, donde se podían presentar algunas evidencias del fenómeno de subsidencia”.

Como resultado de esta visita de inspección, se encontró que la zona que presenta evidencias de hundimientos del terreno, corresponde al Centro Urbano Antonio Nariño ubicado entre la Avenida La Esperanza y la Avenida de Las Américas, entre Carreras 30 y 36, donde se pueden observar asentamientos diferenciales de las edificaciones y agrietamientos en los muros de fachada. La localización general de esta zona se presenta en la Figura 3-3.

Figura 3-3 Localización general de la zona de Puente Aranda con evidencia de hundimiento del terreno, como resultado de la visita de inspección de campo realizada (Tomada de Google Earth).



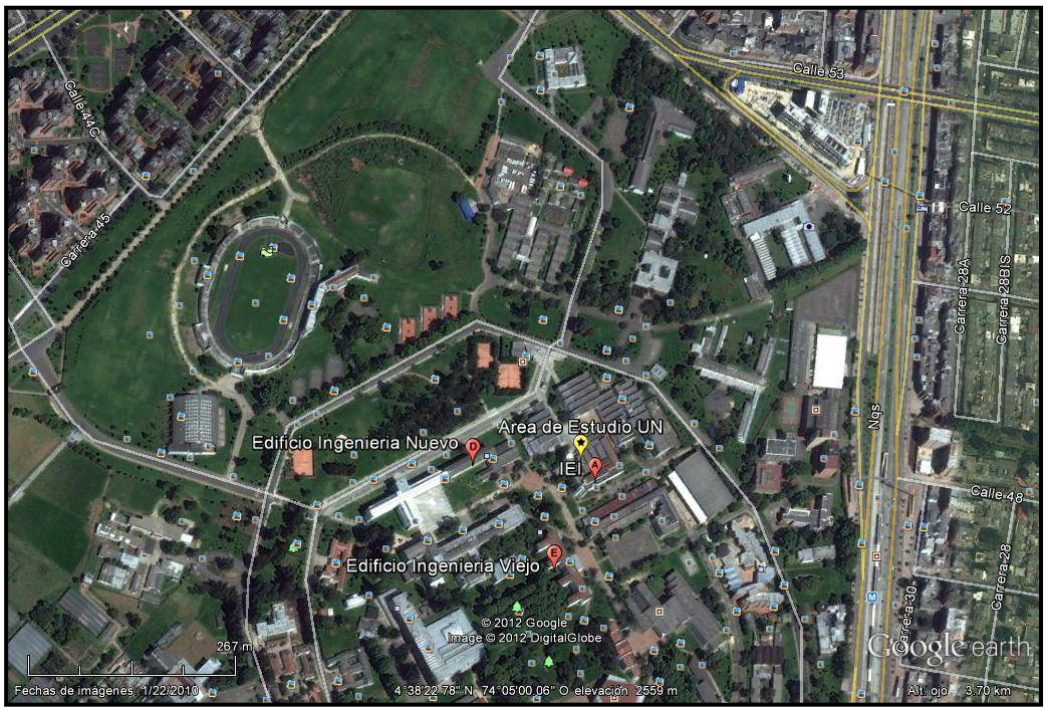
Al comparar el área de mayor subsidencia en la Ciudad de Bogotá según el estudio de la DPAE, se puede concluir que solamente se presentan hundimientos en el Centro Urbano Antonio Nariño, ya que en el resto de las zonas inspeccionadas, no se evidencian daños en vías, asentamientos marcados en edificaciones, ni agrietamientos en el terreno.

En sector del Barrio Salitre se evidenciaron agrietamientos y hundimientos en la estructura del pavimento, producto de la presencia de árboles en vías y se descarta que estos daños puedan ser generados por extracción de agua subterránea o compresibilidad del suelo.

3.3 Área de estudio para análisis

Al revisar la información geotécnica existente del área de mayor subsidencia, no se dispone de una base de datos completa y confiable de variación de humedad con la profundidad ni de curvas de retención de humedad, para los materiales presentes superficialmente. Por lo tanto, se decidió tomar como área de estudio para los análisis de succión, la zona aledaña al Edificio 406 (IEI) de la Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá), ya que se dispone de información de curvas de retención de humedad para los diferentes materiales existentes superficialmente, y se encuentra próxima al área de influencia directa de la zona de mayor subsidencia. En la Figura 3-4 se presenta la localización del área de estudio en el campus de la UN.

Figura 3-4. Planta general de localización del área de estudio en el campus de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá (Tomada de Google Earth).



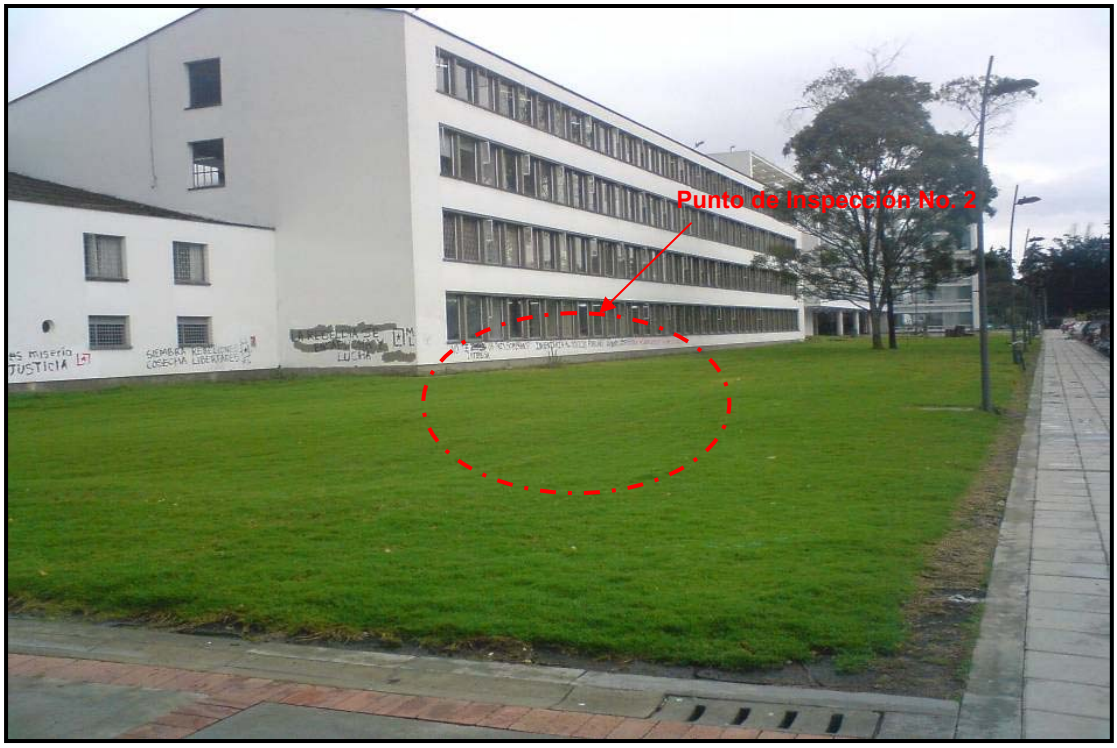
Dentro del área de estudio se tomaron dos puntos de inspección para evaluación de cambios de humedad: el primero se localiza en el área externa al Edificio de Ensayos e Investigaciones I.E.I (Edificio 406), y el segundo en la zona verde localizada al respaldo del Edificio de Ingeniería Nuevo (Edificio 453) del Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Estos puntos se localizan en un área con topografía

relativamente plana y sin presencia de vegetación, que pueda influir en el régimen normal de humedad natural y succión del suelo.

En la Fotografía 3-1 y Fotografía 3-2 se aprecian algunos aspectos generales de los puntos de inspección localizados en el área de estudio.

Fotografía 3-1. Vista general del Punto de Inspección No. 1 localizado en el área externa al Instituto de Ensayos e Investigaciones I.E.I – Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Fotografía 3-2. Vista general del Punto de Inspección No. 2 localizado en el área externa al Edificio de Ingeniería Nuevo – Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.



En el Punto de Inspección No. 1 se generaron curvas de retención de humedad de los materiales presentes en los primeros 5.5 m, como parte del trabajo de Tesis de Maestría realizado por Pineda (2003), las cuales serán la base para el análisis de deformaciones superficiales por cambios de succión del presente trabajo de investigación.

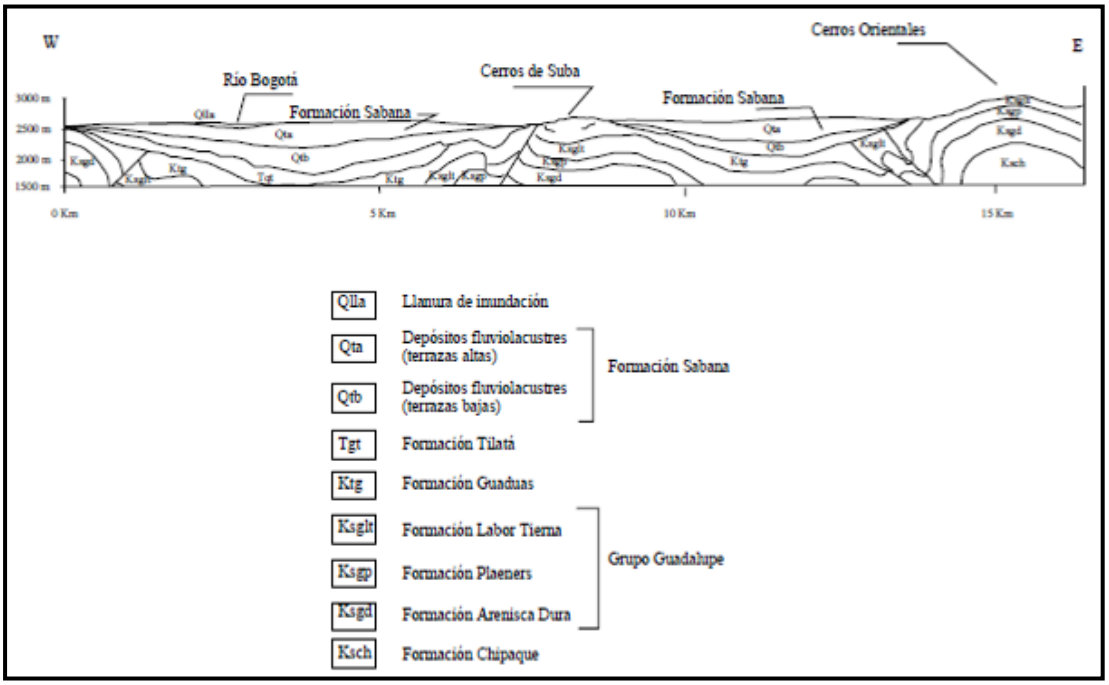
4. Características geotécnicas del área de estudio

A continuación se presentan las características geotécnicas del área de estudio, relacionadas principalmente con la condición geológica, caracterización geotécnica, mineralogía, microestructura, curvas de retención y de compresibilidad, de los materiales presentes a nivel superficial.

4.1 Contexto geológico

La ciudad de Bogotá está ubicada en la parte central de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos, a una altura de 2640 m sobre el nivel del mar. En ella se distinguen dos zonas geomorfológicas principales: la primera corresponde a la zona plana, donde se asienta la mayor parte de la población y el urbanismo, conformada por depósitos poco consolidados y la segunda corresponde a la zona montañosa conformada por rocas sedimentarias de origen marino y continental, con edades entre el Cretáceo y el Terciario (Tomado de Ávila, 2004). En la Figura 4-1 se presenta un corte geológico generalizado de la Sabana de Bogotá, en Sentido E-W.

Figura 4-1. Corte Geológico Generalizado de la Sabana de Bogotá, en sentido E-W (Adaptado de Ingeominas y Universidad de los Andes (1997) en: Ávila, 2004).



De acuerdo con diferentes estudios realizados sobre la estratigrafía de la Sabana de Bogotá (entre los que se destacan Van der Hammen et al, 1973, Helmens, 1990, Van der Hammen y Hooghiemstra, 1995, Caro et al, 1996), la zona plana se ha formado por procesos de sedimentación de un antiguo lago de origen tecto-sedimentario que recibió materiales en condiciones lacustres, fluviales o fluvioglaciares, desde finales del Plioceno hasta su desecación hace 30000 años.

Estos depósitos están compuestos por arcillas plásticas de color gris oscuro, en estratos de 0.4 a 1.0 m de espesor, con interestratificaciones de lentes de arena y grava e intercalaciones de ceniza volcánica de color gris blancuzco. Su espesor máximo hasta el nivel de roca, alcanza en la parte occidental del depósito, valores de 780 m y se va reduciendo al acercarse a la zona montañosa. En el área de estudio, el espesor del depósito es de 180 m, y está ubicado a unos 3 km del piedemonte de los Cerros Orientales que limitan la ciudad de Bogotá.

4.2 Campañas de exploración geotécnica

Para determinar las características y propiedades mecánicas del suelo en el área del estudio, se realizaron actividades de exploración del subsuelo que consistieron principalmente en la ejecución de sondeos con equipo manual y recuperación de muestras inalteradas con tubo Shelby, así como ensayos de laboratorio.

4.2.1 Exploración del Subsuelo

Se realizó un programa de exploración geotécnica en el área de estudio, el cual consistió en la ejecución de cuatro campañas de dos sondeos manuales de 6 m de profundidad cada una (para diferentes épocas del año), en el área externa del I.E.I y del edificio de Ingeniería Nuevo de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Además, se tomó como referencia, la información existente en la tesis de grado de Coronado (1987) en el edificio de la facultad de Biología, aledaño al edificio del IEI.

En cada sondeo se recuperaron muestras inalteradas en tubos de pared delgada, las cuales fueron utilizadas para hacer descripción visual y algunos ensayos de laboratorio, encaminados principalmente a la clasificación geotécnica del suelo y generación de perfiles de variación de la humedad natural y la succión con la profundidad, en los materiales existentes superficialmente.

En el Anexo B se presenta un resumen de las propiedades geotécnicas encontradas en cada campaña. La localización general de los sondeos realizados en el área de estudio se presenta en la Figura 4-2.

.

4.2.2 Ensayos de Laboratorio

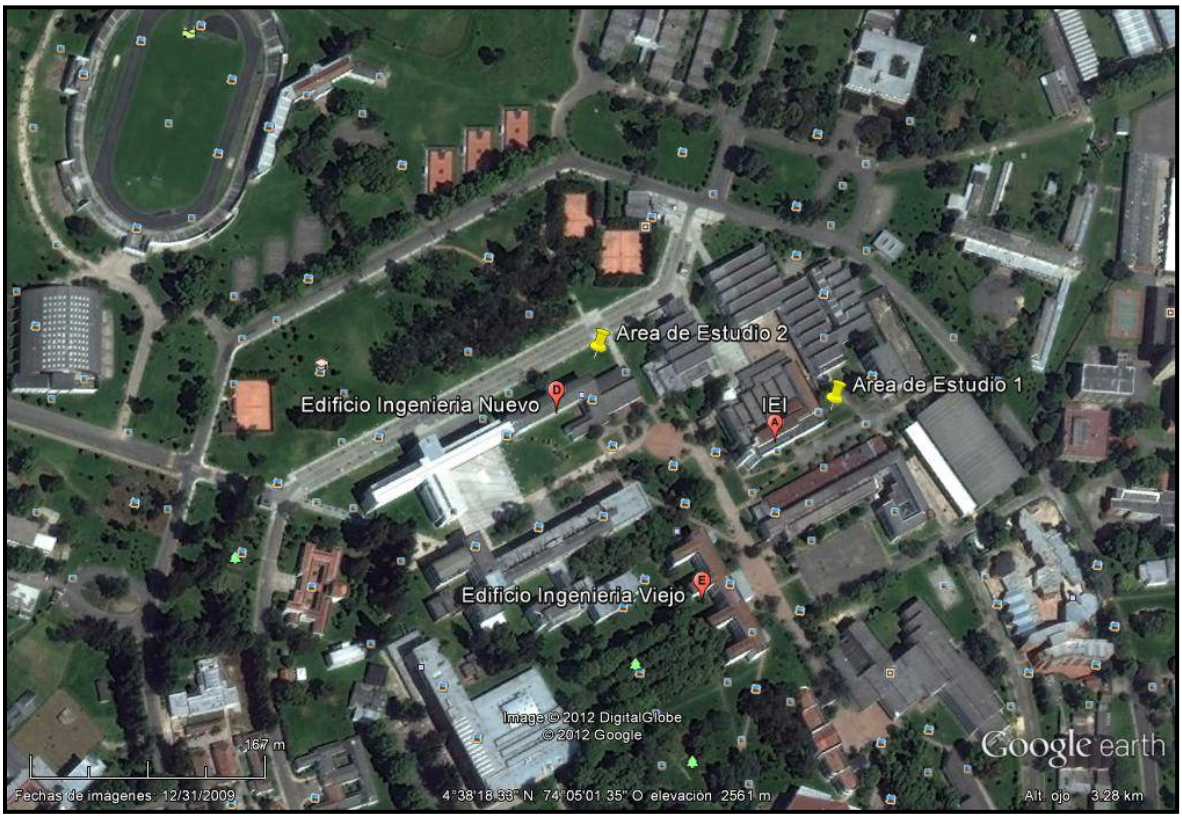
Para determinar las propiedades de los materiales encontrados, se realizaron ensayos de caracterización física como humedad natural, límites de Atterberg, lavado sobre tamiz No 200 y peso unitario. En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta una tabla resumen de los ensayos de laboratorio ejecutados para el sitio de estudio.

4.2.3 Pruebas de Campo

Durante la ejecución de los sondeos se realizaron ensayos in situ de veleta de campo (VST) y penetrómetro de bolsillo, con el fin de establecer de forma aproximada la variación de resistencia al corte no drenada del suelo y definir cambios lito-estratigráficos.

De la Fotografía 4-1 a la Fotografía 4-3 se presentan algunos aspectos generales de las campañas de exploración geotécnica realizadas en el área de estudio.

Figura 4-2. Planta general de localización de las diferentes campañas de exploración geotécnica en el Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá (Tomada de Google Earth).



Fotografía 4-1 Vista general de las campañas de exploración geotécnica realizada en el área externa del I.E.I – Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Fotografía 4-2 Vista general de las campañas de exploración geotécnica realizada en el Edificio de Ingeniería Nuevo – Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Fotografía 4-3. Tipo de muestras recuperadas durante la ejecución de las campañas de exploración geotécnica en el Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

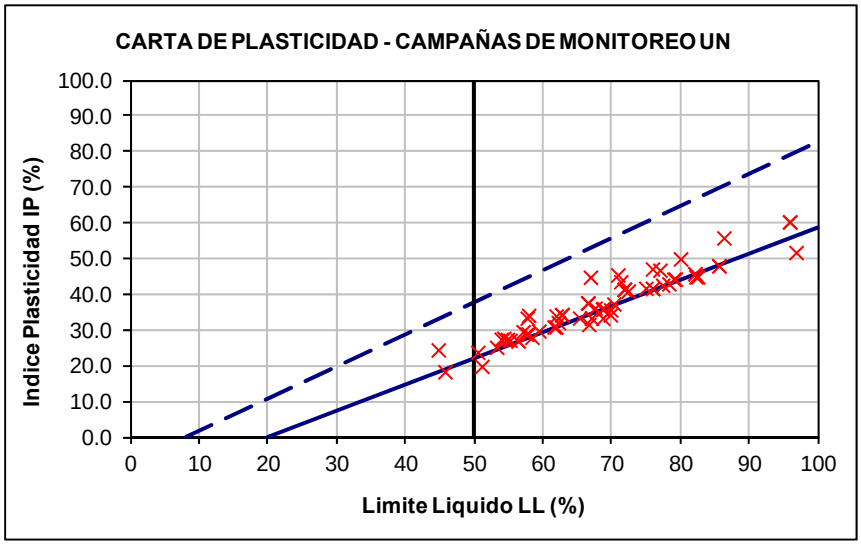
4.3 Caracterización geotécnica

A continuación se presenta una descripción detallada de las propiedades geotécnicas encontradas en las campañas de exploración geotécnica, para los materiales presentes en el área de estudio. En forma general, a nivel superficial se encuentra una capa de arcilla sobreconsolidada de color café y gris de consistencia firme y plasticidad alta, cuyo espesor promedio es de 4.5 m. Bajo este nivel se encuentra una serie de estratos de arcilla de color gris verdoso y café de consistencia blanda a media y plasticidad alta, intercalados con capas de arena, arcilla turbosa y turbas.

Humedad Natural y Límites de Consistencia: En el área de estudio predominan materiales finos de composición arcillosa. Para estos materiales, el contenido de humedad se encuentra entre el 23.7% y el 74.4% con un promedio de 41.0%. El límitelíquido varía entre el 44.8% y el 96.8% con un promedio de 68.4%, y el límite plástico varía entre el 20.3% y el 45.0% con un promedio de 31.1%. De acuerdo con la Carta de Plasticidad de Casagrande, estos materiales se clasifican como arcillas de alta plasticidad (CH).

En la Figura se aprecia la Carta de Plasticidad de Casagrande con los resultados de los ensayos de límites de consistencia. En la Figura 4-4 y la Figura 4-5 se muestran gráficas de variación de humedad natural, límite líquido y límite plástico en función de la profundidad, para las cuatro (4) campañas de exploración geotécnica realizadas.

Figura 4-3 Carta de Plasticidad de Casagrande para los materiales encontrados en el área de estudio - Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.



Peso Unitario: Para los materiales finos, el peso unitario total se encuentra entre 1.50 y 2.01 T/m^3 con un promedio de 1.77 T/m^3, y el peso unitario seco se encuentra entre 0.87 y 1.60 T/m^3, con un promedio de 1.27 T/m^3. La gravedad específica se encuentra entre 2.5 y 2.9 con un promedio de 2.77. En la Figura y Figura se muestran gráficas de variación del peso unitario total y seco en función de la profundidad, para las cuatro (4) campañas de exploración geotécnica realizadas.

Figura 4-4 Variación de la humedad natural y los límites de consistencia con la profundidad en el área de estudio – Sondeo 1.

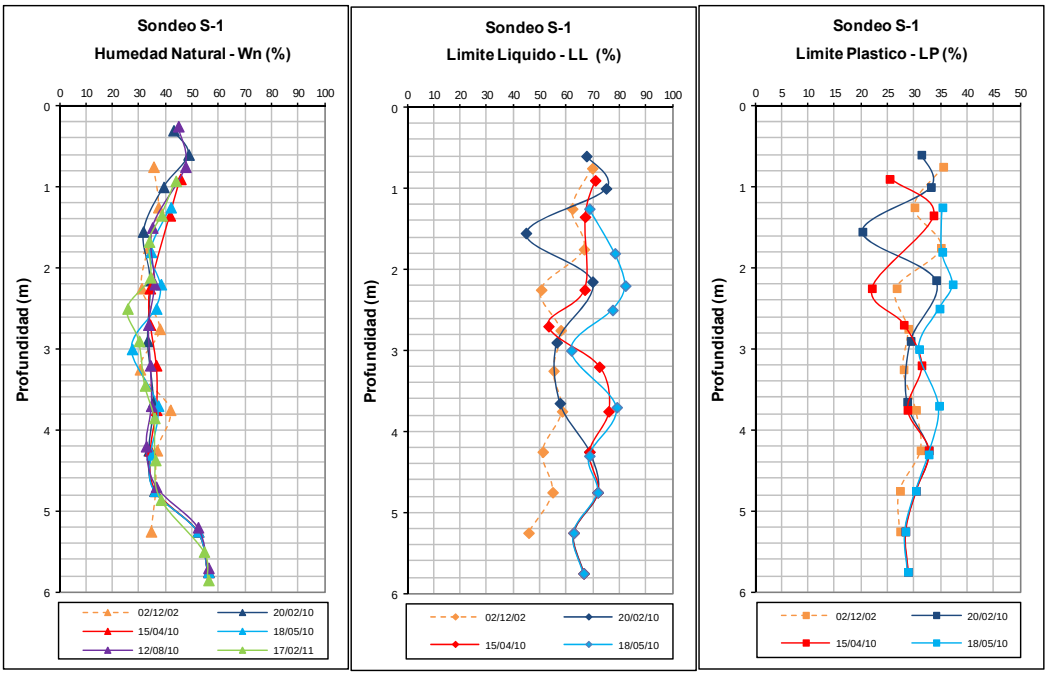


Figura 4-5 Variación de la humedad natural y los límites de consistencia con la profundidad en el área de estudio – Sondeo 2.

