CLASIFICADO

ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA
Fondo de Prevención y Atención de Emergencias

FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS – FOPAE

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE EXTENSIÓN E INVESTIGACIÓN
Ciudad Universitaria. Edificio 406 I.E.I. – Oficina 218
BOGOTÁ D.C., COLOMBIA

ESTUDIO DE MODELACIÓN GEOTÉCNICA DEL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.

CONTRATO 415 DE 2010

VOL. 1 – INFORME FINAL

ORIGINAL

MAYO DE 2011

Nota especial: "De acuerdo con el artículo 20 de la Ley 23 de 1982, los Derechos de Autor pertenecen al FOPAE. La solicitud para reproducir este documento parcial o totalmente, se debe dirigir por escrito al Director del FOPAE".

CLASIFICADO

ESTUDIO DE MODELACIÓN GEOTÉCNICA DEL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.

FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS – FOPAE
Diagonal 47 No. 77 B – 09 Interior 11. PBX 4297414
Web: www.fopae.gov.co, www.sire.gov.co
Bogotá – Colombia

Elaborado por:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA – INSTITUTO DE EXTENSIÓN E INVESTIGACIÓN

CONTRATO 415 DE 2010

VOL. 1 – INFORME FINAL

ORIGINAL

MAYO DE 2011

Nota especial: "De acuerdo con el artículo 20 de la Ley 23 de 1982, los Derechos de Autor pertenecen al FOPAE. La solicitud para reproducir este documento parcial o totalmente, se debe dirigir por escrito al Director del FOPAE".

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ, D.C.

FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS – FOPAE

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA

TITULO(S) Y SUBTITULO(S): ESTUDIO DE MODELACIÓN GEOTÉCNICA DEL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.
INFORME FINAL

AUTOR(ES): UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE BOGOTÁ. FACULTAD DE INGENIERÍA. INSTITUTO DE EXTENSIÓN E INVESTIGACIÓN

RESUMEN: LA MODELACIÓN GEOTÉCNICA DE SUBSIDENCIA SE REALIZÓ PARA LA ZONA DE SUELOS BLANDOS DEL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ, A PARTIR DE LOS DATOS DISPONIBLES DEL ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA, DE LOS DATOS PIEZOMÉTRICOS DISPONIBLES EN INGEOMINAS, DE LAS MEDICIONES DE DEFORMACIONES SUPERFICIALES DEL TERRENO EFECTUADAS EN ENTIDADES COMO EL FOPAE, INGEOMINAS Y EL IGAC, ENTRE OTROS DATOS A CONSULTAR.

PALABRAS CLAVES: SUBSIDENCIA, MODELACIÓN, CONSOLIDACIÓN, AMENAZA.

TÉRMINOS PARA GLOSARIO E ÍNDICE: SUBSIDENCIA: HUNDIMIENTO PROGRESIVO DEL TERRENO EN UNA GRAN EXTENSIÓN

CLASIFICACIÓN DE SEGURIDAD:	**CONTRATO**: 415 DE 2010	**IDIOMA**: ESPAÑOL	**NÚMERO DE PAGINAS**: **175**	**NÚMERO DE COPIAS**: 1

NOTAS / OBSERVACIONES:

"ESTUDIO DE MODELACIÓN GEOTÉCNICA DEL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C."

INFORME FINAL

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

1 GENERALIDADES DEL ESTUDIO 1
1.1 Introducción 1
1.2 Objetivos 2
1.3 Alcances 2
1.4 Grupo de trabajo 2
1.5 Organización y contenido del informe 3
1.6 Delimitación del área de estudio 4
2 ANTECEDENTES DEL PROCESO DE SUBSIDENCIA 5
2.1 Aspectos generales 5
2.2 Subsidencia en la Sabana de Bogotá 5
2.3 Casos históricos de subsidencia en el mundo 8
3 RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA 16
3.1 Información y fuentes de consulta 16
3.2 Bases cartográficas y coberturas 17
3.3 Base de datos geotécnica 18
3.4 Georreferenciación (transformación) 19
3.5 Estudios recopilados 20
3.5.1 Estudio de Interferometría Diferencial DinSAR (ICC-FOPAE) 20
3.5.2 Nivelaciones en la red geodésica de Bogotá (IGAC) 21
3.5.3 Caracterización climática de Bogotá (IDEAM - FOPAE) 22
3.5.4 Microzonificación Sísmica de Bogotá (INGEOMINAS, 1997) 24
3.5.5 Balances hídricos de la Sabana de Bogotá (INGEOMINAS) 25
3.5.6 Modelos hidrogeológicos de la Sabana y la ciudad de Bogotá 26
3.5.7 Deformaciones corticales a partir de información satelital 35
3.6 Instrumentación geotécnica: Piezómetros 36
4 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN RECOPILADA 38
4.1 Modelos hidrogeológicos revisados 38
4.1.1 Mapa hidrogeológico INGEOMINAS (1996) 38
4.1.2 Modelo hidrogeológico SDA (2000) 39