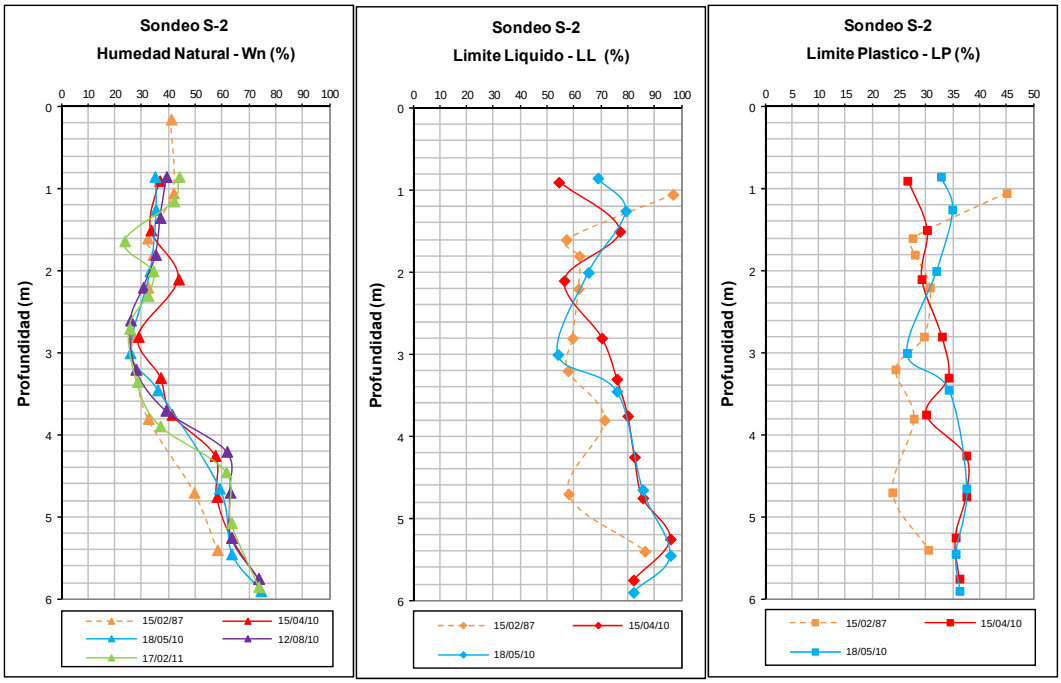


Figura 4-6 Variación del peso unitario total y seco con la profundidad en el área de estudio – Sondeo 1.

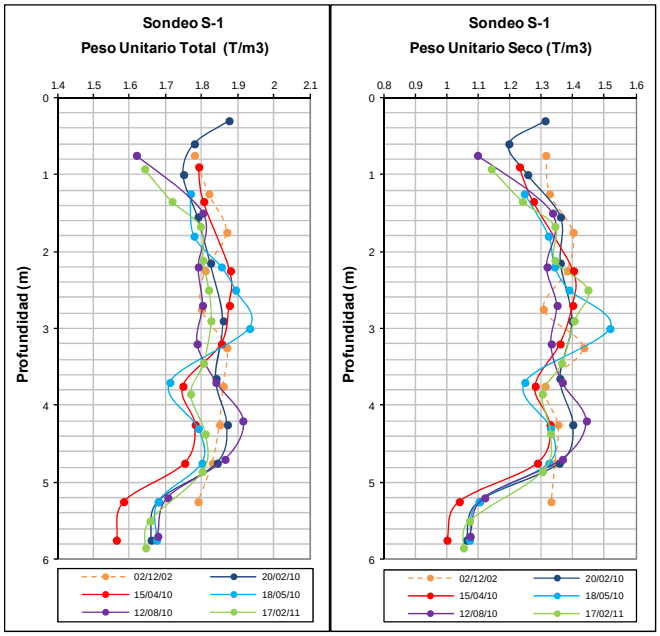
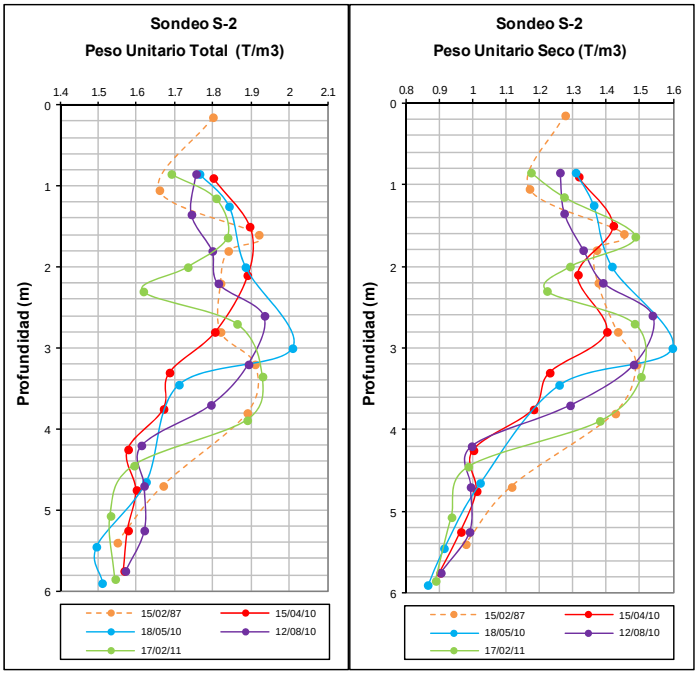


Figura 4-7 Variación del peso unitario total y seco con la profundidad en el área de estudio – Sondeo 2.



4.4 Perfil geotécnico promedio

De acuerdo a los resultados obtenidos en las diferentes campañas de exploración geotécnica, los ensayos de laboratorio y las observaciones de campo, se identifican cinco (5) materiales en el área de estudio, tal como se muestra en la Tabla 4-1

Tabla 4-1 Perfil Geotécnico Promedio del Área de Estudio (Tomado de Pineda, 2003).

Profundidad [m]		DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL
De	A	
0.00	0.50	Limo arcilloso orgánico negro, abundante presencia de raíces; humedad baja
0.50	2.00	Arcilla gris habana, ligeramente fisurada; presencia ocasional de raíces, plasticidad alta, humedad baja y consistencia firme (CH)
2.00	3.50	Arcilla gris clara con tonos habanos, oxidada, ligeramente fisurada; plasticidad alta, humedad moderada y consistencia media (CH)
3.50	4.40	Arcilla limosa gris oscura, nódulos de óxido ocasionales, plasticidad alta, humedad moderada y consistencia media (CH)
4.40	6.00	Arcilla limosa gris verdosa, plasticidad alta, abundante oxidación en planos de fisura, humedad alta y consistencia media a blanda (CH)

4.5 Mineralogía

Según Ávila (2004), los materiales presentes a nivel superficial en el sitio de estudio (en los primeros 6 m de profundidad), son de composición arcillosa y presentan minerales de Caolinita en mayor proporción (55%), los cuales son de baja actividad, y una proporción relativamente baja de Esmectita (17%), que es de alta actividad. En la Tabla 4-2 se muestra la composición mineralógica de los materiales presentes en el sitio de estudio.

Tabla 4-2 Composición Mineralógica de los materiales presentes en el sitio de estudio (Ávila, 2004)

Minerales	Porcentaje
Caolinita	55%
Esmectita	17%
Ilita	15%
Clorita	13%

4.6 Microestructura

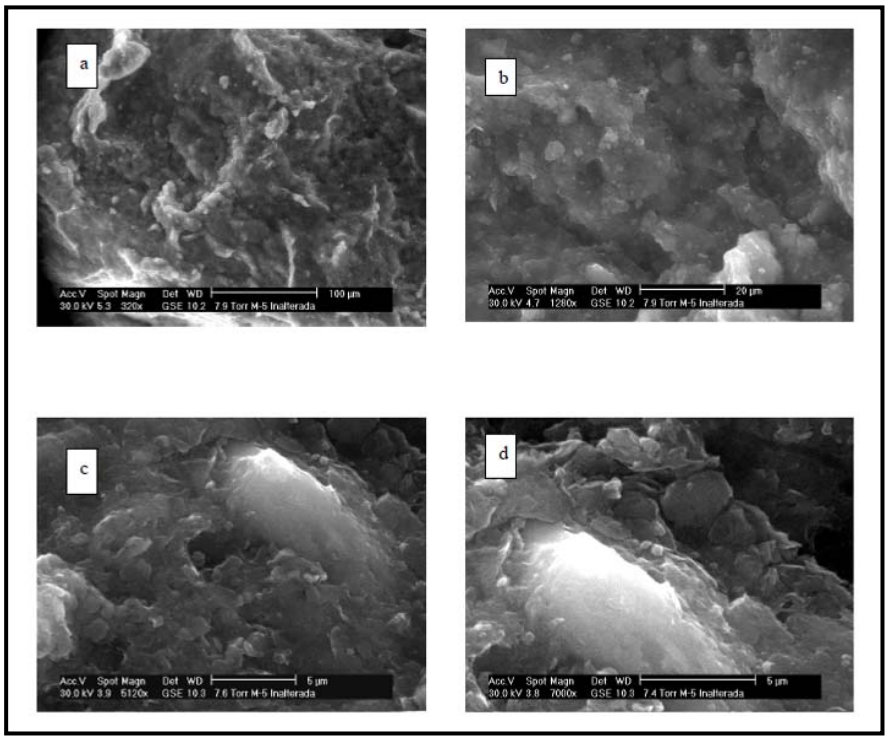
Según Ávila (2004), la microestructura o fábrica de los materiales arcillosos presentes a nivel superficial en el sitio de estudio, corresponde fundamentalmente a arreglos de varios grupos de partículas que conforman unidades redondeadas, las cuales a su vez se agrupan en formas de cadenas y montículos mayores, dispuestos de forma irregular, dejando algunos vacíos pequeños y discontinuos entre los diferentes grupos.

A un nivel mayor de detalle, se observan los grumos de arcilla y los vacíos o poros interagregados, y se alcanzan a distinguir las formas laminares de algunas partículas de arcilla y la manera como se superponen paralelamente unas partículas a las otras, recubriendo todas ellas a otra partícula de mayor tamaño. Además, se puede observar el contacto borde-borde entre algunas partículas individuales de arcilla y algunos poros interagregados.

De acuerdo con lo anterior, se puede decir que las deformaciones presentes a nivel superficial en el suelo por cambios de humedad, se deben principalmente a variaciones volumétricas de los vacíos intraparticulares. Adicionalmente, teniendo en cuenta que tales poros son relativamente pequeños y discontinuos, la arcilla es poco permeable pero a su vez es poco susceptible a fenómenos de colapso.

En la Figura 4-8 se presentan imágenes a diferentes niveles de amplificación, de una muestra tomada en el área de estudio, a una profundidad promedio de 2.5 m, las cuales fueron obtenidas en un microscopio electrónico de barrido en modo ambiental (ESEM).

Figura 4-8 Fotografía de la microfábrica de una muestra de arcilla tomada en el área de estudio, a una profundidad promedio de 2.5 m (Ávila, 2004).



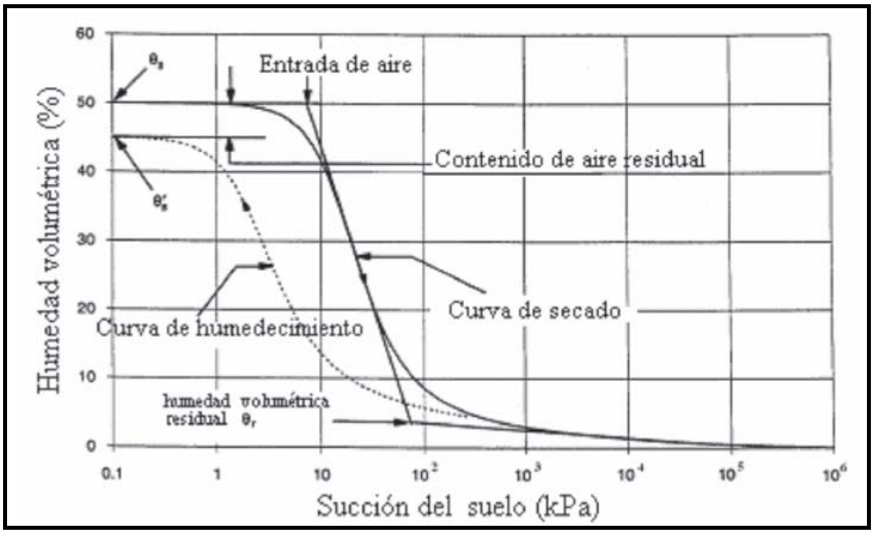
4.7 Curvas de retención de humedad del suelo

Una curva de retención de humedad en el suelo define la relación entre la succión y la cantidad de agua en los poros del suelo. Esta relación es no lineal y no es única para un suelo. Se ha observado que en el proceso de humedecimiento y secado, la curva sigue trayectorias diferentes (histéresis). La cantidad de agua en los poros del suelo puede expresarse en términos de la humedad gravimétrica (w), humedad volumétrica (θ), grado de saturación (S), y la succión puede ser matricial o total.

Según Meza (2005), la forma de esta curva depende del tamaño y forma de las partículas, tamaño y forma de los poros del suelo, fábrica del suelo y de la historia de esfuerzos.

En la Figura se presentan las características de una curva de retención de humedad, obtenida por procesos de secado y humedecimiento. En una curva de retención de humedad, la presión de entrada de aire en el proceso de secado (AEV), representa la succión requerida para que el aire entre en los poros de mayor tamaño y empiece la desaturación del suelo. La humedad residual es la humedad en la cual, el agua en los poros empieza a ser discontinua y estos son llenos principalmente de aire, observándose una disminución en la razón de cambio de la humedad con la succión.

Figura 4-9 Características de una curva de retención de humedad obtenida por procesos de secado y humedecimiento (Fredlund y Xing, 1994).



Para el presente trabajo de investigación, se utilizaron las curvas de retención generadas en la Tesis de Grado de Pineda (2003) para los suelos presentes en el área del I.E.I de la Universidad Nacional de Colombia (Humedad Natural – Succión, Grado de Saturación – Succión y Humedad Volumétrica – Succión), por lo cual no fue necesario generar nuevas curvas de retención de humedad.

El procedimiento a seguir para la generación de estas curvas, fue el siguiente: primero, se tomaron muestras inalteradas separadas cada metro, utilizando tubos de pared delgada (Tubo Shelby), a partir de la ejecución de un sondeo manual de 5.5 m de profundidad.

Después, se prepararon estas muestras en el laboratorio, con el fin de medir su succión matricial para diferentes condiciones de humedad (procesos de humedecimiento y secado), y generar las respectivas curvas de retención. El método empleado para su medición fue el de papel filtro, debido a su simplicidad, bajo costo, amplio rango de medición (entre 30 y 28000 kPa) y por ser la única metodología existente en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Estas mediciones fueron realizadas de acuerdo con la metodología del Imperial College of Science, Technology and Medicine de la Universidad de Londres. En este caso, se utilizó el papel filtro Wathman No. 42, cuyas expresiones de calibración, se presentan en la Tabla .

Tabla 4-3 Ecuaciones de calibración del papel filtro utilizadas en la medición de la succión matricial, para procesos de humedecimiento y secado (Tomado de Pineda, 2003).

Secado o Humedecimiento	Rango de Variación del contenido de humedad W_{pf} [%] del papel filtro	Log_{10} – Succión Matricial [kPa]	Referencia
Secado	≤ 47 >47	$4.84 - 0.0622\ (W_{pf})$ $6.05 - 2.48\ Log_{10}\ (W_{pf})$	Chandler et al (1991)
Humedecimiento	$>15.47 \leq 57.2$ > 57.2	$4.573 - 0.0449\ (W_{pf})$ $2.904 - 0.0158\ (W_{pf})$	Ridley (1995)

Para efectos de análisis, se ajustaron dichas curvas de retención al modelo teórico de Van Genuthen (1980), el cual es uno de los más utilizados en el estudio de Suelos Parcialmente Saturados, e incluye parámetros empíricos de ajuste relacionados con la presión de entrada de aire del suelo y el contenido de agua residual. En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la formulación del modelo de ajuste y los resultados obtenidos para cada una de las curvas de retención de humedad descritas anteriormente.

4.7.1 Curva de Retención Humedad Natural – Succión

La curva de retención Humedad Natural – Succión, se puede ajustar al modelo teórico de Van Genuthen (1980), por medio de la siguiente expresión:

$$\frac{w_n - w_{nr}}{w_{ns} - w_{nr}} = \left[\frac{1}{1+(\alpha.u_s)^n}\right]^m \quad \textbf{(4.1)}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad \textbf{(4.2)}$$

Donde:

- w_n : Humedad natural del suelo
- w_{ns} : Humedad natural de saturación del suelo
- w_{nr} : Humedad natural residual del suelo
- α : Parámetro que representa el inverso de la presión de entrada de aire del suelo (AEV)
- u_s : Succión matricial del suelo
- n : Parámetro que representa la distribución del tamaño de poros en el suelo.

En la Tabla aTabla y en la

Figura a Figura , se presentan los parámetros básicos del modelo de Van Genuthen y las curvas de variación de la humedad natural (Wn) con la succión (Us), para los procesos de secado y humedecimiento.

Tabla 4-4 Parámetros básicos del modelo de VanGenuthen (1980) para la curva Humedad Natural – Succión – Proceso de Secado.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo - Proceso de Secado				
	Inicial	Final	Promedio	α	n	m	Wnr	Wns
CVS-01	0.50	1.00	0.75	0.00550	2.300	0.565	3.19	35.60
CVS-02	1.00	1.50	1.25	0.00550	2.300	0.565	8.89	37.52
CVS-03	1.50	2.00	1.75	0.00600	2.300	0.565	4.86	32.12
CVS-04	2.00	2.50	2.25	0.00850	2.000	0.500	0.51	31.65
CVS-05	2.50	3.00	2.75	0.00950	2.000	0.500	7.82	38.05
CVS-06	3.00	3.50	3.25	0.00900	2.100	0.524	0.38	30.60
CVS-07	3.50	4.00	3.75	0.00650	2.100	0.524	12.94	40.82
CVS-08	4.00	4.50	4.25	0.00550	2.000	0.500	7.91	36.88
CVS-09	4.50	5.00	4.75	0.00550	2.000	0.500	7.35	36.46
CVS-10	5.00	5.50	5.25	0.00450	2.200	0.545	2.98	34.61

Tabla 4-5 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva Humedad Natural – Succión – Proceso de Humedecimiento.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo - Proceso de Humedecimiento				
	Inicial	Final	Promedio	α	n	m	Wnr	Wns
CVS-01	0.50	1.00	0.75	0.00750	2.300	0.565	3.19	26.25
CVS-02	1.00	1.50	1.25	0.00650	2.300	0.565	8.89	27.91
CVS-03	1.50	2.00	1.75	0.00600	2.300	0.565	4.86	24.13
CVS-04	2.00	2.50	2.25	0.00850	2.000	0.500	0.51	21.07
CVS-05	2.50	3.00	2.75	0.01000	2.000	0.500	7.82	28.20
CVS-06	3.00	3.50	3.25	0.01200	2.100	0.524	0.38	22.56
CVS-07	3.50	4.00	3.75	0.00650	2.100	0.524	12.94	28.32
CVS-08	4.00	4.50	4.25	0.00700	2.000	0.500	7.91	24.71
CVS-09	4.50	5.00	4.75	0.00550	2.000	0.500	7.35	24.32
CVS-10	5.00	5.50	5.25	0.00650	2.200	0.545	2.98	21.32

Figura 4-10 Curva de Retención de Humedad Natural - Succión - Proceso de Secado.

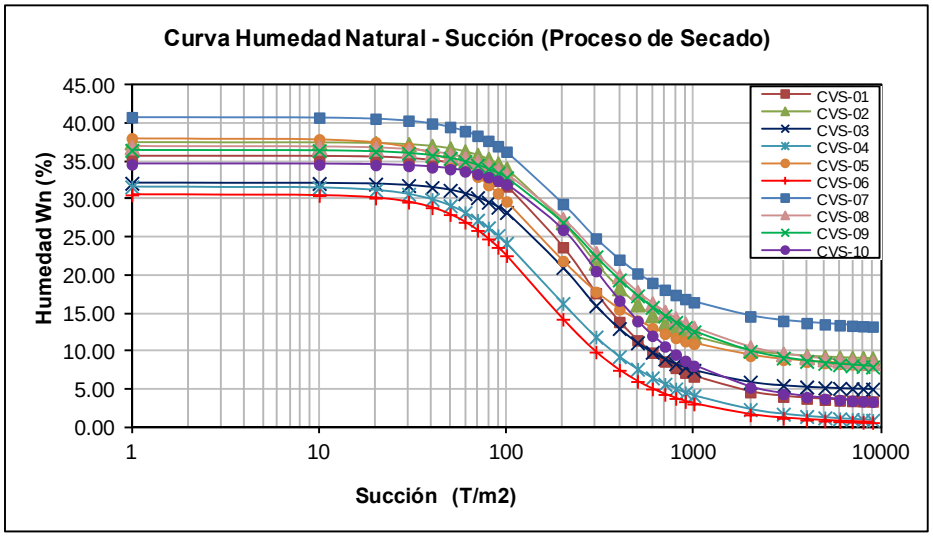
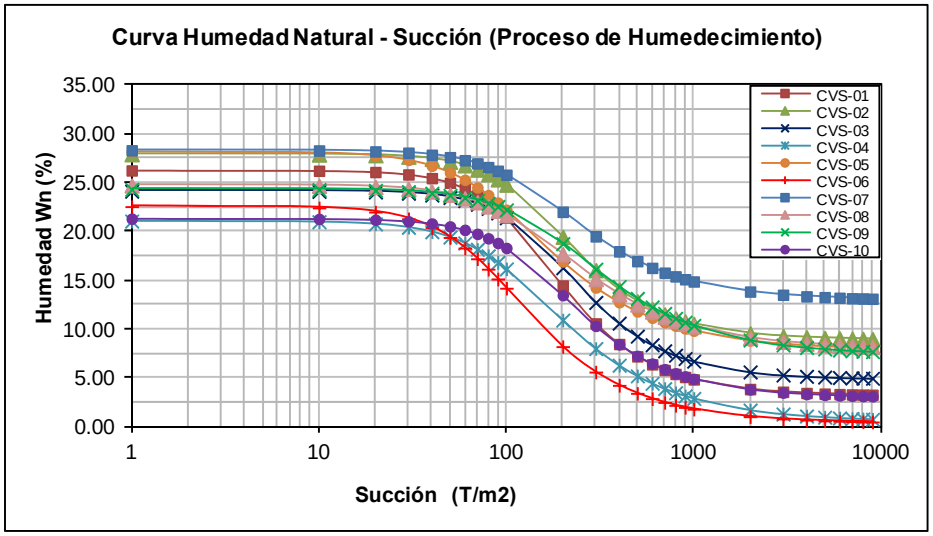


Figura 4-11 Curva de Retención de Humedad Natural - Succión – Proceso de Humedecimiento.



En procesos de secado, la humedad de saturación (Wns) varía entre el 30% y 41%, y la humedad residual (Wnr) varía entre el 0.3% y 13%. En procesos de humedecimiento, la humedad de saturación (Wns) varía entre el 21% y 29%. Por otra parte, la distribución de los valores de humedad de saturación y residual con la profundidad, tanto en procesos de secado con de humedecimiento, es errática y con un amplio rango de variación.

4.7.2 Curva de Retención Grado de Saturación – Succión

La curva de retención Grado de Saturación – Succión, se puede ajustar al modelo teórico de Van Genuthen (1980), por medio de la siguiente expresión:

$$\frac{S - S_r}{S_s - S_r} = \left[\frac{1}{1+(\alpha.u_s)^n}\right]^m \quad \textbf{(4.3)}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad \textbf{(4.4)}$$

Donde:

S : Grado de saturación del suelo

S_s : Grado de saturación total del suelo (igual a 1.0).

S_r : Grado de saturación residual del suelo

α : Parámetro que representa el inverso de la presión de entrada de

aire del suelo (AEV)

u_s : Succión matricial del suelo

n : Parámetro que representa la distribución del tamaño de poros en el suelo.

En la Tabla 4-6a Tabla 4-7 y en la Figura 4-12 y Figura 4-13 se presentan los parámetros básicos del modelo de Van Genuthen y las curvas de variación del grado de saturación (S) con la succión (Us), para los procesos de secado y humedecimiento.

Tabla 44-6 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva Grado de Saturación – Succión – Proceso de Secado.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo - Proceso de Secado					
	Inicial	Final	Promedio	α	n	m	Sr	Ss	AEV
CVS-01	0.50	1.00	0.75	0.00400	2.300	0.565	15.00	100.00	250.00
CVS-02	1.00	1.50	1.25	0.00320	2.300	0.565	37.00	100.00	312.50
CVS-03	1.50	2.00	1.75	0.00350	2.300	0.565	24.00	100.00	285.71
CVS-04	2.00	2.50	2.25	0.00400	2.000	0.500	3.00	100.00	250.00
CVS-05	2.50	3.00	2.75	0.00500	2.000	0.500	32.00	100.00	200.00
CVS-06	3.00	3.50	3.25	0.00650	2.100	0.524	2.00	100.00	153.85
CVS-07	3.50	4.00	3.75	0.00300	2.100	0.524	53.00	100.00	333.33
CVS-08	4.00	4.50	4.25	0.00280	2.000	0.500	40.00	100.00	357.14
CVS-09	4.50	5.00	4.75	0.00250	2.000	0.500	42.00	100.00	400.00
CVS-10	5.00	5.50	5.25	0.00220	2.200	0.545	22.00	100.00	454.55

Tabla 4-7 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva Grado de Saturación – Succión – Proceso de Humedecimiento.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo - Proceso de Humedecimiento				
	Inicial	Final	Promedio	α	n	m	Sr	Ss
CVS-01	0.50	1.00	0.75	0.00700	2.300	0.565	15.00	100.00
CVS-02	1.00	1.50	1.25	0.00650	2.300	0.565	37.00	100.00
CVS-03	1.50	2.00	1.75	0.00550	2.300	0.565	24.00	100.00
CVS-04	2.00	2.50	2.25	0.00700	2.000	0.500	3.00	100.00
CVS-05	2.50	3.00	2.75	0.00950	2.000	0.500	32.00	100.00
CVS-06	3.00	3.50	3.25	0.01200	2.100	0.524	2.00	100.00
CVS-07	3.50	4.00	3.75	0.00650	2.100	0.524	53.00	100.00
CVS-08	4.00	4.50	4.25	0.00750	2.000	0.500	40.00	100.00
CVS-09	4.50	5.00	4.75	0.00550	2.000	0.500	42.00	100.00
CVS-10	5.00	5.50	5.25	0.00600	2.200	0.545	22.00	100.00

Figura 4-12 Curva de Retención de Grado de Saturación - Succión - Proceso de Secado.

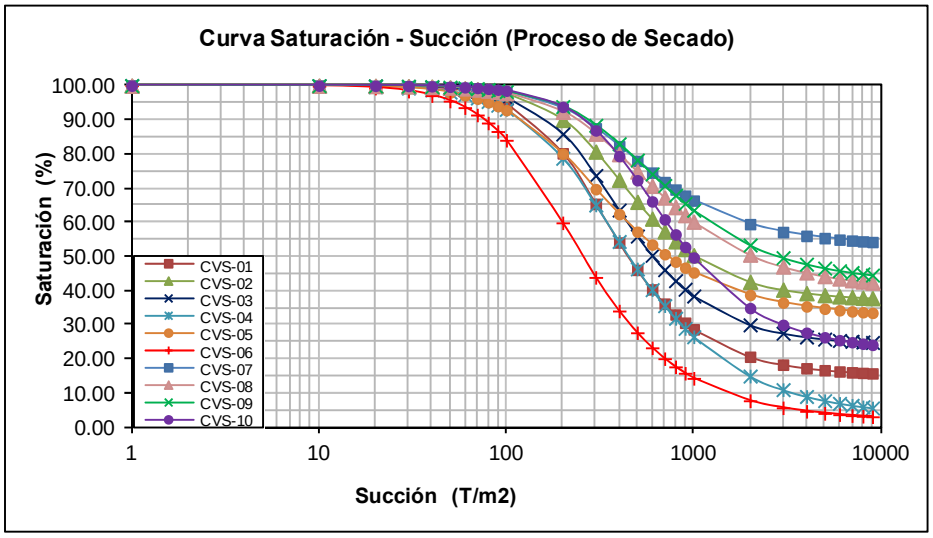
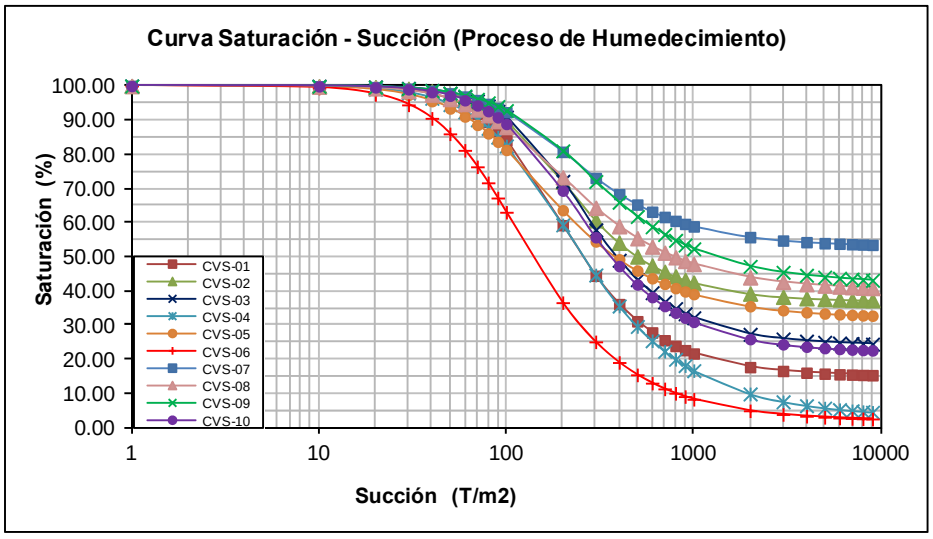


Figura 4-13 Curva de Retención de Grado de Saturación - Succión – Proceso de Humedecimiento.



En procesos de secado y humedecimiento, el grado de saturación residual (Sr) varía entre el 2% y 53%. El valor de entrada de aire (AEV) varía entre 150 y 455 T/m^2, el cual corresponde al punto de transición entre la zona saturada y no saturada del suelo. Por otra parte, la distribución de los valores de grado de saturación residual con la profundidad, es errática y con un amplio rango de variación.

4.7.3 Curva de Retención Humedad Volumétrica – Succión

La curva de retención Humedad Volumétrica – Succión, se puede ajustar al modelo teórico de Van Genuthen (1980), por medio de la siguiente expresión:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha . u_s)^n} \right]^m \quad \textbf{(4.5)}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad \textbf{(4.6)}$$

Donde:

θ_n : Humedad volumétrica del suelo

θ_s : Humedad volumétrica de saturación del suelo.

θ_r : Humedad volumétrica residual del suelo

α : Parámetro que representa el inverso de la presión de entrada de aire del suelo (AEV)

u_s : Succión matricial del suelo

n : Parámetro que representa la distribución del tamaño de poros en el suelo.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**a Tabla y en la Figura a

Figura , se presentan los parámetros básicos del modelo de Van Genuthen y las curvas de variación de la humedad volumétrica (θ) con la succión (Us), para los procesos de secado y humedecimiento.

Tabla 4-8 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva Humedad Volumétrica – Succión – Proceso de Secado.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo - Proceso de Secado				
	Inicial	Final	Promedio	α	n	m	θr	θs
CVS-01	0.50	1.00	0.75	0.00400	2.300	0.565	5.32	47.97
CVS-02	1.00	1.50	1.25	0.00400	2.300	0.565	14.16	49.19
CVS-03	1.50	2.00	1.75	0.00450	2.300	0.565	8.26	45.41
CVS-04	2.00	2.50	2.25	0.00600	2.000	0.500	0.92	45.24
CVS-05	2.50	3.00	2.75	0.00650	2.000	0.500	12.61	50.30
CVS-06	3.00	3.50	3.25	0.00750	2.100	0.524	0.67	44.87
CVS-07	3.50	4.00	3.75	0.00400	2.100	0.524	20.38	51.10
CVS-08	4.00	4.50	4.25	0.00400	2.000	0.500	13.68	49.24
CVS-09	4.50	5.00	4.75	0.00400	2.000	0.500	13.03	48.37
CVS-10	5.00	5.50	5.25	0.00300	2.200	0.545	5.70	47.17

Tabla 4-9 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva Humedad Volumétrica – Succión – Proceso de Humedecimiento.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo - Proceso de Humedecimiento				
	Inicial	Final	Promedio	α	n	m	θr	θs
CVS-01	0.50	1.00	0.75	0.00750	2.300	0.565	5.32	40.48
CVS-02	1.00	1.50	1.25	0.00650	2.300	0.565	14.16	41.86
CVS-03	1.50	2.00	1.75	0.00600	2.300	0.565	8.26	38.46
CVS-04	2.00	2.50	2.25	0.00800	2.000	0.500	0.92	35.48
CVS-05	2.50	3.00	2.75	0.00950	2.000	0.500	12.61	42.86
CVS-06	3.00	3.50	3.25	0.01200	2.100	0.524	0.67	37.50
CVS-07	3.50	4.00	3.75	0.00650	2.100	0.524	20.38	42.03
CVS-08	4.00	4.50	4.25	0.00700	2.000	0.500	13.68	39.39
CVS-09	4.50	5.00	4.75	0.00600	2.000	0.500	13.03	38.46
CVS-10	5.00	5.50	5.25	0.00650	2.200	0.545	5.70	35.48

Figura 4-14 Curva de Retención de Humedad Volumétrica - Succión - Proceso de Secado.

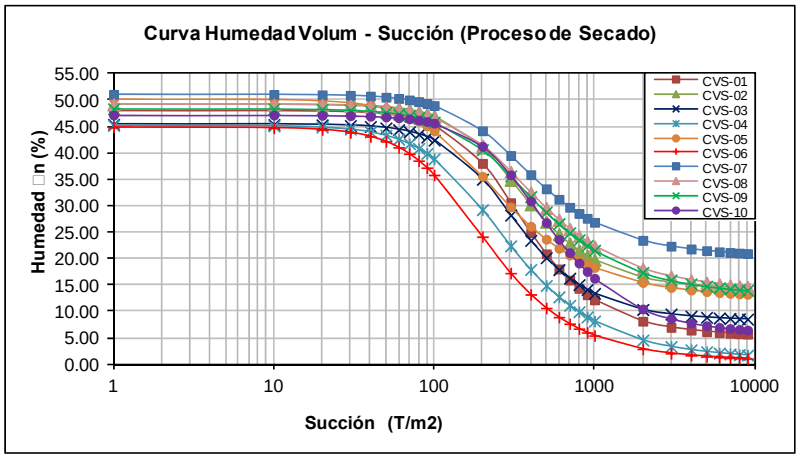
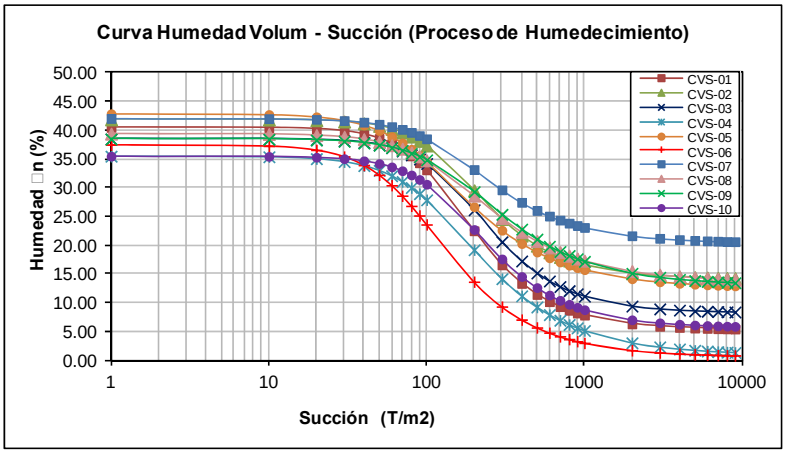


Figura 4-15 Curva de Retención de Humedad Volumétrica - Succión – Proceso de Humedecimiento.



En procesos de secado, la humedad volumétrica de saturación (θs) varía entre el 45% y 51%, y la humedad volumétrica residual (θr) varía entre el 0.6% y 21%. En procesos de humedecimiento, la humedad volumétrica de saturación (θs) varía entre el 35% y 43%.

Por otra parte, la distribución de los valores de humedad volumétrica de saturación y residual con la profundidad, tanto en procesos de secado con de humedecimiento, es errática y con un amplio rango de variación.

4.8 Curvas de compresibilidad del suelo

Para el presente trabajo de investigación, se utilizaron las curvas de compresibilidad del suelo relacionadas con la succión y el esfuerzo vertical efectivo:

- Curva Relación de Vacios – Succión.
- Curva Relación de Vacios – Esfuerzo Vertical Efectivo.

Para la generación de la curva Relación de Vacíos – Succión, se utilizaron las curvas de retención Humedad Natural – Succión y Grado de Saturación ajustadas al Modelo de Van Genuthen (1980). En el caso de la curva Relación de Vacíos – Esfuerzo Vertical Efectivo, se utilizaron las curvas de compresibilidad generadas en la Tesis de Grado de Pineda (2003) para los suelos presentes en el área de estudio.

Estas curvas de compresibilidad fueron ajustadas al Modelo Básico de Barcelona (Desarrollado por Alonso et al, 1990), y de Consolidación Unidimensional.

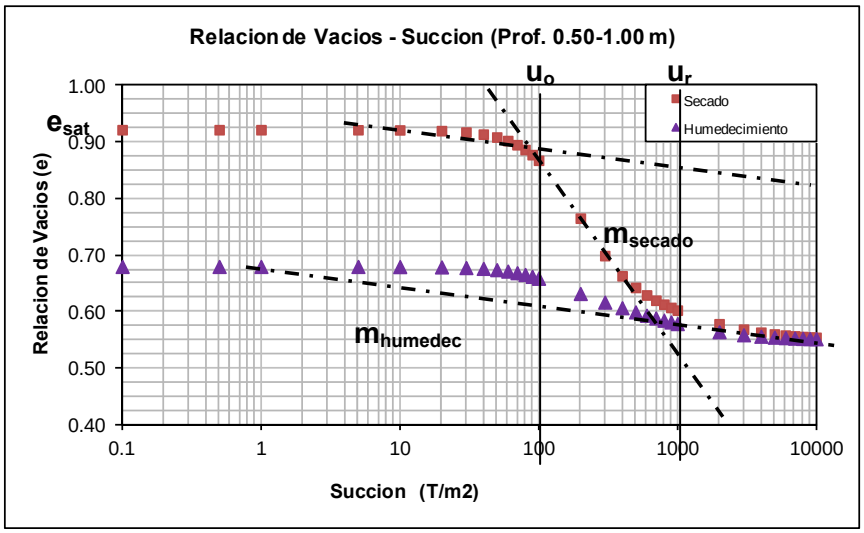
A continuación se presentan las características de las curvas de compresibilidad del suelo generadas para el sitio de estudio. En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**se presenta la formulación del modelo de ajuste y los resultados obtenidos para cada una de estas curvas.

4.8.1 Curva Relación de Vacíos – Succión

En la Figura se presenta un esquema explicativo de la formulación del modelo de ajuste para la curva Relación de Vacíos – Succión, en donde se describen claramente los parámetros básicos y el comportamiento típico de esta curva. En general, esta curva presenta dos zonas de transición bien definidas, comportamiento elástico – elastoplástico

(Succión de PreconsolidaciónUo) y comportamiento elastoplástico – residual (Succión Residual Ur).

Figura4-16 Modelo de Ajuste para la Curva Relación de Vacíos – Succión en procesos de Humedecimiento y Secado.

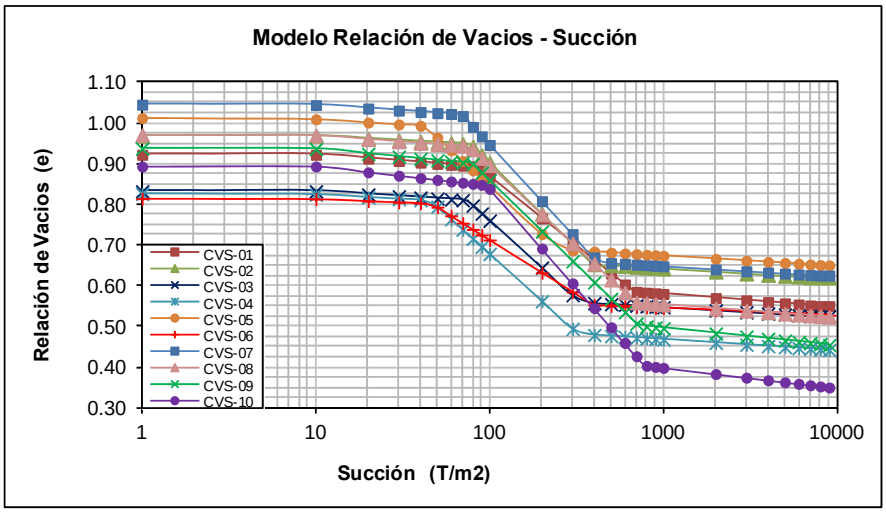


En la Tabla 4-10 y la Figura 4-17, se presentan los parámetros básicos y las curvas de variación de la relación de vacíos (e) con la succión (Us). En estas curvas se observa el comportamiento del suelo para ciclos de secado y humedecimiento. El valor de la succión de preconsolidación (Uo) en estos materiales varía entre 42 y 96 T/m^2. El valor de la succión residual (Ur) varía entre 249 y 782 T/m^2. La relación de vacíos en condición saturada (e_{sat}) varía entre 0.81 y 1.05.

Tabla 4-10 Parámetros básicos para la curva Relación de Vacíos – Succión – Procesos de Secado y Humedecimiento.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo						
	Inicial	Final	Promedio	m_{secado}	$m_{humedec}$	b_{secado}	$b_{humedec}$	U_o	U_r	$e_{saturado}$
CVS-01	0.50	1.00	0.75	-0.3405	-0.0319	1.549	0.954	84.83	674.90	0.922
CVS-02	1.00	1.50	1.25	-0.4152	-0.0229	1.732	0.991	77.65	398.80	0.968
CVS-03	1.50	2.00	1.75	-0.3837	-0.0258	1.527	0.858	74.27	332.95	0.832
CVS-04	2.00	2.50	2.25	-0.3858	-0.0233	1.450	0.847	45.93	323.47	0.826
CVS-05	2.50	3.00	2.75	-0.3940	-0.0266	1.634	1.036	42.42	249.61	1.012
CVS-06	3.00	3.50	3.25	-0.2676	-0.0166	1.248	0.830	46.34	396.21	0.814
CVS-07	3.50	4.00	3.75	-0.4590	-0.0282	1.864	1.072	68.87	425.11	1.045
CVS-08	4.00	4.50	4.25	-0.4020	-0.0300	1.700	0.999	76.65	688.88	0.970
CVS-09	4.50	5.00	4.75	-0.4163	-0.0398	1.692	0.976	79.67	721.52	0.937
CVS-10	5.00	5.50	5.25	-0.4864	-0.0472	1.811	0.940	95.97	781.09	0.893

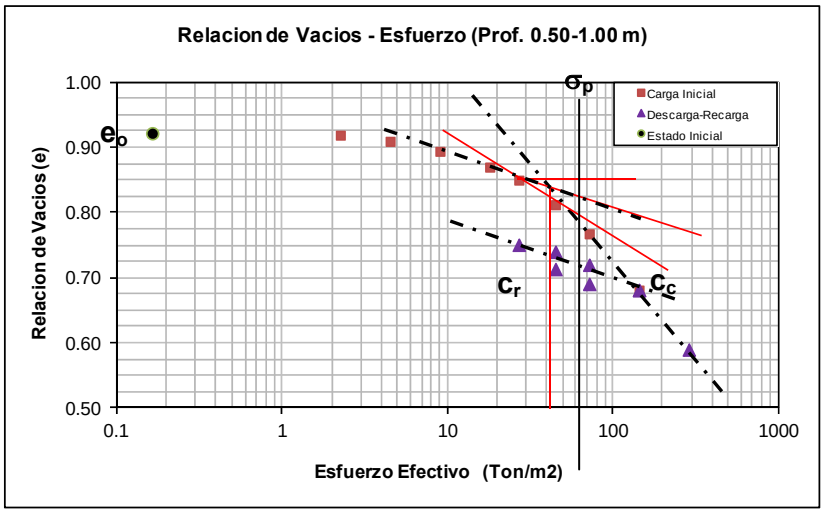
Figura4-17 Curva Relación de Vacíos - Succión - procesos de Secado y Humedecimiento.



4.8.2 Curva Relación de Vacíos – Esfuerzo Vertical Efectivo

En la Figura se presenta un esquema explicativo de la formulación del modelo de ajuste para la curva Relación de Vacíos – Esfuerzo Vertical Efectivo, en donde se describen claramente los parámetros básicos y el comportamiento típico de esta curva. En general, esta curva presenta una zona de transición bien definida, comportamiento elástico – elastoplástico (Esfuerzo de Preconsolidaciónσ_p).

Figura 4-18 Modelo de Ajuste para la Curva Relación de Vacíos – Esfuerzo Vertical Efectivo.

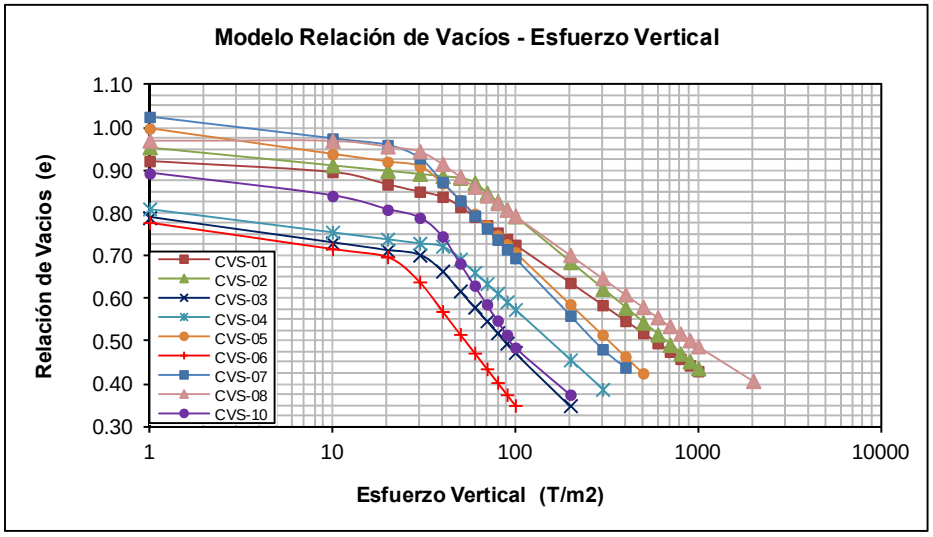


En la tabla 4-11 y la Figura 4-19, se presentan los parámetros básicos y las curvas de variación de la relación de vacíos (e) con el esfuerzo vertical efectivo ($\sigma'v$). En estas curvas se observa el comportamiento del suelo en condición saturada (S=100%), para la etapa de compresión y descarga. El valor del esfuerzo de preconsolidación (σ_p) en estos materiales varía entre 24 y 57 T/m2.

Tabla 4-11 Parámetros básicos para la curva Relación de Vacíos – Esfuerzo Vertical Efectivo.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo						
	Inicial	Final	Promedio	Cc	Cr	b_{cc}	b_{cr}	σ_p	e_o	e_r
CVS-01	0.50	1.00	0.75	-0.2956	-0.0963	1.317	0.993	42.44	0.922	0.387
CVS-02	1.00	1.50	1.25	-0.3554	-0.0421	1.503	0.954	56.53	0.968	0.407
CVS-03	1.50	2.00	1.75	-0.4783	-0.0591	1.431	0.789	33.88	0.832	0.349
CVS-04	2.00	2.50	2.25	-0.3920	-0.0545	1.359	0.810	42.20	0.826	0.347
CVS-05	2.50	3.00	2.75	-0.4053	-0.0598	1.519	0.998	32.18	1.012	0.425
CVS-06	3.00	3.50	3.25	-0.5531	-0.0618	1.456	0.778	23.99	0.814	0.342
CVS-07	3.50	4.00	3.75	-0.4474	-0.0505	1.589	1.025	26.43	1.045	0.439
CVS-08	4.00	4.50	4.25	-0.3056	-0.0624	1.405	1.037	32.55	0.970	0.407
CVS-09	4.50	5.00	4.75	-0.4617	-0.0538	1.689	0.975	56.43	0.937	0.394
CVS-10	5.00	5.50	5.25	-0.6544	-0.1069	1.794	0.947	35.23	0.893	0.375

Figura 4-19 Curva Relación de Vacíos - Esfuerzo Vertical Efectivo.



De acuerdo con estudios anteriores realizados en el área de estudio (Pineda, 2003), los materiales presentes a nivel superficial se encuentran en condición sobreconsolidada, es decir, que el estado de esfuerzos actual no supera el esfuerzo de preconsolidación, lo cual genera pequeños cambios en la relación de vacíos del suelo.

5. Análisis de deformaciones superficiales por cambios de succión en el área de estudio

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el análisis de deformaciones superficiales por cambios de humedad (succión), para los dos perfiles estratigráficos generados en el sitio, como resultado de las diferentes campañas de exploración geotécnica realizadas en el área de estudio; para lo cual se utilizaron las curvas de retención de humedad, las curvas de compresibilidad del suelo, y un modelo teórico de análisis de deformaciones (Implementación del Modelo Básico de Barcelona BBM desarrollado por Alonso et al, 1990).

Para esto, es necesario definir claramente las características de los perfiles estratigráficos de análisis (discretización de los estratos de suelo y variación de la humedad natural en profundidad), las curvas de retención de humedad (variación de la humedad natural, grado de saturación, y humedad volumétrica con la succión), las curvas de compresibilidad del suelo (variación de la relación de vacíos con la succión y el esfuerzo efectivo vertical), y las bases teóricas del modelo de análisis de deformaciones (Generación del Modelo Volumen Específico – Succión y Volumen Específico – Esfuerzo Neto Medio, y su integración para el cálculo de deformaciones en el suelo).

5.1 Definición de perfiles estratigráficos

Como resultado de las cuatrocampañas de exploración geotécnica realizadas en los dos puntos de inspección para diferentes épocas del año 2010 y 2011, se generaron perfiles de variación de humedad natural con el tiempo. La profundidad máxima de estos perfiles es de 6 m, ya que a partir de este nivel, el suelo se encuentra en una condición de saturación total (S=100%). Los datos de humedad natural registrados en cada perfil, se obtuvieron dealgunos ensayos de laboratorio realizados en muestras inalteradas

tomadas cada 0.5 m en tubo Shelby (muestreo continuo), para un total de 11 registros por perfil.

En la Tabla 5-1 a Tabla 5-2 y en la Figura 5-1, se presentan los perfiles de variación de humedad natural con la profundidad para los dos puntos de inspección.