4.1.3 Modelo hidrogeológico INGEOMINAS (2002) *40*
4.1.4 Modelo hidrogeológico EAAB (JICA, 2009) *40*
4.1.5 Mapa de unidades hidrogeológicas CAR (2006) *41*
4.2 Documentos e información adicional evaluada *42*
4.2.1 Nivel estático en los pozos de extracción de agua subterránea *42*
4.2.2 Balances hídricos en la zona suroccidental de la sabana de Bogotá *43*
4.2.3 Registros litológicos de exploraciones geotécnicas *43*
4.2.4 Reservas y extracción de agua subterránea *44*
4.3 Integración de la información disponible *46*
5 EVALUACIÓN DE DEFORMACIONES EN CAMPO *49*
5.1 Metodología de trabajo *49*
5.2 Inventario de la red geodésica de la ciudad de Bogotá – estaciones IGAC *50*
5.2.1 Descripción de la red geodésica de la ciudad de Bogotá *50*
5.2.2 Caracterización de la zona de influencia de los puntos de la red *50*
5.2.3 Evidencias de subsidencia en los diferentes puntos evaluados *51*
5.3 Confiabilidad relativa de las mediciones de deformación superficial realizadas *58*
5.3.1 Criterios de evaluación y categorías de confiabilidad relativa *58*
5.3.2 Análisis de confiabilidad relativa *59*
5.4 Caracterización de la zona de mayor subsidencia: Puente Aranda *60*
5.4.1 Visita de inspección a la zona *60*
5.4.2 Observaciones generales *61*
5.5 Conclusiones de la evaluación de deformaciones *63*
5.5.1 Estaciones de la red geodésica IGAC *63*
5.5.2 Zonas identificadas como de mayor subsidencia *63*
5.5.3 Confiabilidad de las mediciones de deformación superficial *64*
6 EVALUACIÓN DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS *65*
6.1 Reconocimiento de la instrumentación geotécnica disponible *65*
6.2 Análisis de las lecturas piezométricas *70*
6.3 Perfiles de presión de agua con la profundidad *80*
7 MODELO CONCEPTUAL DE SUBSIDENCIA *84*
7.1 Factores que pueden generar Subsidencia En Bogotá *84*
7.1.1 Evaluación de los factores de subsidencia *85*
7.2 Modelo hidrogeológico para análisis de subsidencia *87*
7.2.1 Unidades hidrogeológicas y condición hidráulica *87*
7.2.2 Posibles zonas de recarga *91*
7.2.3 Perfil hidrogeológico general *91*
7.2.4 Consideraciones para el modelo hidrogeológico de subsidencia *92*
8 PERFILES GEOLÓGICOS DE ANÁLISIS Y MODELO 3D *94*
8.1 Localización de los perfiles geotécnicos *94*

8.2 Secciones definidas de análisis hidrogeológico 94
8.3 Modelo 3D del terreno y del contacto depósito-roca 97
8.4 Análisis de la secuencia litológica del relleno lacustre 98
8.4.1 Formaciones y secuencia estratigráfica 98
8.4.2 Información base para elaborar los perfiles del Relleno Cuaternario 98
8.4.3 Descripción de los perfiles geológicos del relleno Cuaternario 99
9 MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA SUBSIDENCIA 103
9.1 Determinación de parámetros geomecánicos 103
9.1.1 Parámetros geotécnicos definidos para análisis 103
9.1.2 BDG e información a integrar 104
9.1.3 Parámetros considerados en los análisis numéricos 104
9.2 Modelación mediante el Método de Elementos Finitos 105
9.2.1 Sitios de modelación geotécnica 1D y 2D 105
9.2.2 Hipótesis y consideraciones de análisis 107
9.2.3 Perfiles estratigráficos y parámetros de análisis 108
9.2.4 Cálculo de asentamientos en el tiempo por variación del nivel freático 109
9.2.5 Análisis de los resultados de la modelación 117
10 IDENTIFICACIÓN DE POSIBLES EFECTOS EN ZONAS CRÍTICAS 119
11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 121
11.1 Conclusiones 121
11.2 Recomendaciones 122
12 BIBLIOGRAFÍA 125
13 ANEXOS 129

"ESTUDIO DE MODELACIÓN GEOTÉCNICA DEL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C."