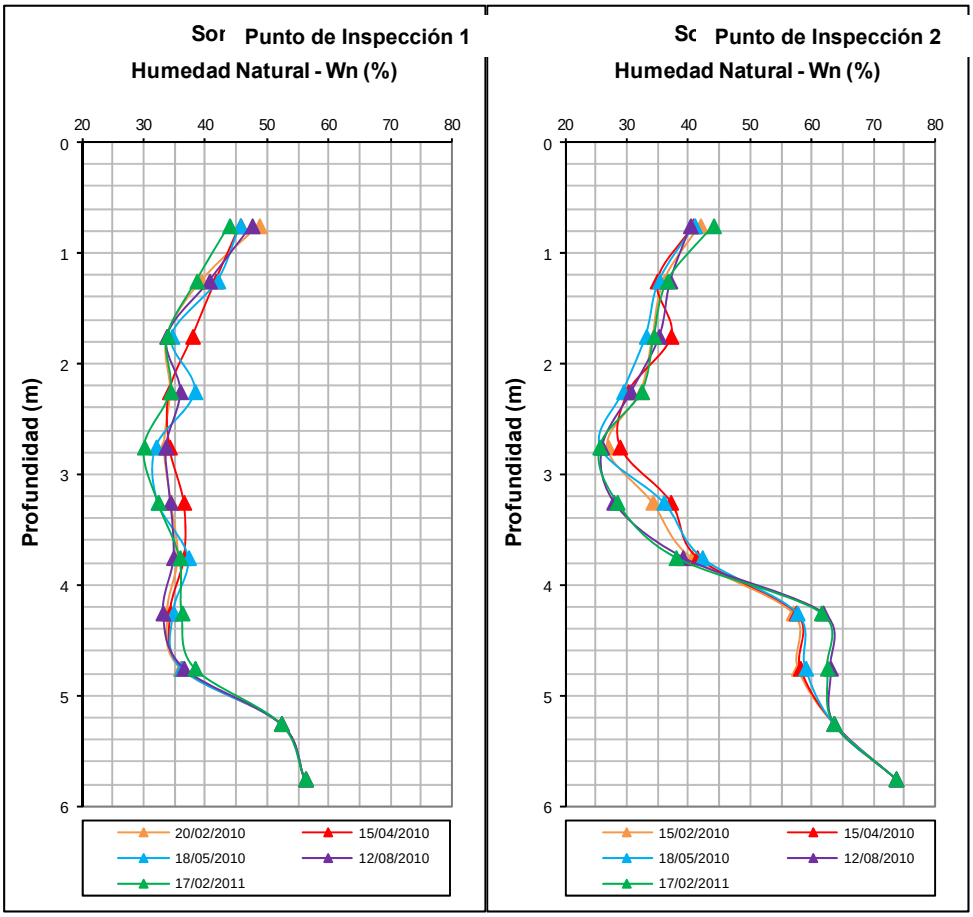
Tabla 5-1 Datos de Variación de Humedad Natural con la profundidad - Punto de Inspección 1.

Informacion Puntos de Analisis					Datos de Humedad Natural (%)				
No.	Estrato	Profundidad			Campañas 0 - 4 (20/02/2010 - 17/02/2011)				
		Inicial	Final	Promedio	Wn_0	Wn_1	Wn_2	Wn_3	Wn_4
SONDEO 1	1	0.50	1.00	0.75	48.68	45.61	45.61	47.50	43.85
	2	1.00	1.50	1.25	39.24	41.61	41.95	40.58	38.54
	3	1.50	2.00	1.75	33.64	37.85	34.52	33.66	33.79
	4	2.00	2.50	2.25	34.17	34.08	38.25	35.85	34.29
	5	2.50	3.00	2.75	33.18	34.11	31.94	33.51	30.02
	6	3.00	3.50	3.25	34.30	36.44	32.25	34.24	32.27
	7	3.50	4.00	3.75	35.41	36.50	37.20	34.75	35.80
	8	4.00	4.50	4.25	33.70	34.23	34.74	33.04	36.16
	9	4.50	5.00	4.75	35.83	36.13	36.03	36.43	38.25
	10	5.00	5.50	5.25	52.25	52.25	52.25	52.25	52.25
	11	5.50	6.00	5.75	56.18	56.18	56.18	56.18	56.18

Tabla 5-2 Datos de Variación de Humedad Natural con la profundidad - Punto de Inspección 2.

Informacion Puntos de Analisis					Datos de Humedad Natural (%)				
No.	Estrato	Profundidad			Campañas 0 - 4 (20/02/2010 - 17/02/2011)				
		Inicial	Final	Promedio	Wn_0	Wn_1	Wn_2	Wn_3	Wn_4
SONDEO 2	1	0.50	1.00	0.75	41.85	40.69	40.93	40.23	43.98
	2	1.00	1.50	1.25	36.03	34.82	35.23	36.91	36.52
	3	1.50	2.00	1.75	34.25	37.09	33.06	35.15	34.32
	4	2.00	2.50	2.25	32.27	30.13	29.39	30.56	32.35
	5	2.50	3.00	2.75	26.90	28.78	25.71	25.84	25.52
	6	3.00	3.50	3.25	34.14	37.04	35.93	27.78	28.37
	7	3.50	4.00	3.75	40.46	41.31	42.15	38.97	37.89
	8	4.00	4.50	4.25	56.89	57.38	57.55	61.74	61.46
	9	4.50	5.00	4.75	57.73	58.05	58.94	62.95	62.44
	10	5.00	5.50	5.25	63.50	63.50	63.50	63.50	63.50
	11	5.50	6.00	5.75	73.58	73.58	73.58	73.58	73.58

Figura 5-1 Perfil de Variación de Humedad Natural con la profundidad - Puntos de inspección 1 y 2.



Para el análisis de deformaciones por cambios de humedad o de succión se debe contar con una campaña inicial, que es el punto de partida para el cálculo de la variación de la succión (Us) y su integración con el esfuerzo neto medio (p), la cual se obtuvo como resultado de la exploración geotécnica realizada en trabajos anteriores.

5.2 Curvas de retención de humedad utilizadas

Se utilizaron las curvas de retención generadas en la Tesis de Grado de Pineda (2003) para los suelos presentes en el área del I.E.I de la Universidad Nacional de Colombia (Humedad Natural – Succión, Grado de Saturación – Succión y Humedad Volumétrica – Succión), por lo cual no fue necesario generar nuevas curvas de retención de humedad para el presente trabajo de investigación.

Para efectos de análisis, se ajustaron dichas curvas de retención al modelo teórico de Van Genuthen (1980), el cual es uno de los más utilizados en el estudio de Suelos Parcialmente Saturados, cuya formulación se presenta en el capítulo anterior.

Además, fue necesario realizar una corrección por humedad de saturación (S=100%), debido a que los valores de humedad natural registrados en las diferentes campañas superan el valor de humedad de saturación característico de estas curvas de retención, cuyos resultados se presentan en la Tabla 5-3

Tabla 5-3 Parámetros básicos de las curvas de retención corregidos por efectos de la humedad de saturación (Wns) – Puntos de Inspección 1 y 2.

No.	Estrato	Profundidad			Wn (%)		S (%)		e		θ (%)	
		Inicial	Final	Promedio	Wn_s	Wn_r	S_s	S_r	e_s	e_r	θs	θr
SONDEO 1	1	0.50	1.00	0.75	48.92	5.37	100.00	15.00	1.389	1.017	58.15	7.56
	2	1.00	1.50	1.25	42.03	11.04	100.00	37.00	1.198	0.850	54.50	17.00
	3	1.50	2.00	1.75	37.98	6.52	100.00	24.00	1.079	0.772	51.89	10.45
	4	2.00	2.50	2.25	38.47	0.74	100.00	3.00	1.081	0.694	51.95	1.23
	5	2.50	3.00	2.75	34.19	6.85	100.00	32.00	0.968	0.606	49.18	12.07
	6	3.00	3.50	3.25	36.51	0.50	100.00	2.00	0.997	0.682	49.92	0.81
	7	3.50	4.00	3.75	37.25	11.74	100.00	53.00	1.036	0.616	50.87	20.19
	8	4.00	4.50	4.25	36.22	8.01	100.00	40.00	1.007	0.557	50.17	14.31
	9	4.50	5.00	4.75	38.34	8.66	100.00	42.00	1.054	0.567	51.32	15.20
	10	5.00	5.50	5.25	52.25	7.10	100.00	22.00	1.421	0.878	58.70	10.29
	11	5.50	6.00	5.75	56.18	7.97	100.00	22.00	1.528	0.985	60.44	10.92
SONDEO 2	1	0.50	1.00	0.75	44.04	4.64	100.00	15.00	1.251	0.879	55.57	7.02
	2	1.00	1.50	1.25	36.99	9.17	100.00	37.00	1.054	0.706	51.32	15.32
	3	1.50	2.00	1.75	37.15	6.32	100.00	24.00	1.055	0.748	51.34	10.27
	4	2.00	2.50	2.25	32.42	0.56	100.00	3.00	0.911	0.524	47.67	1.03
	5	2.50	3.00	2.75	28.84	5.14	100.00	32.00	0.816	0.454	44.94	9.99
	6	3.00	3.50	3.25	37.37	0.52	100.00	2.00	1.020	0.706	50.50	0.83
	7	3.50	4.00	3.75	42.26	14.39	100.00	53.00	1.175	0.755	54.02	22.80
	8	4.00	4.50	4.25	61.81	18.25	100.00	40.00	1.718	1.268	63.21	22.36
	9	4.50	5.00	4.75	63.13	19.08	100.00	42.00	1.736	1.249	63.45	23.33
	10	5.00	5.50	5.25	63.50	9.58	100.00	22.00	1.727	1.184	63.33	11.93
	11	5.50	6.00	5.75	73.58	11.80	100.00	22.00	2.001	1.458	66.68	13.05

A continuación se presentan las características de las curvas de retención de humedad utilizadas en el análisis de deformaciones superficiales, para los dos puntos de análisis definidos en el área de estudio.

5.2.1 Curva Final Humedad Natural – Succión

En la Tabla a Tabla y en la Figura a Figura , se presentan los parámetros básicos del modelo de Van Genuthen y las curvas de variación de la humedad natural (Wn) con la succión (Us), para los dos puntos de análisis. Se puede apreciar que los valores de humedad natural de saturación (Wns) varían entre el 28% y 78%, con lo cual se evidencia una variación importante de la humedad natural con la profundidad.

Tabla 5-4 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva humedad Natural – Succión – Punto de Análisis 1.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo UN 2010 - Proceso de Secado				
	Inicial	Final	Promedio	α	n	m	Wnr	Wns
CVS-01	0.50	1.00	0.75	0.00550	2.300	0.565	5.37	48.92
CVS-02	1.00	1.50	1.25	0.00550	2.300	0.565	11.04	42.03
CVS-03	1.50	2.00	1.75	0.00600	2.300	0.565	6.52	37.98
CVS-04	2.00	2.50	2.25	0.00850	2.000	0.500	0.74	38.47
CVS-05	2.50	3.00	2.75	0.00950	2.000	0.500	6.85	34.19
CVS-06	3.00	3.50	3.25	0.00900	2.100	0.524	0.50	36.51
CVS-07	3.50	4.00	3.75	0.00650	2.100	0.524	11.74	37.25
CVS-08	4.00	4.50	4.25	0.00550	2.000	0.500	8.01	36.22
CVS-09	4.50	5.00	4.75	0.00550	2.000	0.500	8.66	38.34
CVS-10	5.00	5.50	5.25	0.00450	2.200	0.545	7.10	52.25
CVS-11	5.50	6.00	5.75	0.00450	2.200	0.545	7.97	56.18

Tabla 5-5 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva humedad Natural – Succión – Punto de Análisis 2.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo UN 2010 - Proceso de Secado				
	Inicial	Final	Promedio	α	n	m	Wnr	Wns
CVS-01	0.50	1.00	0.75	0.00550	2.300	0.565	4.64	44.04
CVS-02	1.00	1.50	1.25	0.00550	2.300	0.565	9.17	36.99
CVS-03	1.50	2.00	1.75	0.00600	2.300	0.565	6.32	37.15
CVS-04	2.00	2.50	2.25	0.00850	2.000	0.500	0.56	32.42
CVS-05	2.50	3.00	2.75	0.00950	2.000	0.500	5.14	28.84
CVS-06	3.00	3.50	3.25	0.00900	2.100	0.524	0.52	37.37
CVS-07	3.50	4.00	3.75	0.00650	2.100	0.524	14.39	42.26
CVS-08	4.00	4.50	4.25	0.00550	2.000	0.500	18.25	61.81
CVS-09	4.50	5.00	4.75	0.00550	2.000	0.500	19.08	63.13
CVS-10	5.00	5.50	5.25	0.00450	2.200	0.545	9.58	63.50
CVS-11	5.50	6.00	5.75	0.00450	2.200	0.545	11.80	73.58

Figura 5-2 Curva de Retención de Humedad Natural - Succión para el Punto de inspección 1.

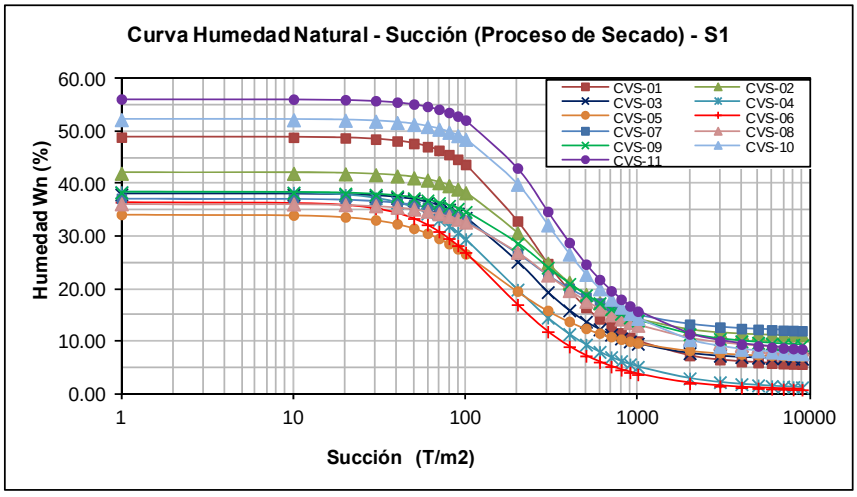
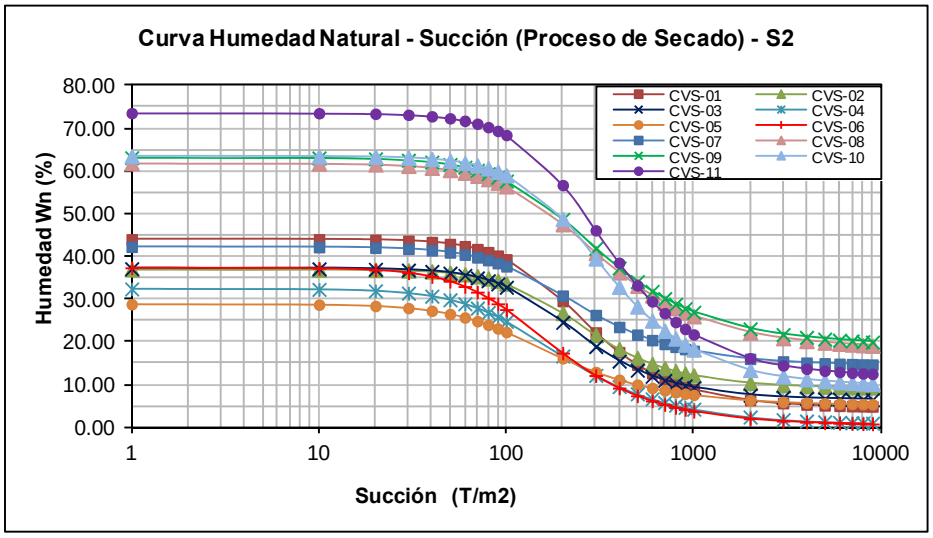


Figura 5-3 Curva de Retención de Humedad Natural - Succión para el Punto de inspección 2.



5.2.2 Curva Final Grado de Saturación – Succión

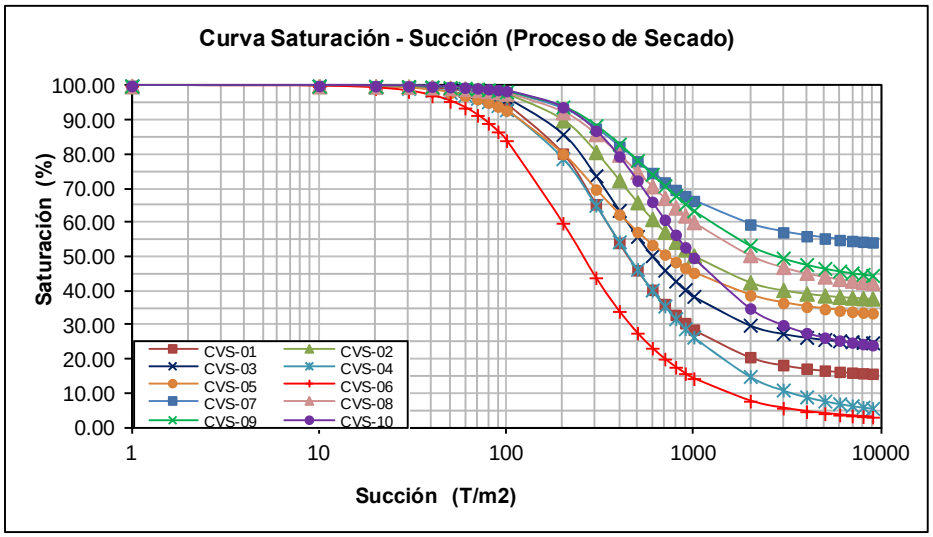
En la Tabla 5-6 y en la Figura 5-4 se presentan los parámetros básicos del modelo de Van Genuthen y las curvas de variación del grado de saturación (S) con la succión (Us), para los dos puntos de inspección. Se puede apreciar que la succión para el valor de entrada de aire (AEV) varía entre 150 y 455 T/m^2, el cual corresponde al punto de transición entre la zona saturada y no saturada del suelo.

Esta curva no se vio afectada por el efecto de la humedad de saturación (S=100%), ya que este efecto incide principalmente en el comportamiento de la relación de vacíos y la humedad volumétrica del suelo. De acuerdo con el modelo de Van Genuthen (1980), el valor de succión de entrada de aire (AEV) se calcula como el inverso del parámetro de ajuste (α), que representa el inverso del punto de inflexión de la curva.

Tabla 5-6 Parámetros básicos del modelo de Van Genuthen (1980) para la curva Grado de Saturación – Succión – Puntos de inspección 1 y 2.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo UN 2010 - Proceso de Secado					
	Inicial	Final	Promedio	α	n	m	Sr	Ss	AEV
CVS-01	0.50	1.00	0.75	0.00400	2.300	0.565	15.00	100.00	250.00
CVS-02	1.00	1.50	1.25	0.00320	2.300	0.565	37.00	100.00	312.50
CVS-03	1.50	2.00	1.75	0.00350	2.300	0.565	24.00	100.00	285.71
CVS-04	2.00	2.50	2.25	0.00400	2.000	0.500	3.00	100.00	250.00
CVS-05	2.50	3.00	2.75	0.00500	2.000	0.500	32.00	100.00	200.00
CVS-06	3.00	3.50	3.25	0.00650	2.100	0.524	2.00	100.00	153.85
CVS-07	3.50	4.00	3.75	0.00300	2.100	0.524	53.00	100.00	333.33
CVS-08	4.00	4.50	4.25	0.00280	2.000	0.500	40.00	100.00	357.14
CVS-09	4.50	5.00	4.75	0.00250	2.000	0.500	42.00	100.00	400.00
CVS-10	5.00	5.50	5.25	0.00220	2.200	0.545	22.00	100.00	454.55
CVS-11	5.50	6.00	5.75	0.00220	2.200	0.545	22.00	100.00	454.55

Figura 5-4 Curva de Retención de Grado de Saturación - Succión para los Puntos de inspección 1 y 2.



5.2.3Curva Final Humedad Volumétrica – Succión

En la Tabla a Tabla y en la Figura a Figura , se presentan los parámetros básicos del modelo de Van Genutheny las curvas de variación de la humedad volumétrica (θ) con la succión (Us), para los dos puntos de inspección. Se puede apreciar que los valores de humedad volumétrica de saturación (θs) varían entre el 44% y 67%, con lo cual se evidencia una variación importante de la humedad volumétrica con la profundidad.

El valor de succión de entrada de aire (AEV) también se puede calcular como el inverso del parámetro de ajuste (α) de esta curva, debido a que la humedad volumétrica depende del grado de saturación y la relación de vacíos del suelo. Los valores de succión de entrada de aire (AEV) se encuentran entre 130 y 340 T/m2, que son relativamente menores a los obtenidos en la curva de Grado de Saturación – Succión, ya que estos valores están afectados por un factor que depende de la relación de vacíos; de tal forma que resulta más conveniente trabajar con las curvas en función del grado de saturación que con las de humedad volumétrica y en general, en la literatura se utiliza la curva de grado de saturación para determinar el AEV.

Por otra parte, a partir de la información de esta curva de retención y los datos de saturación del suelo, es posible obtener el cambio de la compresibilidad del suelo con la succión (variación en la relación de vacíos). Los resultados obtenidos por este método son relativamente mayores a los del método tradicional (a partir de la curva de retención Humedad Natural – Succión y Saturación – Succión), debido a que las curvas mencionadas anteriormente fueron ajustadas al modelo de Van Genuthen de manera independiente, mientras que en el caso de la Humedad Volumétrica, esta curva es el producto de la curva de retención Saturación – Succión y un factor que depende de la relación de vacíos del suelo.

Tabla 5-7 Parámetros básicos del modelo de VanGenuthen (1980) para la curva Humedad Volumétrica – Succión – Punto de Inspección 1.

Curva	Profundidad			Parametros Modelo UN 2010 - Proceso de Secado					
Modelo	Inicial	Final	Promedio	α	n	m	θr	θs	AEV
CVS-01	0.50	1.00	0.75	0.00400	2.300	0.565	7.56	58.15	250.00
CVS-02	1.00	1.50	1.25	0.00400	2.300	0.565	17.00	54.50	250.00
CVS-03	1.50	2.00	1.75	0.00450	2.300	0.565	10.45	51.89	222.22
CVS-04	2.00	2.50	2.25	0.00600	2.000	0.500	1.23	51.95	166.67
CVS-05	2.50	3.00	2.75	0.00650	2.000	0.500	12.07	49.18	153.85
CVS-06	3.00	3.50	3.25	0.00750	2.100	0.524	0.81	49.92	133.33
CVS-07	3.50	4.00	3.75	0.00400	2.100	0.524	20.19	50.87	250.00
CVS-08	4.00	4.50	4.25	0.00400	2.000	0.500	14.31	50.17	250.00
CVS-09	4.50	5.00	4.75	0.00400	2.000	0.500	15.20	51.32	250.00
CVS-10	5.00	5.50	5.25	0.00300	2.200	0.545	10.29	58.70	333.33
CVS-11	5.50	6.00	5.75	0.00300	2.200	0.545	10.92	60.44	333.33

Tabla 5-8 Parámetros básicos del modelo de VanGenuthen (1980) para la curva Humedad Volumétrica – Succión – Punto de Inspección 2.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo UN 2010 - Proceso de Secado					
	Inicial	Final	Promedio	α	n	m	θr	θs	AEV
CVS-01	0.50	1.00	0.75	0.00400	2.300	0.565	7.02	55.57	250.00
CVS-02	1.00	1.50	1.25	0.00400	2.300	0.565	15.32	51.32	250.00
CVS-03	1.50	2.00	1.75	0.00450	2.300	0.565	10.27	51.34	222.22
CVS-04	2.00	2.50	2.25	0.00600	2.000	0.500	1.03	47.67	166.67
CVS-05	2.50	3.00	2.75	0.00650	2.000	0.500	9.99	44.94	153.85
CVS-06	3.00	3.50	3.25	0.00750	2.100	0.524	0.83	50.50	133.33
CVS-07	3.50	4.00	3.75	0.00400	2.100	0.524	22.80	54.02	250.00
CVS-08	4.00	4.50	4.25	0.00400	2.000	0.500	22.36	63.21	250.00
CVS-09	4.50	5.00	4.75	0.00400	2.000	0.500	23.33	63.45	250.00
CVS-10	5.00	5.50	5.25	0.00300	2.200	0.545	11.93	63.33	333.33
CVS-11	5.50	6.00	5.75	0.00300	2.200	0.545	13.05	66.68	333.33

Figura 5-5 Curva de Retención de Humedad Volumétrica - Succión para el Punto de inspección 1.

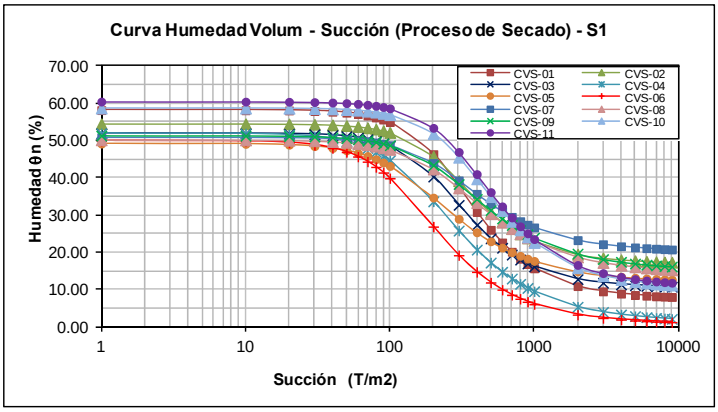
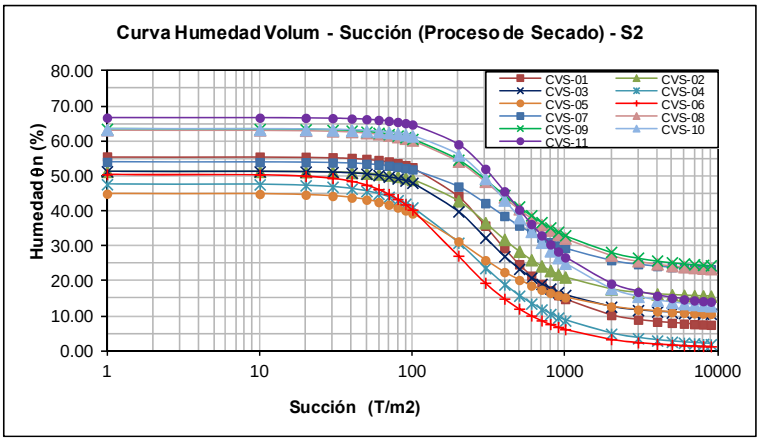


Figura 5-6 Curva de Retención de Humedad Volumétrica - Succión para el Punto de inspección 2.



5.3 Curvas de compresibilidad utilizadas

Para la generación de la curva Relación de Vacíos – Succión, se utilizaron las curvas de retención Humedad Natural – Succión y Grado de Saturación ajustadas al Modelo de Van Genuthen (1980) y corregidas por efectos de la humedad de saturación.

En el caso de la curva Relación de Vacíos – Esfuerzo Vertical Efectivo, se utilizaron las curvas de compresibilidad generadas en la Tesis de Grado de Pineda (2003) para los suelos presentes en el área de estudio, las cuales fueron corregidas por efectos de la humedad de saturación.

A continuación se presentan las características de las curvas de compresibilidad del suelo utilizadas en el análisis de deformaciones superficiales, para los dos puntos de inspección definidos en el área de estudio.

5.3.1. Curva Final Relación de Vacíos – Succión

En la Figura se presenta un esquema explicativo de la formulación del modelo de ajuste para la curva Relación de Vacíos – Succión, en donde se describen claramente los parámetros básicos y el comportamiento típico de esta curva. En general, esta curva presenta dos zonas de transición bien definidas, comportamiento elástico – elastoplástico (Succión de PreconsolidaciónUo) y comportamiento elastoplástico – residual (Succión Residual Ur).

En la Tabla 5-9 a Tabla 5-10 y la Figura 5-7 a Figura 5-8, se presentan los parámetros básicos y las curvas de variación de la relación de vacíos (e) con la succión (Us), para los dos puntos de inspección. En estas curvas se observa el comportamiento del suelo para ciclos de secado y humedecimiento. El valor de la succión de preconsolidación (Uo) en estos materiales varía entre 42 y 96 T/m2.

Tabla 5-9 Parámetros básicos de análisis para la curva Relación de Vacíos – Succión – Punto de Inspección 1.

Curva e-Us	Profundidad			Parametros Modelo						
	Inicial	Final	Promedio	m_{secado}	$m_{humedec}$	b_{secado}	$b_{humedec}$	U_o	U_r	$e_{saturado}$
1	0.50	1.00	0.75	-0.3405	-0.0319	2.016	1.421	84.83	674.90	1.389
2	1.00	1.50	1.25	-0.4152	-0.0229	1.963	1.221	77.65	398.80	1.198
3	1.50	2.00	1.75	-0.3837	-0.0258	1.774	1.104	74.27	332.95	1.079
4	2.00	2.50	2.25	-0.3858	-0.0233	1.703	1.101	45.93	323.47	1.081
5	2.50	3.00	2.75	-0.3940	-0.0266	1.589	0.991	42.42	249.61	0.968
6	3.00	3.50	3.25	-0.2676	-0.0166	1.429	1.011	46.34	396.21	0.997
7	3.50	4.00	3.75	-0.4590	-0.0282	1.855	1.063	68.87	425.11	1.036
8	4.00	4.50	4.25	-0.4020	-0.0300	1.737	1.036	76.65	688.88	1.007
9	4.50	5.00	4.75	-0.4163	-0.0398	1.809	1.093	79.67	721.52	1.054
10	5.00	5.50	5.25	-0.4864	-0.0472	2.339	1.468	95.97	781.09	1.421
11	5.50	6.00	5.75	-0.4864	-0.0472	2.446	1.575	95.97	781.09	1.528

Tabla 5-10 Parámetros básicos de análisis para la curva Relación de Vacíos – Succión – Punto de inspección 2.

Curva e-Us	Profundidad			Parametros Modelo						
	Inicial	Final	Promedio	m_{secado}	$m_{humedec}$	b_{secado}	$b_{humedec}$	U_o	U_r	$e_{saturado}$
1	0.50	1.00	0.75	-0.3405	-0.0319	1.878	1.283	84.83	674.90	1.251
2	1.00	1.50	1.25	-0.4152	-0.0229	1.819	1.078	77.65	398.80	1.054
3	1.50	2.00	1.75	-0.3837	-0.0258	1.750	1.081	74.27	332.95	1.055
4	2.00	2.50	2.25	-0.3858	-0.0233	1.533	0.931	45.93	323.47	0.911
5	2.50	3.00	2.75	-0.3940	-0.0266	1.438	0.840	42.42	249.61	0.816
6	3.00	3.50	3.25	-0.2676	-0.0166	1.453	1.035	46.34	396.21	1.020
7	3.50	4.00	3.75	-0.4590	-0.0282	1.994	1.202	68.87	425.11	1.175
8	4.00	4.50	4.25	-0.4020	-0.0300	2.448	1.747	76.65	688.88	1.718
9	4.50	5.00	4.75	-0.4163	-0.0398	2.491	1.775	79.67	721.52	1.736
10	5.00	5.50	5.25	-0.4864	-0.0472	2.645	1.774	95.97	781.09	1.727
11	5.50	6.00	5.75	-0.4864	-0.0472	2.919	2.049	95.97	781.09	2.001

Figura 5-7 Curva Relación de Vacíos - Succión para el Punto de inspección 1.

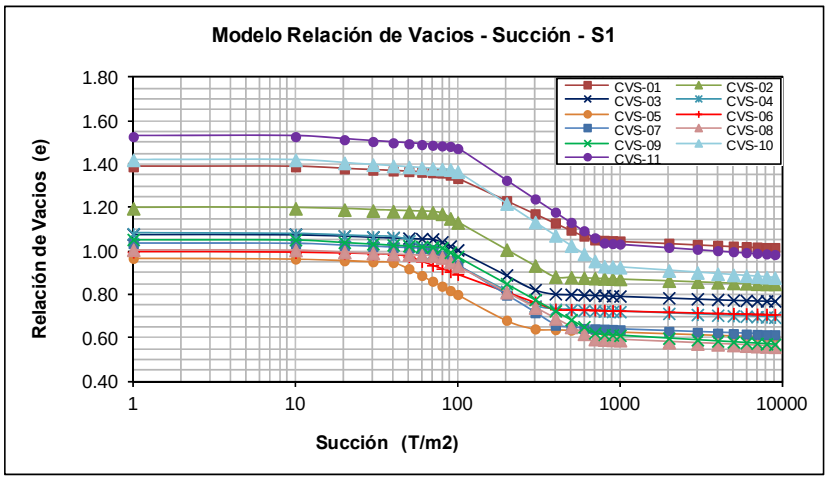
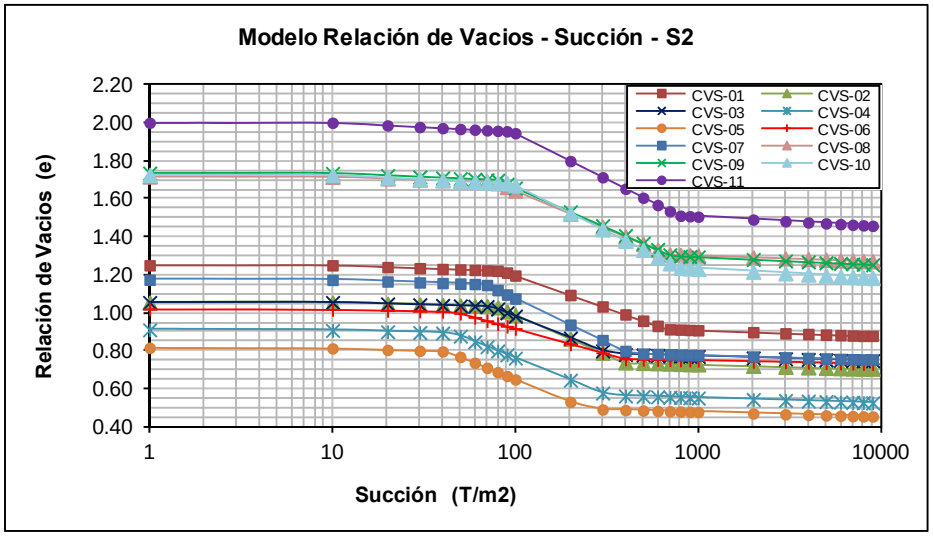


Figura 5-8 Curva Relación de Vacíos - Succión para el Punto de inspección 2.



5.3.2 Curva Final Relación de Vacíos – Esfuerzo Vertical Efectivo

En la Figura se presenta un esquema explicativo de la formulación del modelo de ajuste para la curva Relación de Vacíos – Esfuerzo Vertical Efectivo, en donde se describen claramente los parámetros básicos y el comportamiento típico de esta curva. En general, esta curva presenta una zona de transición bien definida, comportamiento elástico – elastoplástico (Esfuerzo de Preconsolidaciónσ_p).

En la Tabla 5-11 a Tabla 5-12 y la Figura 5-9 a Figura 5-10, se presentan los parámetros básicos y las curvas de variación de la relación de vacíos (e) con el esfuerzo vertical efectivo ($\sigma'v$), para los dos puntos de inspección. En estas curvas se observa el comportamiento del suelo para la etapa de compresión y descarga. El valor del esfuerzo de preconsolidación (σp) en estos materiales varía entre 24 y 57 T/m2. Es importante aclarar que estas curvas describen el comportamiento de un suelo saturado (S=100%).

Tabla 5-11 Parámetros básicos de análisis para la curva Relación de Vacíos – Esfuerzo Vertical Efectivo – Punto de Inspección 1.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo						
	Inicial	Final	Promedio	Cc	Cr	b_{cc}	b_{cr}	σ_p	e_o	e_r
1	0.50	1.00	0.75	-0.2956	-0.0963	1.784	1.460	42.44	1.389	0.855
2	1.00	1.50	1.25	-0.3554	-0.0421	1.734	1.185	56.53	1.198	0.637
3	1.50	2.00	1.75	-0.4783	-0.0591	1.677	1.036	33.88	1.079	0.596
4	2.00	2.50	2.25	-0.3920	-0.0545	1.612	1.064	42.20	1.081	0.601
5	2.50	3.00	2.75	-0.4053	-0.0598	1.475	0.954	32.18	0.968	0.381
6	3.00	3.50	3.25	-0.5531	-0.0618	1.638	0.960	23.99	0.997	0.524
7	3.50	4.00	3.75	-0.4474	-0.0505	1.580	1.016	26.43	1.036	0.429
8	4.00	4.50	4.25	-0.3056	-0.0624	1.442	1.074	32.55	1.007	0.444
9	4.50	5.00	4.75	-0.4617	-0.0538	1.806	1.092	56.43	1.054	0.511
10	5.00	5.50	5.25	-0.6544	-0.1069	2.322	1.475	35.23	1.421	0.903
11	5.50	6.00	5.75	-0.6544	-0.1069	2.429	1.582	35.23	1.528	1.010

Tabla 5-12 Parámetros básicos de análisis para la curva Relación de Vacíos – Esfuerzo Vertical Efectivo – Punto de Inspección 2.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo						
	Inicial	Final	Promedio	Cc	Cr	b_{cc}	b_{cr}	σ_p	e_o	e_r
1	0.50	1.00	0.75	-0.2956	-0.0963	1.646	1.321	42.44	1.251	0.716
2	1.00	1.50	1.25	-0.3554	-0.0421	1.590	1.041	56.53	1.054	0.493
3	1.50	2.00	1.75	-0.4783	-0.0591	1.654	1.012	33.88	1.055	0.573
4	2.00	2.50	2.25	-0.3920	-0.0545	1.442	0.894	42.20	0.911	0.431
5	2.50	3.00	2.75	-0.4053	-0.0598	1.323	0.802	32.18	0.816	0.229
6	3.00	3.50	3.25	-0.5531	-0.0618	1.661	0.983	23.99	1.020	0.547
7	3.50	4.00	3.75	-0.4474	-0.0505	1.719	1.155	26.43	1.175	0.569
8	4.00	4.50	4.25	-0.3056	-0.0624	2.153	1.786	32.55	1.718	1.156
9	4.50	5.00	4.75	-0.4617	-0.0538	2.488	1.774	56.43	1.736	1.193
10	5.00	5.50	5.25	-0.6544	-0.1069	2.628	1.781	35.23	1.727	1.209
11	5.50	6.00	5.75	-0.6544	-0.1069	2.902	2.055	35.23	2.001	1.483

Figura 5-9 Curva Relación de Vacíos - Esfuerzo Vertical Efectivo para el Punto de inspección 1.

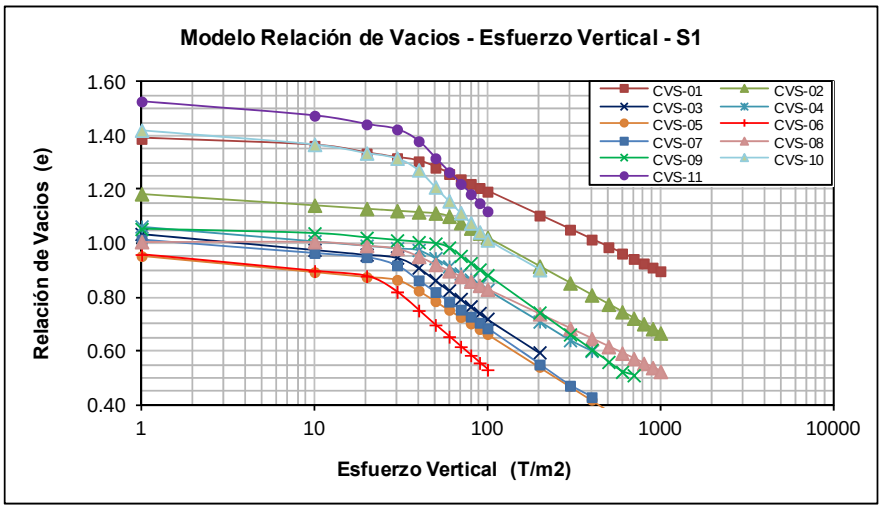
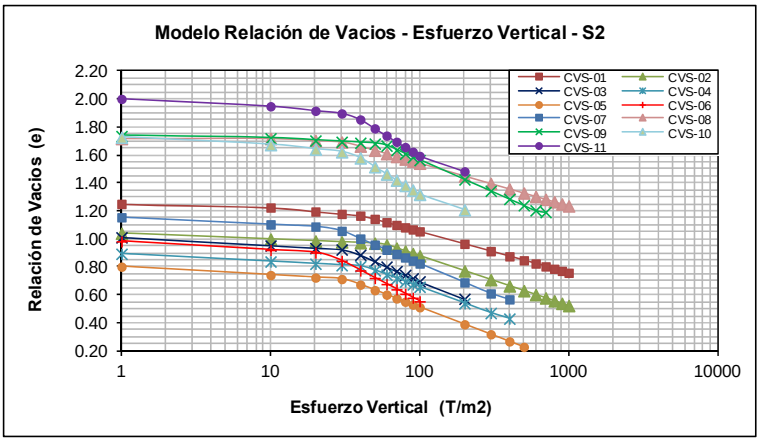


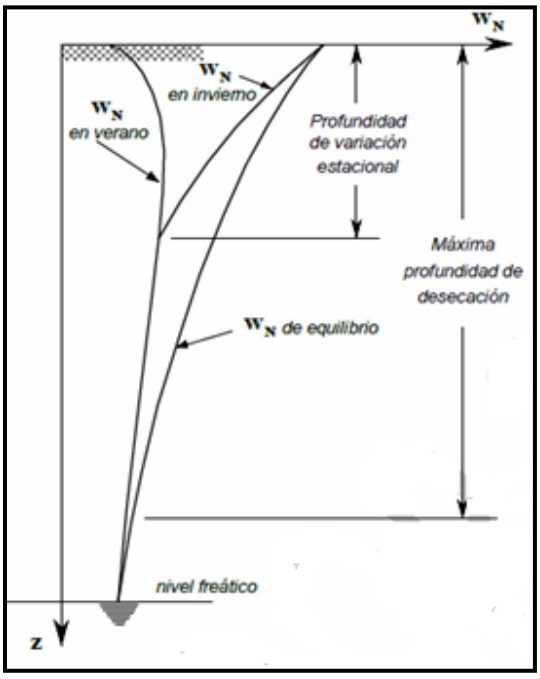
Figura 5-10 Curva Relación de Vacíos - Esfuerzo Vertical Efectivo para el Punto de inspección 2.



5.4 Identificación de la zona activa del suelo

Desde el punto de vista geotécnico, la zona activa del suelo corresponde a la máxima profundidad en donde se observan fluctuaciones estacionales en la humedaddel suelo (época de invierno y verano), que a vez conlleva a variaciones en los perfiles de succión (Us) y esfuerzo neto medio(p) con la profundidad, tal como se aprecia en la Figura 5-11

Figura 5-11 Profundidad de la zona activa y variaciones estacionales de la humedad (AIS y SCG, 2010).



A continuación se presentan las características principales de los perfiles de variación de la succión y el esfuerzo neto medio con la profundidad para el sitio de estudio, en diferentes períodos de tiempo.

5.4.1 Variación de la succión con la profundidad

Los perfiles de variación de la succión (Us) con la profundidad para los dos puntos de análisis y en diferentes épocas del año 2010 y 2011, se obtuvieron con base en los perfiles de variación de humedad natural con la profundidad y la curva de retención Humedad Natural – Succión. En la Tabla 5-13 a Tabla 5-14 y la Figura 5-12 se presentan los perfiles de variación de la succión con la profundidad para los dos puntos de análisis.

En general, para los dos puntos de análisis se observan variaciones importantes de la succión en los primeros 5.5 m de profundidad, originadas principalmente por cambios en la humedad natural del suelo, en las cuales se esperarían cambios importantes en la magnitud de las deformaciones volumétricas y verticales.

Las zonas con mayor tasa de variación de la succión en el tiempo, se localizan entre los 0.50 – 2.00 m y 3.50 – 5.50 m, con valores de succión entre los 15 y 100 T/m2. Con base en lo anterior, se puede establecer que la zona activa del suelo corresponde a los primeros 5.5 m de profundidad, en donde se presentan fluctuaciones estacionales en el contenido de humedad natural y por consiguiente en la succión del suelo.

La distribución de la succión en profundidad y con el tiempo para los dos perfiles de análisis, es errática y con unamplio rango de variación, lo cual se debe principalmente a que el perfil de suelo a nivel superficial, se encuentra sometido permanentemente a procesos de humedecimiento y secado, cuya magnitud depende del régimen hidrometeorológico y climatológico (precipitación y evaporación) del área de estudio.

Además, se puede establecer que estas variaciones en el perfil de succión con el tiempo, se deben únicamente a cambios estacionales de la humedad del suelo, ya que en el área de estudio no se observan árboles o cualquier tipo de vegetación, no se presentan variaciones en la posición del nivel freático que generen consolidación de los estratos

blandos, o se evidencia la extracción de aguas subterráneas para uso domestico o industrial, que puedan afectar la distribución de la succión en profundidad y con el tiempo.

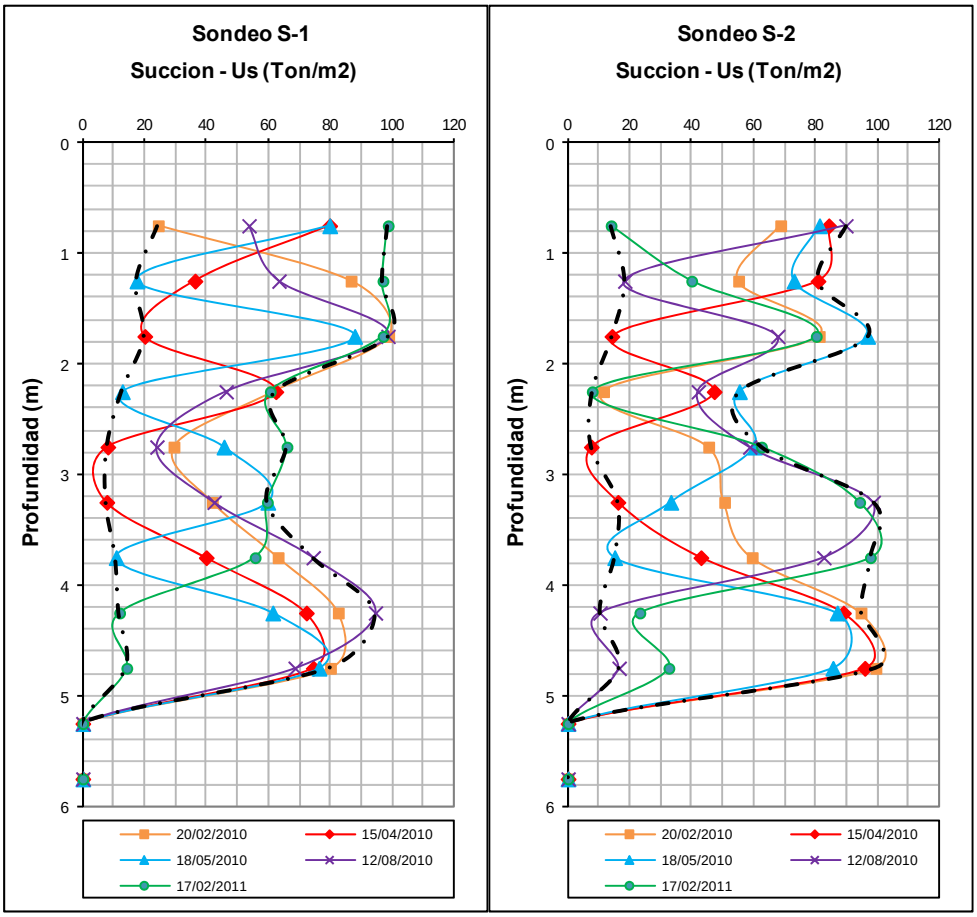
Tabla 5-13 Datos de Variación de Succión con la profundidad – Punto de Análisis 1.

Informacion Puntos de Analisis					Datos de Succion (Ton/m2)				
No.	Estrato	Profundidad			Campañas 0 - 4 (20/02/2010 - 17/02/2011)				
		Inicial	Final	Promedio	Us_0	Us_1	Us_2	Us_3	Us_4
SONDEO 1	1	0.50	1.00	0.75	24.36	79.72	79.72	53.66	98.61
	2	1.00	1.50	1.25	86.60	36.20	17.49	63.35	96.93
	3	1.50	2.00	1.75	98.80	20.02	87.79	98.55	96.97
	4	2.00	2.50	2.25	61.56	62.33	12.76	46.29	60.53
	5	2.50	3.00	2.75	29.43	8.07	45.57	23.92	65.93
	6	3.00	3.50	3.25	41.83	7.74	59.74	42.42	59.58
	7	3.50	4.00	3.75	63.05	39.85	10.76	74.42	55.65
	8	4.00	4.50	4.25	82.49	72.17	61.34	94.52	11.88
	9	4.50	5.00	4.75	79.95	74.39	76.27	68.59	14.19
	10	5.00	5.50	5.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	11	5.50	6.00	5.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 5-14 Datos de Variación de Succión con la profundidad – Punto de Análisis 2.

Informacion Puntos de Analisis					Datos de Succion (Ton/m2)				
No.	Estrato	Profundidad			Campañas 0 - 4 (20/02/2010 - 17/02/2011)				
		Inicial	Final	Promedio	Us_0	Us_1	Us_2	Us_3	Us_4
SONDEO 2	1	0.50	1.00	0.75	68.66	84.20	81.20	89.75	13.89
	2	1.00	1.50	1.25	55.07	80.73	73.00	18.33	39.93
	3	1.50	2.00	1.75	81.14	14.17	96.77	67.72	80.16
	4	2.00	2.50	2.25	11.46	47.19	55.34	42.06	7.81
	5	2.50	3.00	2.75	45.42	7.50	60.23	58.68	62.48
	6	3.00	3.50	3.25	50.56	16.11	33.19	98.58	94.18
	7	3.50	4.00	3.75	59.48	42.91	15.04	82.62	97.64
	8	4.00	4.50	4.25	94.62	88.93	86.92	10.32	23.19
	9	4.50	5.00	4.75	99.41	95.81	85.53	16.49	32.56
	10	5.00	5.50	5.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	11	5.50	6.00	5.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 5-12 Perfil de Variación de la Succión con la profundidad - Punto de análisis 1 y 2.



Por otra parte, si se comparan los valores de succión indicados en la Tabla 5-13 y Tabla 5-14, con los valores de AEV de la Curva Grado de Saturación – Succión, se puede apreciar que estos valores son menores (Us< AEV), lo cual indica que estos materiales se encuentran en condición saturada, considerando que el AEV es el punto de transición entre la zona saturada y no saturada del suelo, para los dos perfiles de análisis, a pesar de que se encuentren por encima del nivel freático (NF=-5.5 m) y en la zona activa del perfil de suelo.