INFORME FINAL

LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexo 1. Mapa Hidrogeológico de Bogotá (INGEOMINAS, 1997) - Cortes Hidrogeológicos….. .. 129

Anexo 2. Características de las Unidades Hidrogeológicas (INGEOMINAS, 2002) Corte Hidrogeológico transversal de la Sabana de Bogotá, Características, parámetros y formaciones…….. 131

Anexo 3. Unidades Hidrogelógicas (CAR, 2006) Plan de manejo de la reserva forestal protectora del Bosque Oriental de Bogotá.. 134

Anexo 4. Inventario de la Red Geodésica de la Ciudad de Bogotá –Estaciones IGAC. Caracterización de la zona de influencia de los puntos de las estaciones de la red, Registro fotográfico complementario de la inspección a las estaciones de la red geodésica. 136

Anexo 5. Informe de la visita de Inspección a la zona crítica de mayor subsidencoa – Sector de la Localidad de Puente Aranda……..…… 153

Anexo 6. Perfiles Geológicos para análisis de los aspectos Hidrogelógicos de la Subsidencia en Bogotá.Perfiles Longitudinales y Transversales: L 1-1' L 2-2' T 3-3' T 4-4' T 5-5' T 6-6' ……. .. 166

Anexo 7. Parámetros Geomecánicos determinados para los perfiles de la modelación numérica. Sitio 1, Sitio 2, Sitio 3, Sitio 4, Sitio 5, Sitio 6, Sitio 7, Sitio 8, Sitio 9, Sitio 10. ….....170

"ESTUDIO DE MODELACIÓN GEOTÉCNICA DEL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C."

INFORME FINAL

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Esquema de delimitación del área de estudio: Zona lacustre de la ciudad. *4*
Figura 2. Cantidad de agua extraída del subsuelo de México D.F. (Fuente: Tomás et al., 2009). *9*
Figura 3. Evolución de la subsidencia y del nivel piezométrico en un pozo de la ciudad de Murcia (Fuente: Tomás et al., 2009). *11*
Figura 4. Valle de San Joaquín, California: a) Localización; b) Registro de efectos de la subsidencia. (Fuente: USGS, Servicio Geológico de los Estados Unidos). *13*
Figura 5. Áreas de mayor subsidencia en el Valle de San Joaquín y registros del comportamiento en el tiempo. (Fuente: Galloway et al., 2001). *14*
Figura 6. Tabla de datos origen y especificación de atributos para conversión. *20*
Figura 7. Conversión de datos alfanuméricos a puntos y obtención de cobertura. *20*
Figura 8. Distribución de la precipitación media anual en la zona (IDEAM – FOPAE 2007). *23*
Figura 9. Caracterización de la clasificación climática en Bogotá (IDEAM – FOPAE 2007). *24*
Figura 10. Mapa de zonificación geotécnica de Bogotá (INGEOMINAS, 1997). *25*
Figura 11. Esquema de la cuenca artesiana de la Sabana de Bogotá (INGEOMINAS, 2002). *27*
Figura 12. Mapa geológico del área de estudio EAAB-JICA (2009). Fuente: INGEOMINAS. *28*
Figura 13. Relación entre la topografía y la distribución de los acuíferos. Fuente: EAAB-JICA (2009). *31*
Figura 14. Estructura hidrogeológica del área de estudio EAAB-JICA (2009). Fuente: INGEOMINAS. *33*
Figura 15. Volumen acumulado de extracción de agua subterránea en el tiempo. *45*
Figura 16. Comparativo entre el volumen acumulado de extracción de agua subterránea y la subsidencia relativa acumulada en el tiempo. *47*
Figura 17. Mapa de integración de la información para análisis de subsidencia. *48*
Figura 18. Clasificación de la confiabilidad por categorías de las estaciones de medición de la red geodésica de Bogotá (IGAC). *60*
Figura 19. Lecturas Cll. 127Bis con Cra. 20 – Piezómetro tipo Casagrande a -7 m. *71*
Figura 20. Lecturas Cll. 127Bis con Cra. 20 – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -30 m. *71*
Figura 21. Lecturas Cll. 127Bis con Cra. 20 – Piezómetro tipo Casagrande a -72 m. *72*
Figura 22. Lecturas Parque Timiza – Piezómetro tipo Casagrande a -5 m. *72*
Figura 23. Lecturas Parque Timiza – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -29 m. *73*
Figura 24. Lecturas Parque Timiza – Piezómetro tipo Casagrande a -139 m. *73*