5.4.2 Variación del esfuerzo neto medio con la profundidad

Los perfiles de variación del esfuerzo neto medio (p) con la profundidad para los dos puntos de análisis y en diferentes épocas del año 2010 y 2011, se obtuvieron con base

en los perfiles de variación de humedad natural con la profundidad, y las curvas de retención Humedad Natural –Succión y Saturación - Succión, cuyo procedimiento se describe a continuación:

- Se calcula el perfil de variación del peso unitario total (γ_t) con la profundidad, utilizando la siguiente relación de fase:

$$\gamma_t = \frac{Gs.\gamma_w}{1+\left(\frac{Gs.w_n}{S}\right)}.[1+w_n] \textbf{(5.1)}$$

Donde:

G_s	:	Gravedad Específica de sólidos
γ_w	:	Peso Unitario del agua (1 T/m^3)
w_n	:	Humedad Natural en función de la succión f(Us)
S		Grado de Saturación en función de la succión f(Us)

- Se calcula el perfil de variación del esfuerzo vertical (σ_v) con la profundidad, utilizando los valores del perfil de variación de peso unitario total (γ_t) calculado en el paso anterior.

- Para un suelo con comportamiento elástico ($\sigma_v \leq \sigma_p$), se calcula el perfil de variación del esfuerzo neto medio (p) con la profundidad, utilizando los valores del perfil de variación del esfuerzo vertical (σ_v) calculado en el paso anterior, y considerando una condición unidimensional de deformaciones (que es el caso de la subsidencia, que se caracteriza por un descenso del nivel del terreno en un área relativamente extensa o infinita lateralmente), mediante las siguientes expresiones (Alonso et al, 1990 y, Lu y Likos, 2004):

$p = \sigma_m - \mu_a$ (Para Us>AEV) **(5.2)**

$p = \sigma_m - \mu_w$ (Para Us≤ AEV) **(5.3)**

$$\sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = \frac{(1+\nu)}{3.(1-\nu)}.\sigma_z \quad \textbf{(5.4)}$$

Donde:

σ_n	:	Esfuerzo total en la dirección x, y, z
μ_a	:	Presión de poros del aire (Para efectos de análisis, se tomo igual a cero. Ver Lu y Likos, 2004).
μ_w	:	Presión de poros del agua.
ν	:	Módulo de Poisson (Se tomó 0.4 para arcillas)

- Para un suelo con comportamiento elástico - plástico ($\sigma_v > \sigma_p$), se calcula el perfil de variación del esfuerzo neto medio (p) con la profundidad, utilizando los valores del perfil de variación del esfuerzo vertical (σ_v) calculado en el paso anterior, y considerando una relación entre los coeficientes de consolidación unidimensional (Cc y Cr) y los coeficientes de compresión isotrópica (λ y κ), de acuerdo con la teoría del estado crítico (Atkinson y Bransby, 1982).

En la Tabla 5-15 a Tabla 5-16 y la Figura 5-13 se presentan los perfiles de variación del esfuerzo neto medio (p) con la profundidad para los dos puntos de análisis.

Al observar la figura anterior, se puede apreciar que no existe una variación importante del esfuerzo neto medio con el tiempo para los dos perfiles de análisis, debido principalmente a que los materiales se encuentran en una condición saturada, ya que los valores de succión registrados son menores al AEV (punto de transición entre la zona saturada y no saturada del suelo), y que no están sometidos a cargas externas que generen incrementos de esfuerzos importantes en el perfil de suelo.

Por lo tanto, no se esperan cambios importantes en la magnitud de las deformaciones volumétricas y desplazamientos verticales, que estén relacionadas con variaciones del esfuerzo neto medio en el tiempo, como se muestra en el numeral 5.7.

En conclusión, para que se generen cambios importantes en la magnitud de las deformaciones, por efecto de la variación del esfuerzoneto medio (p) en el tiempo, es necesario que se supere el valor de AEV (lo cual ocurre en una condición de secado rápido y prolongado del suelo), cuya condición es probable que ocurra en un periodo de verano extenso.

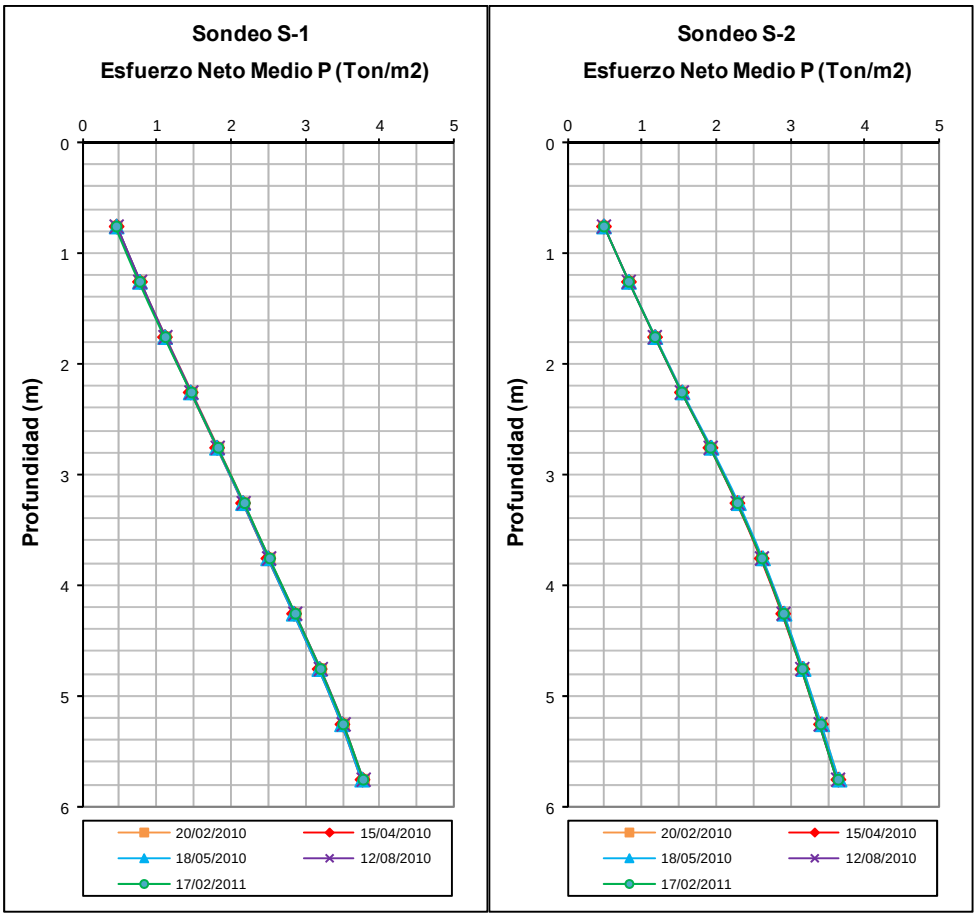
Tabla 5-15 Datos de Variación del Esfuerzo Neto Medio con la profundidad – Punto de Análisis 1.

Informacion Puntos de Analisis					Datos de Esfuerzo Neto Medio (Ton/m2)				
No.	Estrato	Profundidad			Campañas 0 - 4 (20/02/2010 - 17/02/2011)				
		Inicial	Final	Promedio	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4
SONDEO 1	1	0.50	1.00	0.75	0.449	0.448	0.448	0.449	0.447
	2	1.00	1.50	1.25	0.765	0.761	0.761	0.763	0.763
	3	1.50	2.00	1.75	1.108	1.098	1.100	1.105	1.106
	4	2.00	2.50	2.25	1.459	1.444	1.445	1.454	1.456
	5	2.50	3.00	2.75	1.815	1.800	1.798	1.808	1.817
	6	3.00	3.50	3.25	2.165	2.149	2.149	2.157	2.170
	7	3.50	4.00	3.75	2.506	2.489	2.487	2.499	2.510
	8	4.00	4.50	4.25	2.855	2.835	2.832	2.850	2.855
	9	4.50	5.00	4.75	3.201	3.179	3.175	3.196	3.193
	10	5.00	5.50	5.25	3.508	3.486	3.482	3.502	3.497
	11	5.50	6.00	5.75	3.778	3.757	3.753	3.773	3.768

Tabla 5-16 Datos de Variación del Esfuerzo Neto Medio con la profundidad – Punto de Análisis 2.

Informacion Puntos de Analisis					Datos de Esfuerzo Neto Medio (Ton/m2)				
No.	Estrato	Profundidad			Campañas 0 - 4 (20/02/2010 - 17/02/2011)				
		Inicial	Final	Promedio	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4
SONDEO 2	1	0.50	1.00	0.75	0.476	0.476	0.476	0.476	0.477
	2	1.00	1.50	1.25	0.812	0.813	0.812	0.810	0.812
	3	1.50	2.00	1.75	1.165	1.164	1.168	1.161	1.164
	4	2.00	2.50	2.25	1.526	1.526	1.535	1.524	1.526
	5	2.50	3.00	2.75	1.910	1.910	1.924	1.912	1.911
	6	3.00	3.50	3.25	2.275	2.272	2.292	2.276	2.276
	7	3.50	4.00	3.75	2.602	2.599	2.617	2.602	2.604
	8	4.00	4.50	4.25	2.894	2.889	2.906	2.893	2.897
	9	4.50	5.00	4.75	3.152	3.147	3.163	3.145	3.149
	10	5.00	5.50	5.25	3.403	3.397	3.413	3.392	3.397
	11	5.50	6.00	5.75	3.637	3.631	3.647	3.626	3.631

Figura 55-13 Perfil de Variación del Esfuerzo Neto Medio con la profundidad - Punto de análisis 1 y 2.



5.5 Formulación del modelo utilizado para el cálculo de deformaciones superficiales por cambios de succión

Para el análisis de deformaciones superficiales por cambios de humedad, se utilizó el Modelo Básico de Barcelona (BBM) desarrollado por Alonso et al (1990), con las siguientes condiciones:

- Estado de esfuerzos isotrópico.

- Deformaciones debidas a cambios en la succión (Us) y el esfuerzo neto medio (p), tanto en procesos de humedecimiento como de secado. Aumentos en la succión (procesos de secado) pueden provocar deformacionesvolumétricas irreversibles (plásticas).

- No se tienen en cuenta los procesos de histéresis que puede sufrir el suelo durante los procesos de humedecimiento-secado y viceversa, ya que se está trabajando con curvas de retención de un solo ciclo.

Este modelo considera dos variables independientes, el esfuerzo neto medio (p) y la succión (Us), las cuales permiten describir el estado de esfuerzos y deformaciones de un suelo parcialmente saturado. A continuación se presenta una descripción de los modelos de compresibilidad utilizados en el análisis de deformaciones superficiales (basados en las dos variables independientes de esfuerzos), para los dos puntos de análisis.

5.5.1 Modelo Volumen Específico – Succión

Para la generación del Modelo Volumen Específico (ν) – Succión (Us), se utilizó la curva de compresibilidad Relación de Vacíos (e) – Succión (Us), que de acuerdo al modelo BBM se puede ajustar a la siguiente expresión:

$$v = 1 + e = \kappa_s . Ln(u_s + 0.1) + n \quad \text{(Para Us} \leq \text{Uo)} \quad \textbf{(5.5)}$$

$$v = 1 + e = \lambda_s . Ln(u_s + 0.1) + m \quad \text{(Para Us} > \text{Uo)} \quad \textbf{(5.6)}$$

Donde:

K_s	:	Parámetro de rigidez elástico para cambios de succión
λ_s	:	Parámetro de rigidez plástico para cambios de succión
n, m	:	Constantes del modelo

En la Tabla 5-17 a Tablas 5-18 y la Figura 5-14 a Figura 5-15, se presentan los parámetros básicos y las curvas de variación del volumen específico con la succión, para los dos puntos de análisis.

Tabla 5-17 Parámetros básicos para la curva Volumen Específico – Succión – Punto de Análisis 1.

Curva v-Us	Profundidad			Parametros Modelo						
	Inicial	Final	Promedio	λ_s	k_s	n	m	U_o	U_r	$v_{saturado}$
1	0.50	1.00	0.75	-0.1480	-0.0139	3.016	2.421	84.82	673.00	2.389
2	1.00	1.50	1.25	-0.1804	-0.0100	2.963	2.221	77.64	398.01	2.198
3	1.50	2.00	1.75	-0.1667	-0.0112	2.774	2.104	74.26	332.20	2.079
4	2.00	2.50	2.25	-0.1676	-0.0102	2.703	2.101	45.91	322.71	2.081
5	2.50	3.00	2.75	-0.1713	-0.0116	2.589	1.991	42.41	248.98	1.968
6	3.00	3.50	3.25	-0.1163	-0.0073	2.429	2.011	46.33	395.20	1.997
7	3.50	4.00	3.75	-0.1995	-0.0123	2.855	2.063	68.86	424.33	2.036
8	4.00	4.50	4.25	-0.1747	-0.0131	2.737	2.036	76.64	687.32	2.007
9	4.50	5.00	4.75	-0.1809	-0.0174	2.809	2.093	79.66	719.48	2.054
10	5.00	5.50	5.25	-0.2114	-0.0206	3.339	2.468	95.97	778.93	2.421
11	5.50	6.00	5.75	-0.2114	-0.0206	3.446	2.575	95.97	778.93	2.528

Tabla 5-18 Parámetros básicos para la curva Volumen Específico – Succión – Punto de Análisis 2.

Curva v-Us	Profundidad			Parametros Modelo						
	Inicial	Final	Promedio	λ_s	k_s	n	m	U_o	U_r	$v_{saturado}$
1	0.50	1.00	0.75	-0.1480	-0.0139	2.878	2.283	84.82	673.00	2.251
2	1.00	1.50	1.25	-0.1804	-0.0100	2.819	2.078	77.64	398.01	2.054
3	1.50	2.00	1.75	-0.1667	-0.0112	2.750	2.081	74.26	332.20	2.055
4	2.00	2.50	2.25	-0.1676	-0.0102	2.533	1.931	45.91	322.71	1.911
5	2.50	3.00	2.75	-0.1713	-0.0116	2.438	1.840	42.41	248.98	1.816
6	3.00	3.50	3.25	-0.1163	-0.0073	2.453	2.035	46.33	395.20	2.020
7	3.50	4.00	3.75	-0.1995	-0.0123	2.994	2.202	68.86	424.33	2.175
8	4.00	4.50	4.25	-0.1747	-0.0131	3.448	2.747	76.64	687.32	2.718
9	4.50	5.00	4.75	-0.1809	-0.0174	3.491	2.775	79.66	719.48	2.736
10	5.00	5.50	5.25	-0.2114	-0.0206	3.645	2.774	95.97	778.93	2.727
11	5.50	6.00	5.75	-0.2114	-0.0206	3.919	3.049	95.97	778.93	3.001

Figura 5-14 Curva Volumen Específico - Succión para el Punto de análisis 1.

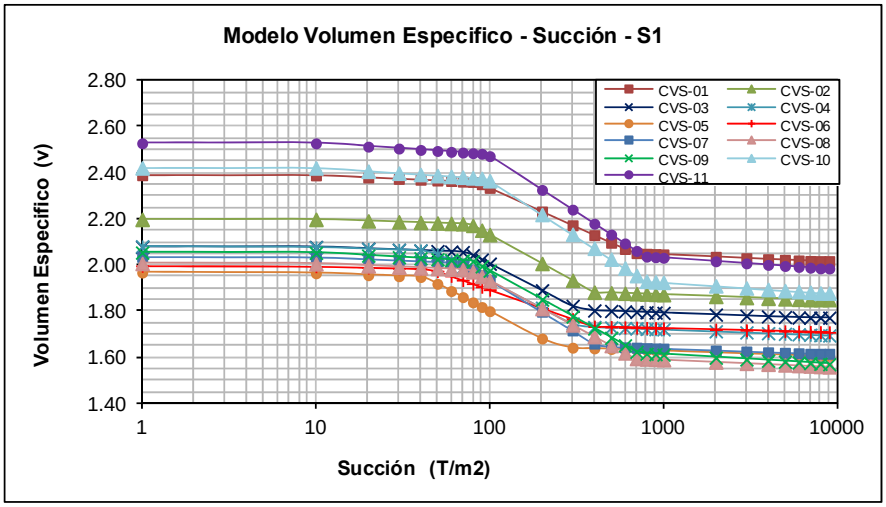
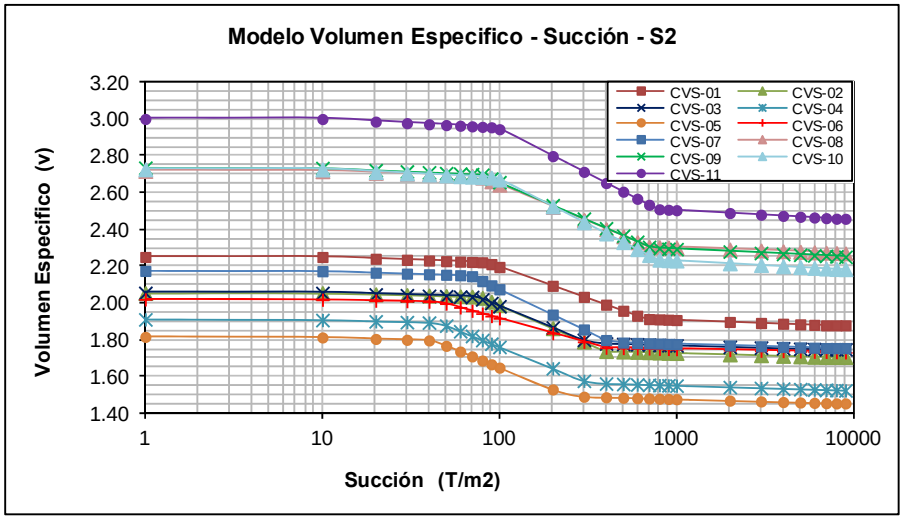


Figura 5-15 Curva Volumen Específico - Succión para el Punto de análisis 2.



En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan las tablas de cálculo del ajuste de las curvas de compresibilidad al modelo Volumen Específico – Succión (BBM).

5.5.2 Modelo Volumen Específico – Esfuerzo Neto Medio

Para la generación del Modelo Volumen Específico (ν) – Esfuerzo Neto Medio (p), se utilizó la curva de compresibilidad Relación de Vacíos (e) – Esfuerzo Vertical Efectivo ($\sigma'v$), que de acuerdo al modelo BBM se puede ajustar a la siguiente expresión, para el comportamiento de un suelo saturado (S=100% y Us=0).

$$v = 1 + e = \kappa . Ln\left(\frac{p}{p^c}\right) + M_{(0)} \quad \text{(Para } p \le p_o^*\text{)} \quad \textbf{(5.7)}$$

$$v = 1 + e = \lambda_{(0)} . Ln\left(\frac{p}{p^c}\right) + N_{(0)} \quad \text{(Para } p > p_o^*\text{)} \quad \textbf{(5.8)}$$

Donde:

k	:	Parámetro de rigidez elástico para cambios de esfuerzo p
$\lambda_{(0)}$	:	Parámetro de rigidez plástico para cambios de esfuerzo p
p_o^*	:	Esfuerzo neto medio de preconsolidación
p^c		Esfuerzo neto medio de referencia (igual a 0.1 T/m2).

N, M : Constantes del modelo

El esfuerzo neto medio (p) se puede calcular a partir del esfuerzo vertical efectivo (σ_v), utilizando las expresiones descritas en el numeral 7.4.2 de este informe.

En la Tabla 5-19 a Tabla 5-20 y la Figura 5-16 a Figura 5-17, se presentan los parámetros básicos y las curvas de variación del volumen específico con el esfuerzo neto medio, para los dos puntos de análisis.

En el Anexo D, se presentan las tablas de cálculo del ajuste de las curvas de compresibilidad al modelo Volumen Específico – Esfuerzo Neto Medio (BBM).

Tabla 5-19 Parámetros básicos para la curva Volumen Específico – Esfuerzo Neto Medio – Punto de Análisis 1.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo						
	Inicial	Final	Promedio	λ(0)	k	n(0)	m	P_o	v_o	v_r
1	0.50	1.00	0.75	-0.1284	-0.0418	3.048	2.546	33.01	2.389	1.855
2	1.00	1.50	1.25	-0.1544	-0.0183	3.050	2.222	43.97	2.198	1.637
3	1.50	2.00	1.75	-0.2077	-0.0257	3.103	2.089	26.35	2.079	1.596
4	2.00	2.50	2.25	-0.1702	-0.0237	2.961	2.112	32.82	2.081	1.601
5	2.50	3.00	2.75	-0.1760	-0.0260	2.836	2.007	25.03	1.968	1.381
6	3.00	3.50	3.25	-0.2402	-0.0268	3.130	2.015	18.66	1.997	1.524
7	3.50	4.00	3.75	-0.1943	-0.0219	2.979	2.061	20.56	2.036	1.429
8	4.00	4.50	4.25	-0.1327	-0.0271	2.714	2.130	25.32	2.007	1.444
9	4.50	5.00	4.75	-0.2005	-0.0234	3.218	2.140	43.89	2.054	1.511
10	5.00	5.50	5.25	-0.2842	-0.0464	3.905	2.571	27.40	2.421	1.903
11	5.50	6.00	5.75	-0.2842	-0.0464	4.012	2.677	27.40	2.528	2.010

Tabla 5-20 Parámetros básicos para la curva Volumen Específico – Esfuerzo Neto Medio – Punto de Análisis 2.

Curva Modelo	Profundidad			Parametros Modelo						
	Inicial	Final	Promedio	λ(0)	k	n(0)	m	P_o	v_o	v_r
1	0.50	1.00	0.75	-0.1284	-0.0418	2.909	2.407	33.01	2.251	1.716
2	1.00	1.50	1.25	-0.1544	-0.0183	2.907	2.079	43.97	2.054	1.493
3	1.50	2.00	1.75	-0.2077	-0.0257	3.080	2.065	26.35	2.055	1.573
4	2.00	2.50	2.25	-0.1702	-0.0237	2.791	1.942	32.82	1.911	1.431
5	2.50	3.00	2.75	-0.1760	-0.0260	2.684	1.856	25.03	1.816	1.229
6	3.00	3.50	3.25	-0.2402	-0.0268	3.154	2.038	18.66	2.020	1.547
7	3.50	4.00	3.75	-0.1943	-0.0219	3.118	2.200	20.56	2.175	1.569
8	4.00	4.50	4.25	-0.1327	-0.0271	3.426	2.841	25.32	2.718	2.156
9	4.50	5.00	4.75	-0.2005	-0.0234	3.899	2.822	43.89	2.736	2.193
10	5.00	5.50	5.25	-0.2842	-0.0464	4.211	2.877	27.40	2.727	2.209
11	5.50	6.00	5.75	-0.2842	-0.0464	4.485	3.151	27.40	3.001	2.483

Figura 5-16 Curva Volumen Específico - Esfuerzo Neto Medio para el Punto de análisis 1.

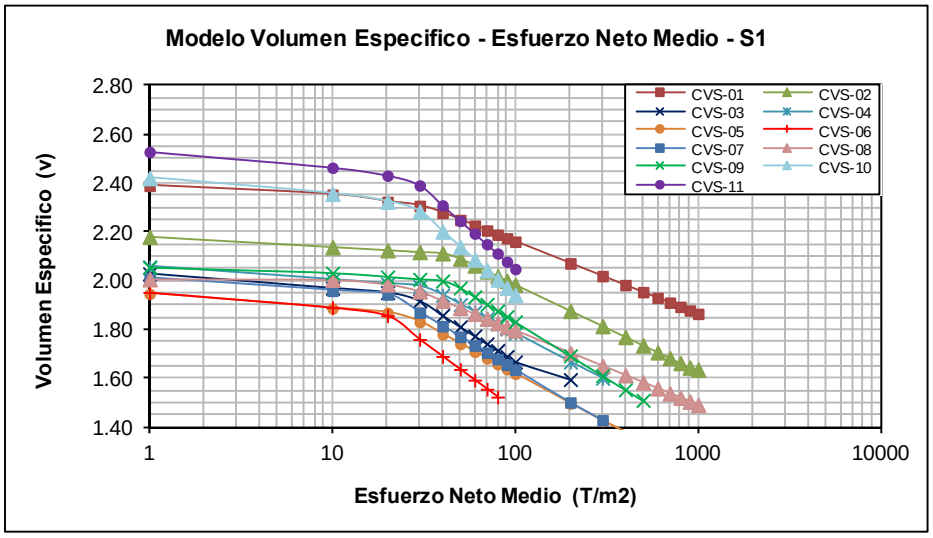
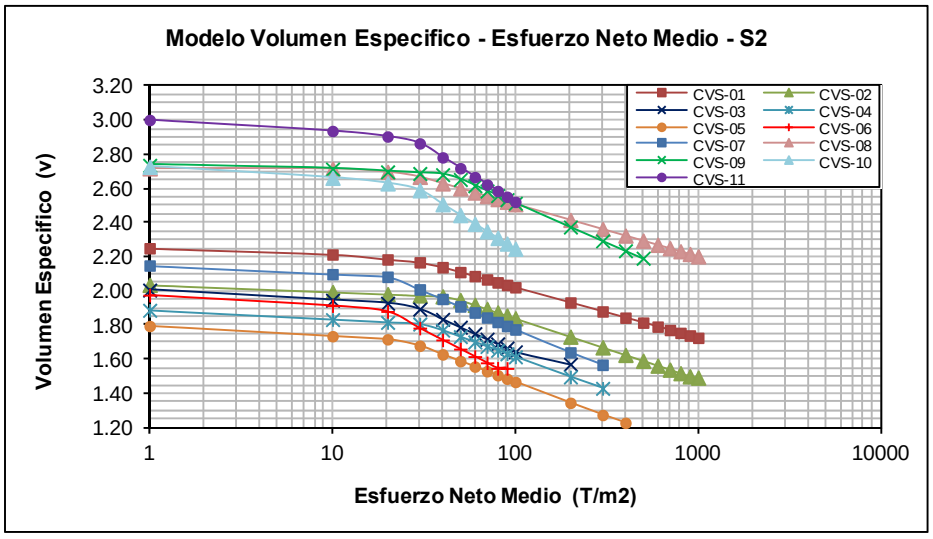


Figura 5-17 Curva Volumen Específico - Esfuerzo Neto Medio para el Punto de análisis 2.



De acuerdo con el modelo BBM (Alonso et al, 1990), un cambio en la succión (condición de humedecimiento o secado) puede generar un cambio en el estado de esfuerzos del suelo. Esto se traduce en el incremento de la rigidez plástica del suelo($\lambda_{(0)}$) con la succión (proceso de secado), mientras en procesos de descarga – recarga no se presenta

variación de la rigidez elástica del suelo (k) con la succión (proceso de humedecimiento).Como consecuencia, se presenta un incremento en la magnitud del esfuerzo neto medio de preconsolidación (p_o) con la succión.

Lasexpresiones que describen el cambio del parámetro de rigidez plástica (λ_s)y el esfuerzo neto medio de preconsolidación (p_o) del suelo con la succión, tienen la siguiente forma:

$$\lambda_s = \lambda_{(0)}.\left[(1-r).e^{(-\beta.Us)} + r\right] \textbf{(5.9)}$$

$$r = \frac{\lambda(Us \to \infty)}{\lambda_{(0)}} \textbf{(5.10)}$$

$$\frac{p_0}{p^c} = \left(\frac{p_0^*}{p^c}\right)^{\frac{\lambda_{(0)}-k}{\lambda_s-k}} \textbf{(5.11)}$$

Donde:

k	:	Parámetro de rigidez elástico para cambios de esfuerzo p
λ_s	:	Parámetro de rigidez plástico para cambios de esfuerzo p en función de la succión.
p_o^*	:	Esfuerzo neto medio de preconsolidación para Us=0.
p^c		Esfuerzo neto medio de referencia (igual a 0.1 T/m^2).
r	:	Parámetro de rigidez máxima del suelo (igual a 0.75).
β	:	Parámetro que controla la tasa de incremento de la rigidez del suelo con la succión (igual a [1250 T/m^2]$^{-1}$).

Con lo anterior, se puede establecer un modelo general de Volumen Específico (ν) – Esfuerzo Neto Medio (p) en función de la Succión (Us), cuya expresión se presenta a continuación:

$$\nu = 1 + e = \kappa.Ln\left(\frac{p}{p^c}\right) + M_{(s)} \text{ (Para } p \le p_o\text{)} \textbf{(5.12)}$$

$$\nu = 1 + e = \lambda_s.Ln\left(\frac{p}{p^c}\right) + N_{(s)} \text{ (Para } p > p_o\text{)} \textbf{(5.13)}$$

Donde:

k	:	Parámetro de rigidez elástico para cambios de esfuerzo p
$\lambda_{(s)}$	:	Parámetro de rigidez plástico para cambios de esfuerzo p, en función de la succión.
p_o	:	Esfuerzo neto medio de preconsolidación en función de la succión.
p^c		Esfuerzo neto medio de referencia (igual a 0.1 T/m2).
N, M	:	Constantes en función de la succión.

5.5.3 Integración de la Succión y el Esfuerzo Neto Medio para el cálculo de deformaciones

De acuerdo con el modelo BBM (Alonso et al, 1990), las deformaciones volumétricas en el suelo (ε_v) se deben principalmente a cambios del volumen específico (ν) por efecto de la succión (Us) y el esfuerzo neto medio (p), los cuales no se presentan simultáneamente, sino que uno es consecuencia del otro; es decir, un cambio en la succión genera un cambio en el estado de esfuerzos del suelo. Lo anterior se puede representar por medio de la siguiente expresión:

$$\varepsilon_v = -\frac{dv}{v_o} = \frac{dv_{us} + dv_p}{v_o} \quad \textbf{(5.14)}$$

Donde:

ν_o	:	Volumen Específico inicial del suelo.
$d\nu_{us}$	:	Cambio del Volumen Específico debido a la succión.
$d\nu_p$	:	Cambio del Volumen Específico debido al esfuerzo neto medio.

Los cambios de volumen específico debidos a la succión (Us) y el esfuerzo neto medio (p), se calcularon a partir de las expresiones descritas en el numeral 7.5.1 y 7.5.2 de este informe.

5.6 Escenarios de análisis

En la evaluación de deformaciones superficiales por cambios de humedad (Succión y Esfuerzo Neto Medio), se consideraron dos escenarios de análisis:

- Escenario Normal – Suelo Saturado.
- Escenario Extremo – Extrema Sequía Suelo Parcialmente Saturado.

A continuación se presenta una descripción de cada uno de los escenarios de análisis utilizados en la evaluación de las deformaciones superficiales.

5.6.1 Escenario Normal – Suelo Saturado

El escenario normal corresponde a la condición actual del perfil de humedad natural (Wn) del suelo con la profundidad, el cual fue determinado a partir de las cuatro (4) campañas de exploración geotécnica realizadas en los dos puntos de análisis, para diferentes épocas del año 2010 y 2011. Con base en las curvas de retención de humedad (Humedad Natural – Succión y Saturación – Succión), se generaron los perfiles de succión (Us) y esfuerzo neto medio (p) del suelo con la profundidad, los cuales se presentan en la Figura 5-12 y Figura 5-13

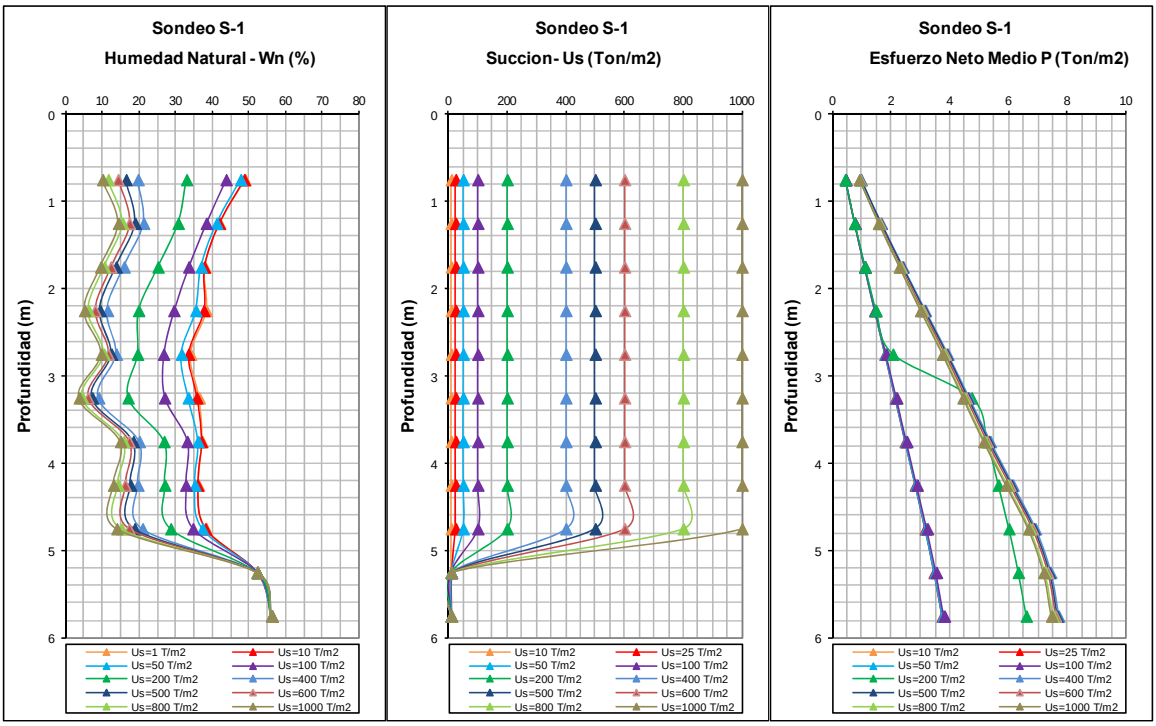
5.6.2 Escenario Extremo – Extrema Sequía Suelo Parcialmente Saturado

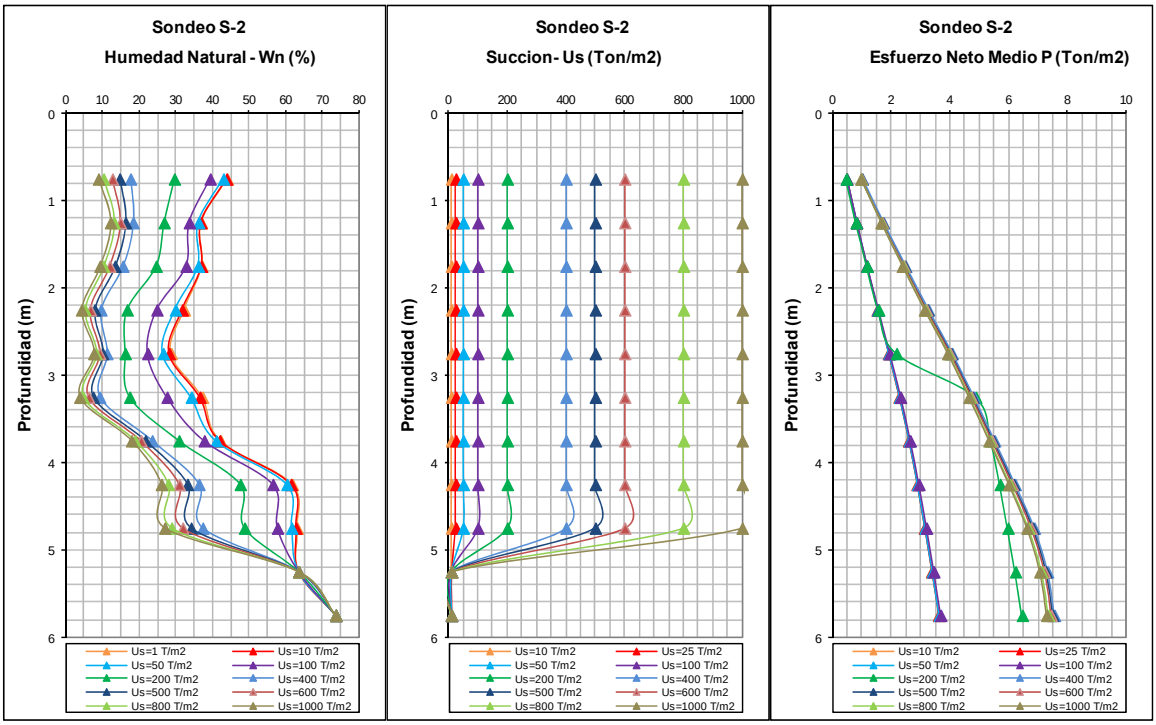
De acuerdo con el numeral 7.4.1 de este informe, al comparar los valores de succión (Us) de los dos perfiles de análisis, con los valores de AEV (Succión de entrada de aire) de la Curva Grado de Saturación – Succión, se puede apreciar que estos valores son menores (Us< AEV); lo cual indica que estos materiales se encuentran en condición saturada, considerando que el AEV es el punto de transición entre la zona saturada y no saturada del suelo, a pesar de que se encuentren por encima del nivel freático (NF=-5.5 m).

Con el fin de establecer la variación de las deformaciones superficiales con la succión en la zona no saturada (Us> AEV), se consideró un escenario extremo de análisis, que consiste en generar un proceso de extrema sequía en el suelo, comenzando de una condición saturada (Us=10 T/m2) hasta alcanzar una succión cercana a 1000 T/m2.

En la Figura 5-18 se presentan los diferentes perfiles de variación de la succión (Us) con la profundidad para los dos puntos de análisis (en condición crítica), y su incidencia en el comportamiento de la humedad natural (Wn) y el esfuerzo neto medio (p) del suelo.

Figura 5-18 Perfil de Variación de la succión con la profundidad para la condición extrema y su incidencia en la humedad natural y el esfuerzo neto medio del suelo - Punto de análisis 1 y 2.





5.7 Resultados obtenidos en el cálculo de deformaciones

Para el cálculo de las deformaciones superficiales (volumétricas y verticales) debidas a cambios de succión (ΔUs) y esfuerzo neto medio (Δp), se empleó un modelo de cálculo en Excel, que contiene la formulación numérica del Modelo Básico de Barcelona (BBM) para un estado de esfuerzos isotrópicos, en donde a partir del perfil de variación de succión (Us) y esfuerzo volumétrico (p') con la profundidad, se puede obtener el perfil de variación de la deformación volumétrica y desplazamiento vertical con la profundidad, tomando una condición inicial como punto de referencia.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de deformación volumétrica y desplazamiento vertical para los dos escenarios de análisis, en los puntos de análisis definidos anteriormente para el área de estudio.

5.7.1 Escenario Normal – Suelo Saturado

En la Figura 5-19 y 5-20,se presentan los valores de deformación volumétrica y desplazamiento vertical obtenidos en los dos puntos de análisis, para una condición actual de variación de la humedad natural con la profundidad (Escenario Normal).

Figura 5-19 Variación de la deformación con la profundidad (Condición Normal) - Punto de análisis 1.

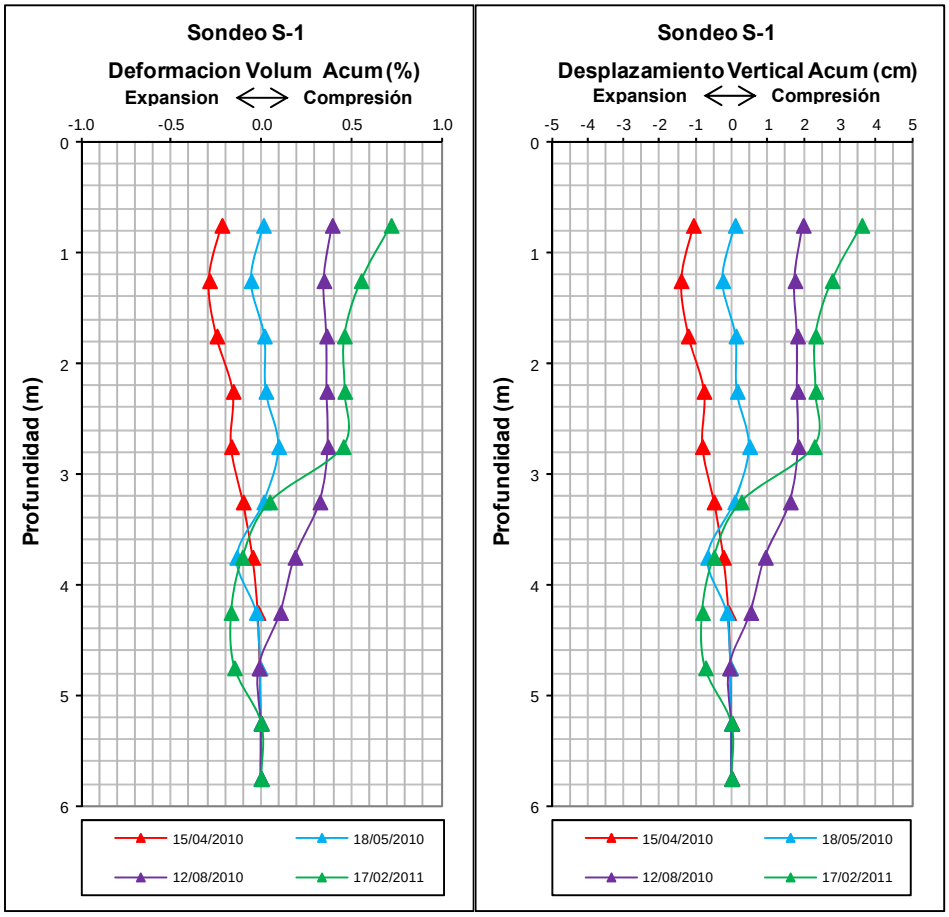
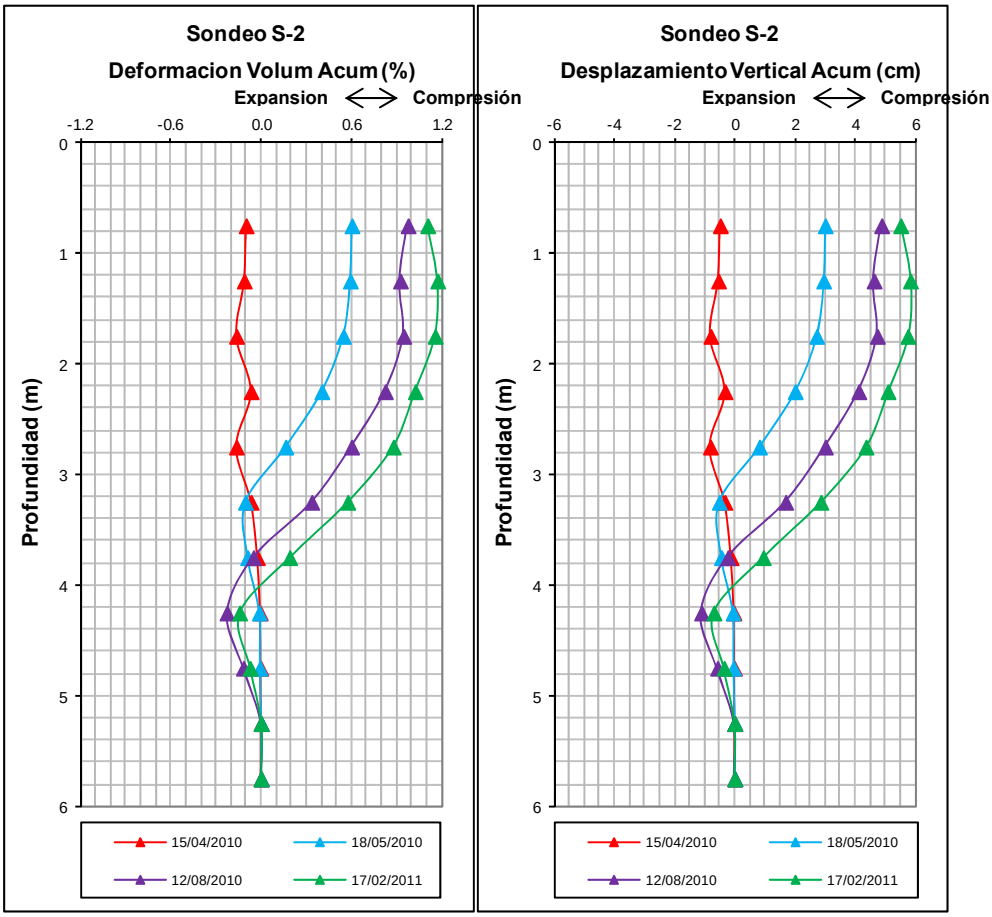


Figura 5-20 Variación de la deformación con la profundidad (Condición Normal) - Punto de análisis 2.



En la Figura 5.21 y Figura 5-22 se presenta la variación de la deformación volumétrica y vertical acumulada con el tiempo(a nivel superficial), para los dos puntos de análisis.

Al observar estas figuras, se puede apreciar que en los dos puntos de análisis definidos en el área de estudio, inicialmente ocurre una etapa de expansión del suelo con un valor máximo de deformación volumétrica y desplazamiento vertical acumulado en superficie de 0.2% y 1 cm, respectivamente, para un periodo de tiempo de 2 meses. Después, el suelo comienza a sufrir un proceso de compresión continua en el tiempo, que genera un valor máximo de deformación volumétrica y desplazamiento vertical acumulado en superficie de 1.1% y 5.5 cm, respectivamente.

Si se analiza la variación de la deformación volumétrica y desplazamiento vertical en profundidad para los dos puntos de análisis, se puede apreciar una zona de expansión en el perfil de suelo entre los 4.0 y 4.5 m de profundidad, en donde se presenta una disminución de los valores de succión (Us) con el tiempo, de acuerdo con la curva de variación de la succión con la profundidad mostrada en la Figura 5-12

Figura 5-12. En las demás zonas mostradas en esta figura, se presenta un aumento de los valores de succión con el tiempo, lo cual genera un proceso de compresión en el suelo, que se refleja en hundimientos del terreno a nivel superficial.

Figura 5-1 Variación de la deformación volumétrica acumulada (a nivel superficial) con el tiempo - Punto de análisis 1 y 2.

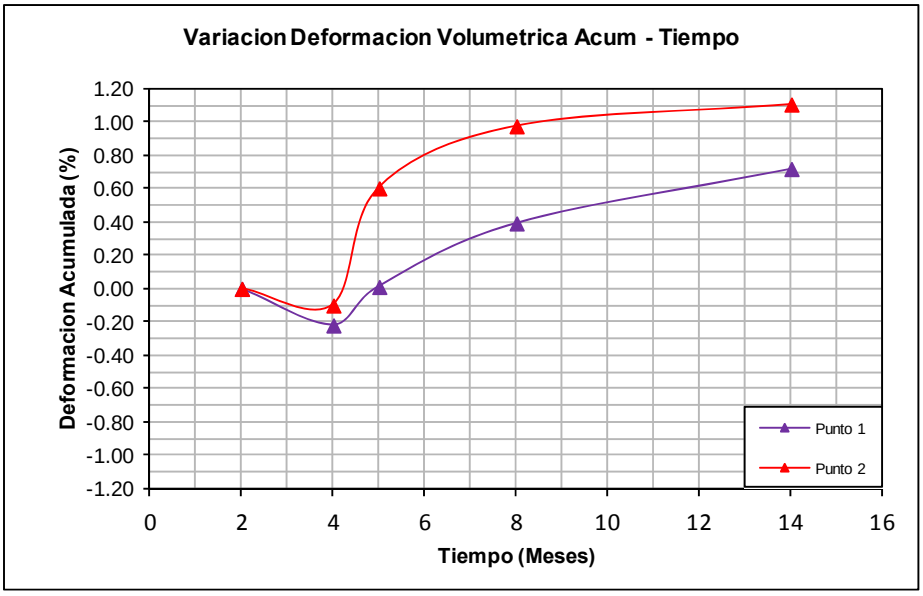
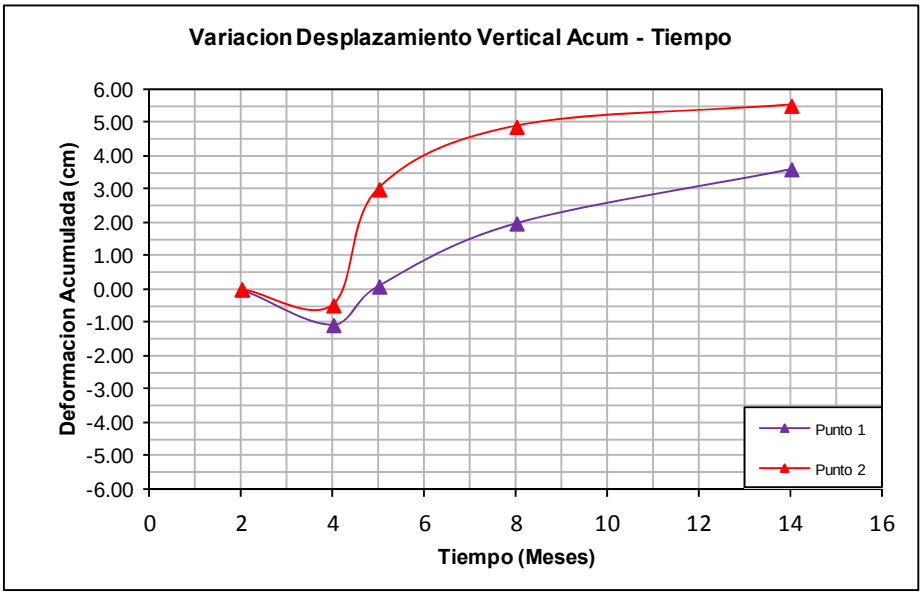


Figura 5-22 Variación del desplazamiento vertical acumulado (a nivel superficial) con el tiempo - Punto de análisis 1 y 2.



5.7.2 Escenario Extremo – Extrema Sequía Suelo Parcialmente Saturado

En la Figura y Figura se presentan los valores de deformación volumétrica y vertical obtenidos en los dos puntos de análisis, para una condición extrema de variación de la humedad natural con la profundidad, que genera sequia en el suelo (Escenario Extremo).

En la figura 5-25 y 5-26, se presenta la variación de la deformación volumétrica y vertical acumulada con la succión (a nivel superficial), para los dos puntos de análisis.

Al observar estas figuras, se puede apreciar que en los dos puntos de análisis definidos en el área de estudio, en todo momento ocurre una etapa de compresión del suelo con un valor máximo de deformación volumétrica y vertical acumulada en superficie de 17.5% y 80 cm, respectivamente, para un intervalo de succión entre 10 y 1000 T/m2.

Si se analiza la variación de la deformación volumétrica y vertical con la succión para los dos puntos de análisis, se puede apreciar que la máxima tasa de variación de la

deformación se presenta en un rango de succión comprendido entre 50 y 400 T/m2, que corresponde a la zona elasto-plastica del suelo.

Para el rango de succión menor a 50 T/m2 y mayor a 400 T/m2, se presenta una zona de transición en donde la tasa de variación de la deformación con la succión es mínima, y el comportamiento del suelo es elástico y residual. Lo anterior es consistente con el comportamiento de la curva de compresibilidad Relación de Vacíos – Succión, en donde se presentan tres zonas de comportamiento característico del suelo (Elástica, Elasto-plastico y Residual).

Figura 5-23 Variación de la deformación con la profundidad (Condición Extrema) - Punto de análisis 1.