Figura 25. Lecturas Universidad Agraria – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -29 m. 74
Figura 26. Lecturas Universidad Agraria – Piezómetro tipo Casagrande a -83 m. 74
Figura 27. Lecturas Universidad Agraria – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -125 m. 75
Figura 28. Lecturas Aeropuerto El Dorado – Piezómetro tipo Casagrande a -7 m. 76
Figura 29. Lecturas Aeropuerto El Dorado – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -30 m. 76
Figura 30. Lecturas Aeropuerto El Dorado – Piezómetro tipo Casagrande a -116 m. 77
Figura 31. Lecturas Aeropuerto El Dorado – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -240 m. 77
Figura 32. Lecturas INGEOMINAS – Piezómetro tipo Casagrande a -10 m. 78
Figura 33. Lecturas INGEOMINAS – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -24 m. 78
Figura 34. Lecturas INGEOMINAS – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -66 m. 79
Figura 35. Lecturas INGEOMINAS – Piezómetro tipo Casagrande a -112 m. 79
Figura 36. Lecturas INGEOMINAS – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -172 m. 80
Figura 37. Piezómetros Calle 127Bis con Cra. 20 – Perfil de presiones al año 2011. 81
Figura 38. Piezómetros Parque Timiza – Perfil de presiones al año 2011. 81
Figura 39. Piezómetros Universidad Agraria – Perfil de presiones al año 2011. 82
Figura 40. Piezómetros Aeropuerto El Dorado – Perfil de presiones al año 2011. 82
Figura 41. Piezómetros INGEOMINAS – Perfil de presiones al año 2011. 83
Figura 42. Esquema de unidades hidrogeológicas de interés en estado estacionario 88
Figura 43. Esquema sobre el comportamiento hidráulico del acuífero semilibre estacionario. 89
Figura 44. Esquema de comportamiento del goteo entre el acuitardo y el acuífero semilibre estacionario. 90
Figura 45. Perfil hidrogeológico inicial definido para análisis de la subsidencia. 92
Figura 46. Localización aproximada de los perfiles de análisis hidrogeológico. 95
Figura 47. Perfil geológico Transversal T 1-1' – Análisis de litologías Calle 170 (Norte). 96
Figura 48. Perfil geológico transversal T 5-5' – Análisis de litologías Av. El Dorado (Calle 26). 96
Figura 49. Perfil geológico transversal T 6-6' – Análisis de litologías sector Timiza-Olaya (Sur). 96
Figura 50. Vista 3D del paleorelieve y topografía superficial hacia el sur de ciudad. 97
Figura 51. Vista 3D hacia el norte de la ciudad de las superficies del terreno y la roca. 97
Figura 52. Esquema de localización de los sitios de modelación geotécnica (1D y 2D). 106
Figura 53. Geometría y elementos definidos para la modelación numérica 2D. 110
Figura 54. Variación del asentamiento con el tiempo Sondeos 06 y 09 – Análisis 1D. 111
Figura 55. Variación del asentamiento con el tiempo Sondeos 10 y 12 – Análisis 1D. 112
Figura 56. Variación del asentamiento con el tiempo Sondeos 23 y 33 – Análisis 1D. 112
Figura 57. Variación del asentamiento con el tiempo Sondeos 34 y 36 – Análisis 1D. 113
Figura 58. Variación del asentamiento con el tiempo Perfil Calle 127 – Análisis 2D. 115
Figura 59. Perfil de asentamiento con la profundidad Sondeos 03 y 08 – Análisis 1D. 115
Figura 60. Perfil de asentamiento con la profundidad Sondeos 33 y 36 – Análisis 1D. 116
Figura 61. Perfil de asentamiento con la profundidad Perfil Calle 127 – Análisis 2D. 116
Figura 62. Esquema de localización de las perforaciones adicionales recomendadas. 123

"ESTUDIO DE MODELACIÓN GEOTÉCNICA DEL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C."

INFORME FINAL

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Relación del grupo de trabajo definido para ejecución del estudio. 3
Tabla 2. Coberturas de información suministradas por el FOPAE en formato digital. 17
Tabla 3. Resumen de la información contenida en la base de datos geotécnica (FOPAE). 18
Tabla 4. Estudios previos contratados por el FOPAE para evaluación de la subsidencia. 21
Tabla 5. Clasificación de acuíferos en el área de estudio EAAB-JICA (2009). Fuente: JICA. 30
Tabla 6. Diseño del modelo de simulación de agua subterránea. Fuente: EAAB-JICA (2009). 34
Tabla 7. Volumen total de extracción de agua concesionado (SDA) y real consumido. 45
Tabla 8. Volumen de agua consumido y reportado por localidad para el año 2009..... 46
Tabla 9. Localización General de las estaciones de medición de la Red Geodésica de Bogotá..... 50
Tabla 10. Categorización propuesta para evaluación de la red geodésica IGAC. 58
Tabla 11. Criterios de confiabilidad de las estaciones de medición de la Red Geodésica. 60
Tabla 12. Relación de la instrumentación geotécnica instalada en la ciudad (1996-1997)..... 65
Tabla 13. Relación de los perfiles definidos para análisis hidrogeológico..... 94
Tabla 14. Resumen de perforaciones profundas con cuerpos de arcilla orgánica..... 100
Tabla 15. Resumen de las perforaciones con cuerpos de arena identificados. 100
Tabla 16. Relación de parámetros geomecánicos determinados para modelación..... 103
Tabla 17. Parámetros para modelación geotécnica en el Aeropuerto El Dorado (CNA)..... 104
Tabla 18. Sitios seleccionados para la modelación numérica 1D de la subsidencia..... 105
Tabla 19. Resumen de los resultados de la modelación 2D de subsidencia 110
Tabla 20. Valores de asentamiento calculado para diferentes tiempos, considerando posibles variaciones totales de nivel freático a una tasa de 10cm/año……..114

"ESTUDIO DE MODELACIÓN GEOTÉCNICA DEL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C."

INFORME FINAL

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Pág.

Fotografía 1. a) Estación IGAC No. 1 Jardines de Paz; b) Estación IGAC No. 3 Suba Compartir. . 51
Fotografía 2. a) Estación No. 4 Parque Los Nevados; b) Estación No. 7 Av. 19 – Cll. 137. 52
Fotografía 3. a) Estación No. 8 Parque Atahualpa; b) Estación No. 9 Av. Ciudad de Cali – Cll. 26. 53
Fotografía 4. a) Estación No. 10 Los Héroes; b) Estación No. 11 Biblioteca El Tintal. 53
Fotografía 5. a) Estación No. 12 Av. Las Américas - Av. Boyacá; b) Estación No. 13 El Jazmín.... 54
Fotografía 6. a) Estación No. 14 Parque Timiza; b) Estación No. 15 Parque Maryland (Bosa). 55
Fotografía 7. a) Estación No. 16 Parque San Cristóbal; b) Estación No. 17 Parque El Tunal. 56
Fotografía 8. a) Estación No. 18 Cementerio Serafín; b) Estación No. 19 Sierra Morena III. 57
Fotografía 9. Detalles del sitio devaluado de la Estación IGAC No. 20: Parque barrio Chuniza. 57
Fotografía 10. Detalle de ubicación y estado de piezómetros – Calle 127Bis – Cra. 20..... 66
Fotografía 11. Distribución de los piezómetros instalados – Calle 127Bis – Cra. 20. 66
Fotografía 12. Estado inicia de los piezómetros afectados – Parque Timiza. 67
Fotografía 13. Detalle de ubicación y estado de piezómetros – Universidad Agraria. 68
Fotografía 14. Verificación del estado de los piezómetros – Universidad Agraria. 68
Fotografía 15. Detalle de piezómetro libre posiblemente dañado – Universidad Agraria..... 68
Fotografía 16. Distribución de los piezómetros – Aeropuerto El Dorado CNA. 69
Fotografía 17. Verificación del estado de piezómetros de Cuerda vibrante – CNA. 69
Fotografía 18. Verificación del estado del piezómetro tipo Casagrande – CNA..... 70

LISTA DE FOTOGRAFÍAS ANEXOS

Pág.