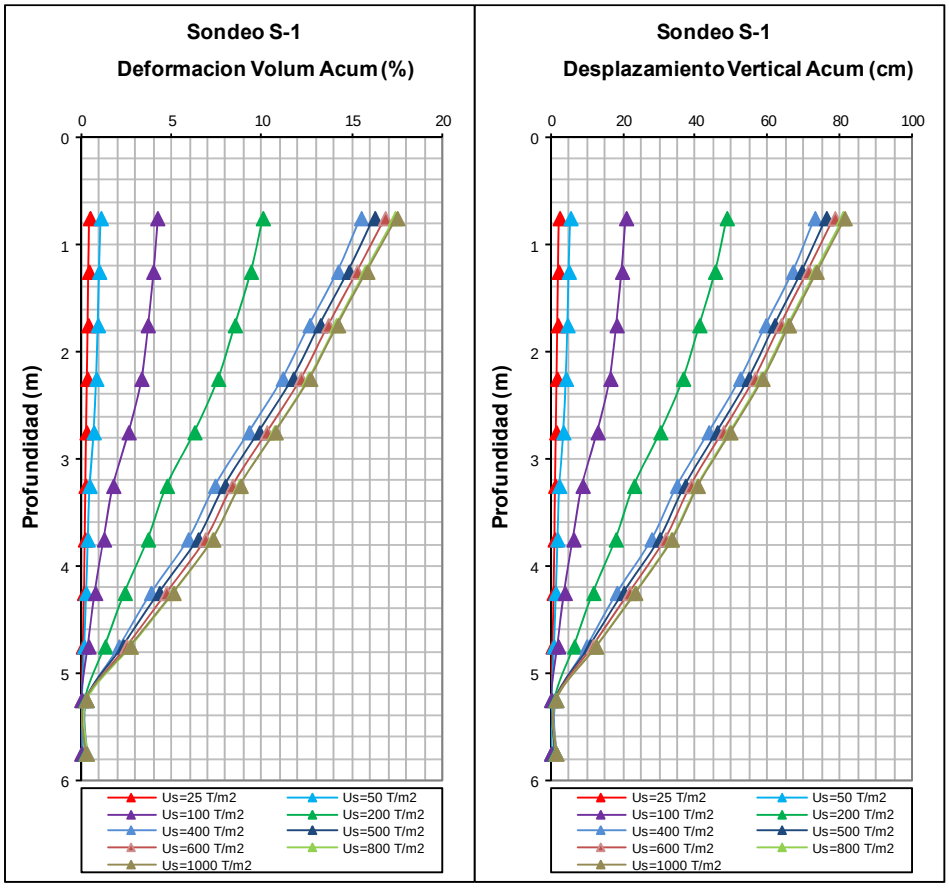


Figura 5-24 Variación de la deformación con la profundidad (Condición Extrema) - Punto de análisis 2.

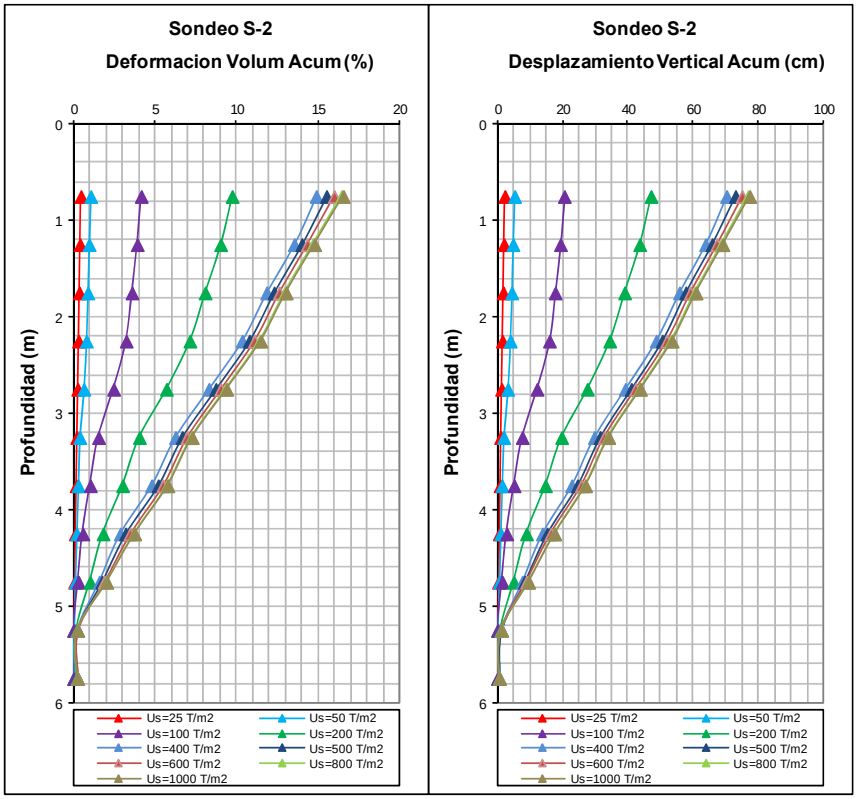


Figura 5-25 Variación de la deformación volumétrica acumulada (a nivel superficial) con la succión - Punto de análisis 1 y 2.

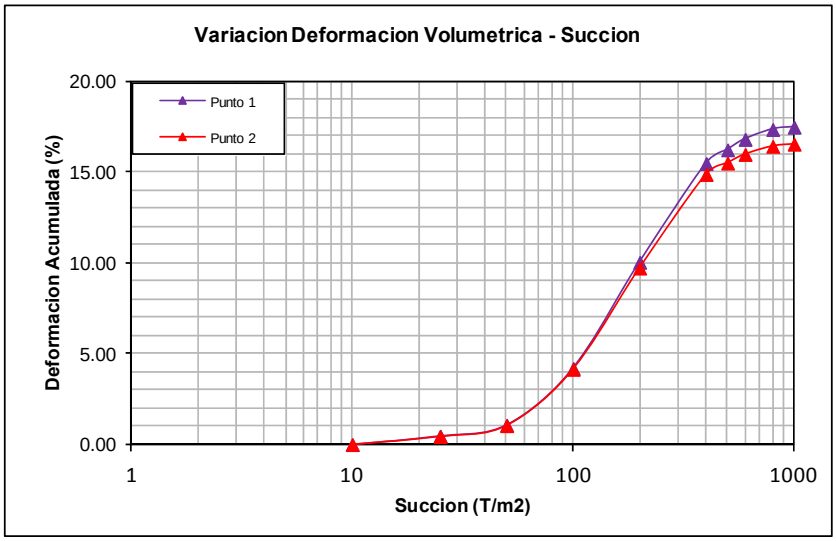
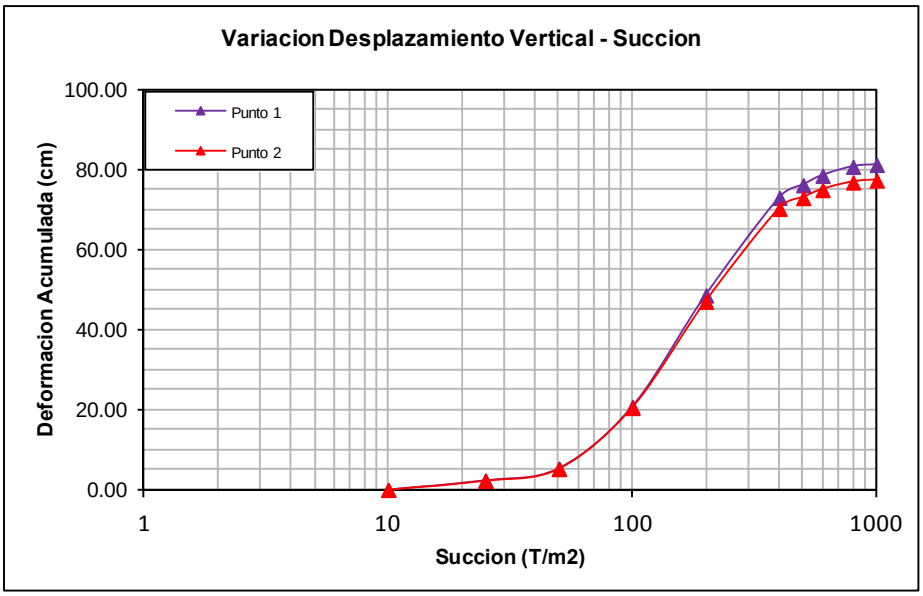


Figura 5-26 Variación del desplazamiento vertical acumulado (a nivel superficial) con la succión - Punto de análisis 1 y 2.



En el Anexo E, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la memoria de cálculo de las deformaciones volumétricas y desplazamientos verticales para los dos escenarios de análisis (Normal y Extremo).

5.8 Comparación con otros resultados

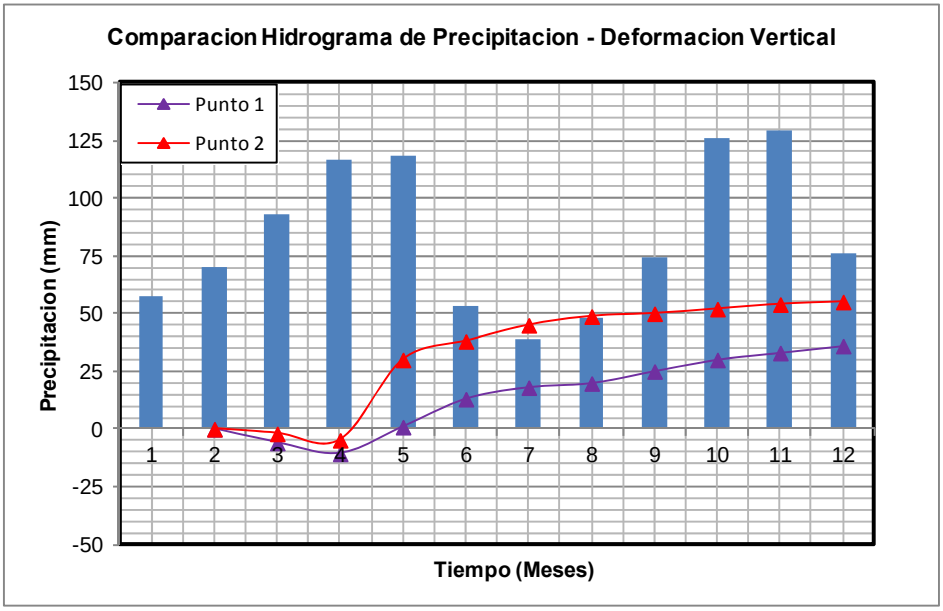
Como se ha indicado anteriormente, las deformaciones superficiales generadas por cambios de succión en el área de estudio, se deben principalmente a cambios estacionales en la humedad del suelo (procesos de humedecimiento y secado), cuya magnitud depende del régimen hidrometeorológico y climatológico de la zona.

Con el fin de establecer una relación entre las fluctuaciones temporales de las deformaciones calculadas por el Modelo Básico de Barcelona (BBM) y las variaciones de los niveles de precipitación registrados a lo largo del tiempo, se utilizaron los datos de precipitación mensual multianual registrados por una estación pluviométrica ubicada en el Campus de la Universidad Nacional de Colombia (IDEAM y FOPAE, 2007).

En la Figura se muestra la variación del desplazamiento vertical en superficie y la correspondiente precipitación mensual multianual para el período comprendido entre el 1

de Febrero de 2010 y el 1 de Febrero de 2011. Al observar esta figura, se puede apreciar una correspondencia entre el desplazamiento vertical y la precipitación en los primeros seis meses, debido a que un aumento en el régimen de precipitación de la zona genera una expansión en el suelo, y una disminución en la precipitación genera una compresión en el suelo. De aquí en adelante, no es posible relacionar el comportamiento del desplazamiento con la precipitación de la zona, ya que el intervalo de tiempo entre una campaña y otra es más amplio (de 3 meses), en comparación con las campañas anteriores (de 1 mes).

Figura 5-27 Comparación entre los valores de desplazamiento vertical en superficie y el régimen de precipitación del área de estudio – Campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.



Para futuras investigaciones, es importante aumentar la frecuencia temporal de las campañas de monitoreo geotécnico, especialmente las lecturas de humedad natural del suelo, con el fin derealizar comparaciones más precisas. Por lo tanto, se recomienda disponer de datos de campo de humedad natural con una frecuencia temporal similar a los datos de precipitación mensual proporcionada por la estación pluviométrica existente en el área de estudio, y comparar estamagnitud con las deformaciones obtenidas por el

método BBM, para así poder relacionar las variaciones de la deformación en el tiempo conlos datos de precipitación.

Además, si se compara la velocidad de movimiento reportada por el Estudio de InterferometríaDiferencial (ICC y FOPAE, 2009), con la magnitud de las deformaciones obtenidas como resultado de los cálculos realizados por el método BBMy los datos de humedad obtenidos en las campañas de monitoreo geotécnico realizadas en el área de estudio, se encontró que le velocidad del movimiento actual (año 2010) es mayor a la reportada en el año 2008, cambiando de 2.6 cm/año a 5.5 cm/año, lo cual indica un incremento en la tasa de deformación de 2.9 cm/año, en un periodo de tiempo de dos años. Estos datos deben verificarse con mediciones directas de deformación en la zona de estudio, con el fin de lograr identificar la precisión de los análisis numéricos.

Esta variación en el tiempo de la tasa de deformación para el área de estudio, se debe principalmente a cambios en el régimen de precipitación de la zona durante estos dos años (2008 a 2010), presentándose períodos secos más prolongados en comparación con los períodos de lluvia (generando valores altos de evaporación y radiación solar), lo cual coincide con la presencia del fenómeno del niño en Colombia entre el año 2009 y 2010.

6. Conclusiones y recomendaciones

A continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de las observaciones de campo, caracterización geotécnica y los análisis de deformaciones superficiales realizados:

- En esta tesis se hizo un análisis de las deformaciones que puede presentar la arcilla de Bogotá, en el sector de la Universidad Nacional de Colombia, para los primeros 6 m de profundidad, debido a cambios de humedad, que a su vez generan cambios de succión, cuya magnitud se estimó con base en las curvas de retención de humedad y de compresibilidad disponibles para estos materiales.

- Se hicieron cuatro campañas de muestreo en un año, a partir de la cuales se determinó la humedad en diferentes tiempos y a diferentes profundidades. Con estos datos fue posible conocer los cambios de humedad y de succión en el perfil estudiado.

- Para determinar las deformaciones producidas por cambios de succión, se utilizó el Modelo Básico de Barcelona (BBM) desarrollado por (Alonso et al, 1990), el cual toma como variables los cambios en la succión y el esfuerzo neto medio, tanto en procesos de humedecimiento como de secado.

- Con base en los cambios de humedad registrados en las diferentes campañas de muestreo y, en las curvas de retención de humedad y de compresibilidad disponibles para los materiales presentes en el perfil estudiado, se obtuvieron valores máximos de deformación vertical de 6 cm. Esto indica que los cambios de volumen producidos por succión, pueden representar una componente importante en el proceso de subsidencia y deben evaluarse con mayor detalle, midiendo localmente las deformaciones.

- Si se comparan las fluctuaciones temporales de las deformaciones calculadas por el Método Básico de Barcelona (BBM) y las variaciones de los niveles de precipitación registrados a lo largo del tiempo, se puede establecer una correspondencia entre el desplazamiento vertical y la precipitación acumulada en los primeros seis meses, debido a que un aumento en el régimen de precipitación de la zona genera una expansión en el suelo, y una disminución en el mismo genera una compresión en el suelo. De aquí en adelante, no es posible relacionar el comportamiento de la deformación con la precipitación de la zona, ya que el intervalo de tiempo entre una campaña y otra es más amplio (de 3 meses), en comparación con las campañas anteriores (de 1 mes).

- Estos resultados deben compararse con nuevas mediciones directas en el terreno, con el fin de lograr identificar la precisión de método aplicado. También es recomendable que entidades como el FOPAE y el IGAC continúen con las campañas de monitoreo de deformaciones.

- Se recomienda para futuras investigaciones instrumentar con tensiómetro, piezómetros y extensómetros, con el fin de verificar la profundidad de la zona activa y comparar los datos para una serie de tiempo más larga que permita correlacionarlos con los datos de precipitación.

- Es posible utilizar modelos desarrollados para el análisis de deformaciones en suelos parcialmente saturados, como es el caso del Modelo Básico de Barcelona (BBM), con el fin de predecir el comportamiento del suelo ante cambios en el régimen de precipitación, a partir de algunas propiedades intrínsecas del suelo como son la humedad natural, las curvas de retención de agua y la compresibilidad de la arcilla en condición saturada (consolidación unidimensional). Los resultados obtenidos en los análisis de deformaciones a nivel superficial para el área de estudio son aproximados, debido que se consideró un estado de esfuerzos isotrópico y una condición unidimensional de deformaciones para modelar el fenómeno de subsidencia en los suelos blandos de la ciudad de Bogotá.

Anexos:

ANEXO A. INFORME VISITA DE INSPECCIÓN – ZONA DE MAYOR SUBSIDENCIA

ANEXO B. TABLA RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS DE EXPLORACIÓNGEOTÉCNICA

ANEXO C. AJUSTE DE CURVAS DE RETENCIÓNAL MODELO TEÓRICO DE VAN GENUTHEN

ANEXO D. AJUSTE DE CURVAS DE COMPRESIBILIDAD AL MODELO BÁSICO DE BARCELONA - BBM

ANEXO E. TABLAS DE CÁLCULO PARA ELANÁLISIS DE DEFORMACIONES POR CAMBIOS DE SUCCIÓN

Bibliografía

- AIS y SCG (2010). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-10. Titulo H - Estudios Geotécnicos.

- Atkinson, J. H y Bransby, P. L (1982). The Mechanics of Soils, An Introduction to Critical State Soils Mechanics. McGraw Hill International Series In Civil Engineering, London, p. 271.

- Alonso, E. E., Gens, A y Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. Geotechnique 40 (3): 405-430.

- ASTM (1992). Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper (D-5298). American SocietyforTesting and Materials. Vol. 15.09: 1312-1316.

- Ávila, G. E (1998). Instrumentación Piezómetrica para análisis de Subsidencia en Santafé de Bogotá. VII Congreso Colombiano de Geotecnia. Vol. 2, Pag. 6.30 a 6.35.

- Ávila, G. E. (2001). Curvas de retención de agua de una arcilla de Bogotá. XI Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana y IV Foro sobre Geotecnia de la Sabana de Bogotá. Sociedad Colombiana de Ingenieros, Sociedad Colombiana de Geotecnia: 1-15.

- Ávila, G. E. (2004). Estudio de la Retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a las arcillas de Bogotá. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.

- Ávila, G. E. y Castro N. C. (2011). Avances en el Estudio de Subsidencia en la Ciudad de Bogotá. VIII Seminario Colombiano de Geotecnia y Seminario Internacional de Geotecnia Urbana. Sociedad Colombiana de Geotecnia: 1-11.

- Blight, G.E. (1997). Interactions between the atmosphere and the Earth. Geotechnique 47 (4): 715 -767.

- Chandler, R. J., Crilly, M. S., y Montgomery – Smith G (1991). A lost-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. Proc. of theInstitute of Civil Enginnering. 92 (2): 82-89.

- Coronado, J. W (1987). Humedad de Equilibrio y Succión en los Suelos de la Sabana de Bogotá. Proyecto de Grado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.

- Dolan, I. y Goodell, H.G. (1986): Sinking Cities - American Scientist, Vol.74. pp. 38-47.

- Espinosa, A. (1997). "El agua en la arcilla de Bogotá". IX Jornadas Geotécnicas y III Foro sobre Geotecnia de la Sabana de Bogotá. Soc. Col. Ingenieros. Soc. Col. Geotecnia. Tomo II. 146-174.

- Evans, R. S., (1986). A Regional Groundwater model for Open Cut Coal Winning in the Latrobe Valley, Victoria. AWRC Conference, GroundwaterSystemsUnder Stress, Brisbane.

- Fredlund, D. G. y Morgenstern, N. R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. J.Geotech. Eng. Div., ASCE 103 (GT5): 447-466.

- Fredlund, D. G. y Rahardjo, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons, Inc. New York.

- Fredlund, D. G. & Xing, A., (1994). Equations for the soils-water characteristic curve. CanadianGeotechnicalJournal, 31: 521-532.

- Folloni, G., De SanctisRicciardone, y A. Gubellini. (1974). Evoluzionerecente del fenomeno di subsidenzanellazone di Venezia e del suoentroterra. ist. di Topografia e Geodesia, Universita di Bologna, 16 p.

- Fontes, J. CH., and G. Bortolami, (1972). Subsidence of the area of Venice during the past 40,000 years. Cons. Naz. Ric., Lab. Din. Gr. Mas., Tech. Rep. 54, Venezia, 11 p.

- Hilf, J. W., (1956). An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils. Ph.D. Thesis. Technical Memo. No 654, U.S. Dept. Interior Bureau of Reclamation, Design and Constructions Div., Denver, CO.

- HIDROGEOCOL LTDA, (2000). Elaboración de modelo hidrogeológico para los Acuíferos de Santafé de Bogotá D.C. Informe Final. Proyecto PNUD/COL/96/023, Departamento Administrativo de Medio Ambiente (DAMA).

- Inaba, Y., Aoki, S., Endo, T., and R. Kaido. (1969). Reviews of land subsidence researches in Tokyo, IAHS Pub. No. 88, p. 87-98.

- INGEOMINAS y CAR (1992). Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá. Contrato 033-89.

- INGEOMINAS (1999). Informe de actividades para el proyecto "Compilación y levantamiento de la Cartografía Geotécnica de Colombia". Estudio de Subsidencia de la Sabana de Bogotá.

- INGEOMINAS (2004). Aspectos Geotécnicos de la Sabana de Bogotá. Proyecto Compilación y levantamiento de la Cartografía Geotécnica de Colombia. Subdirección de Geología Básica. Vol. III.

- INGEOMINAS y UNIANDES(1997). Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá. Convenio Interadministrativo 01-93.

- IDEAM Y FOPAE (2007). Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y La Cuenca Alta del Rio Tunjuelo.

- ICC y FOPAE (2009). Estudio Interferometrico Diferencial (DinSAR) que permita determinar la evolución de las subsidencias del terreno en la ciudad de Bogotá durante el periodo 2006-2008 y evaluar el potencial de la herramienta de evaluación DInSAR en el monitoreo de fenómenos de remoción en masa. Convenio 317 de 2006.

- Ishi, M., Kuramochi, F., and T. Endo. (1977). Recent tendencies of the land subsidence in Tokyo, IAHS Pub. No. 121, p. 25-34.

- JICA - EAAB (2009). "Estudio de abastecimiento sostenible de agua para la ciudad de Bogotá y áreas circundantes, basado en el manejo integrado de recursos hídricos en la república de Colombia".

- Leonardi, P., (1960). Cause geologiche del gradualesprofondamento di Venezia e dellasua Laguna. Ist. Ven. Sc. Lett. e Arti, Venezia, 21 p.

- Lesser J. M. y Cortes M. A. (1998). Hundimiento del terreno en la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje. Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XIII, No. 2, Septiembre – Diciembre de 1998, 13-18.

- Lu, N. yLikos, W.J. (2004). Unsaturated Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York, p. 584.

- Lu, N., yLikos, W. J. (2006). Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil. Journal of Geotechnical and GeoenviromentalEnginnering, Vol. 132, No. 2, ASCE, 131-142.

- Meza, V. E. (2005). Influencia de la Succión Matricial en el Comportamiento Deformacional de dos suelos expansivos. Tesis de Maestría en Ingeniería, Área de Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.

- Miyabe, N. (1962). Studies in the ground sinking in Tokyo, Rept. Tokyo Institute of Civil Engineering, p. 1-38.

- Pineda, J.A. (2003). Investigación experimental sobre el comportamiento volumétrico de una arcilla de la sabana de Bogotá en procesos de secado. Tesis de maestría. Universidad Nacional, sede Bogotá.

- Poland, J. F. (1972). Subsidence and its Control In Underground Waste Management and Enviromental Implications, edited by T. D. Cook, Memoir No. 18, American Asociation of Petroleum Geologist, 50-72.

- Poland, J. F., (1984). Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal. UNESCO Studies and Reports in Hydrology no. 40. New York; Unipublications.

- Prokopovich, N.P. (1979). Genetic classification onland subsidence. En: Saxena, S.K. (ed.). Evaluation andprediction of subsidence. Proc. of the Int. Conf., PensacolaBeach, Florida, January 1978, Am. Soc. Civil Eng.,New York, 389-399.

- Ridley A. M. y Burland. J.B (1995). A new instrument for measuring soil moisture suction. Geotecnique, 43 (2): 321-324.

- Rodríguez, J.A. (2010). “Contribución al análisis de asentamientos regionales en Bogotá”. XIII Congreso Colombiano de Geotecnia - VII Seminario Colombiano de Geotecnia, Manizales.
- Serandrei Barbero R. (1972). Indaginesullosfruttamento artesiano nelComune di Venezia, 1846-1970. Cons. Naz. Ric., Lab. Din. Gr. Mas., Tech. Rep. 31, Venezia, 97 p.

- Universidad Nacional de Colombia y FOPAE (2011). Estudio de Modelación Geotécnica del Fenómeno de Subsidencia en la ciudad de Bogotá. Informe Final. Contrato 415 de 2010.

- Van der Hammen, T. et al (1998). Plan ambiental de la Cuenca Alta del Río Bogotá. 142 pp. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR, Bogotá.

- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed form equation for predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. SoilScienceSociety of AmericaJournal, 44, 892–898

- Tomas R. et al (2006). Monitorización de la Subsidencia del Terreno en la Vega Media del Rio Segura Mediante Interferometría SAR Diferencial. Geogaceta, No. 39, Pag. 107-110.