ANEXO. 4:

Fotografía 1. Detalle de la ubicación de la estación No. 8 - Parque Atahualpa.....142
Fotografía 2. Ubicación de la estación No. 9 - Av. Ciudad de Cali con Calle 26…….…….....142

ANEXO.5:

Fotografía 1. Edificio centro urbano Antonio Nariño sobre carrera 36……156
Fotografía 2. Edificio centro urbano Antonio Nariño sobre carrera 36……..…….....156
Fotografía 3. Presencia de vegetación en el centro urbano Antonio Nariño……..…..…156
Fotografía 4. Presencia de vegetación en el centro urbano Antonio Nariño……156
Fotografía 5. Edificio centro urbano Antonio Nariño sobre carrera 37……..…157
Fotografía 6. Edificio centro urbano Antonio Nariño sobre carrera 37……..…..…157

Fotografía 7. Estación eléctrica edificio centro urbano Antonio Nariño sobre calle 25……..….157
Fotografía 8. Estación eléctrica edificio centro urbano Antonio Nariño sobre calle 25……...157
Fotografía 9. Estación eléctrica edificio centro urbano Antonio Nariño sobre calle 25……...157
Fotografía 10. Estación eléctrica edificio centro urbano Antonio Nariño sobre calle 25……157
Fotografía 11. Avenida las Américas, presencia de árboles en las vías…….…..158
Fotografía 12. Avenida las Américas, presencia de árboles en las vías……...158
Fotografía 13. Construcciones ubicadas sobre la avenida de las Américas entre carrera 36 y 50……...158
Fotografía 14. Construcciones ubicadas sobre la avenida de las Américas entre carrera 36 y 50……...158
Fotografía 15. Avenida de las Américas, vías y tipo de construcción……..…..…..…159
Fotografía 16. Avenida de las Américas, vías y tipo de construcción…….……...159
Fotografía 17. Edificio que presenta cabeceo hacia el costado oriental……..….160
Fotografía 18. Edificio que presenta cabeceo hacia el costado oriental……..…..…160
Fotografía 19. Presencia de edificios y vegetación en la zona……..…...160
Fotografía 20. Presencia de edificios y vegetación en la zona……..…...160
Fotografía 21. Presencia de construcciones modernas y recientes en la zona……..……..…161
Fotografía 22. Presencia de construcciones modernas y recientes en la zona……..…….…..161
Fotografía 23. Tipo de construcciones y obras de adecuación sistema Transmilenio……..…..…..161
Fotografía 24. Tipo de construcciones y obras de adecuación sistema Transmilenio……..…161
Fotografía 25. Edificio donde se evidencia asentamientos diferenciales……..…..…..162
Fotografía 26. Edificio donde se evidencia asentamientos diferenciales……..……..…162
Fotografía 27. Avenida la Esperanza, tipo de vías, presencia de vegetación y edificaciones tipo……..…..…...163
Fotografía 28. Avenida la Esperanza, tipo de vías, presencia de vegetación y edificaciones tipo……..…...163
Fotografía 29. Avenida la Esperanza, tipo de vías, presencia de vegetación y edificaciones tipo……163
Fotografía 30. Avenida la Esperanza, tipo de vías, presencia de vegetación y edificaciones tipo……163
Fotografía 31. Edificio con presencia de asentamientos diferenciales……..…..164
Fotografía 32. Edificio con presencia de asentamientos diferenciales……..…..…164
Fotografía 33. Carrera 50: árboles en vías, tipo de pavimentos y construcciones ubicadas en a zona…..…...165
Fotografía 34. Presencia de vegetación y evidencias presentadas en el pavimento y ciclo ruta……..…..165
Fotografía 35. Presencia de vegetación y evidencias presentadas en el pavimento y ciclo ruta……...165
Fotografía 36. Edificaciones tipo de la zona……..……...166
Fotografía 37. Edificaciones tipo de la zona……..…..…..166

"ESTUDIO DE MODELACIÓN GEOTÉCNICA DEL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C."

INFORME FINAL

CE-035-06-11

Bogotá, D.C., Mayo de 2011

1 GENERALIDADES DEL ESTUDIO

1.1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo con los estudios realizados tanto por INGEOMINAS como de los datos de deformaciones medidos por el IGAC y de las evaluaciones de la DPAE a partir de datos de interferometría diferencial, es claro que en la ciudad de Bogotá están ocurriendo procesos de subsidencia o hundimientos progresivos del terreno muy importantes que se concentran en unas zonas más que en otras pero que hacen parte de un fenómeno generalizado que debe ser evaluado de manera técnica porque eventualmente puede generar graves daños sobre obras de infraestructura de la ciudad, en particular sobre redes de servicios públicos, vías y edificaciones.

En este sentido, el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá, FOPAE, ha suscrito con la Universidad Nacional de Colombia un contrato para el desarrollo de actividades científicas y tecnológicas para la realización de un estudio de modelación geotécnica del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá, el cual comprende la evaluación de información disponible, el planteamiento de un modelo conceptual que permita explicar el proceso y el desarrollo o la aplicación de modelos numéricos para realizar cálculos predictivos de la posible evolución de las deformaciones del terreno en la ciudad.

Los productos de estudio servirán para identificar zonas críticas por efectos de subsidencia, tendencias de evolución, posibles efectos que se pueden presentar a mediano y largo plazo ante diferentes escenarios y aspectos en los que es necesario seguir profundizando para lograr un mejor conocimiento del proceso como nuevas perforaciones profundas para aclarar los niveles acuíferos, instrumentación para medición de deformaciones en profundidad, instalación de nuevos piezómetros y actualización de las mediciones superficiales con diferentes técnicas.

En éste informe final se integra lo tratado en los avances anteriores y lo correspondiente a la base de datos de la información obtenida y procesada, la modelación numérica de

subsidencia, la identificación de posibles efectos en zonas críticas y la formulación de estrategias para dar continuidad al proyecto.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo general del estudio es el de realizar la modelación geotécnica del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá a partir de la información disponible de características del suelo, presiones de agua en el subsuelo y deformaciones medidas superficialmente.

Los objetivos específicos comprenden:

- ✓ Realizar un análisis detallado de las magnitudes de las deformaciones medidas y confrontarlas con las características locales del subsuelo y con los usos del terreno.
- ✓ Elaborar un modelo conceptual que permita explicar las características y la evolución del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá.
- ✓ Realizar la modelación numérica del fenómeno de subsidencia de la zona de suelos blandos de la Ciudad.
- ✓ Predecir la evolución de la subsidencia a 5, 10 y 50 años en sitios de los que se disponga de información requerida y realizar análisis numérico bidimensional de subsidencia en un sitio de interés.
- ✓ Identificar los posibles efectos así como determinar los sitios críticos de la ciudad por el fenómeno de subsidencia y evaluar aspectos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo asociados al fenómeno.
- ✓ Definir los estudios adicionales requeridos para evaluar aspectos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por el fenómeno de subsidencia necesarios para la gestión de riesgo y los futuros estudios del tema.

1.3 ALCANCES

La modelación geotécnica de subsidencia se realizó para la zona de suelos blandos del área urbana de la ciudad de Bogotá a partir de los datos disponibles del estudio de microzonificación sísmica, de los datos piezométricos disponibles en INGEOMINAS, de las mediciones de deformaciones superficiales del terreno efectuadas en entidades como el FOPAE, INGEOMINAS y el IGAC, entre otros datos a consultar. El estudio no contempló la exploración adicional del subsuelo ni la ejecución de nuevos ensayos de laboratorio o de campo.

1.4 GRUPO DE TRABAJO

En la Tabla 1 se resume el equipo de trabajo que participó en la ejecución del proyecto de este proyecto.

Tabla 1. Relación del grupo de trabajo definido para ejecución del estudio.

Cargo	Nombre del Profesional	Título(s)
Director del Estudio	Guillermo Eduardo Ávila Álvarez	Ingeniero Civil, Esp., PhD.
Especialista en Hidrogeología	Leonardo David Donado Garzón	Ingeniero Civil, MIRH, PhD.
Geólogo	Pedro Antonio Hernández Borda	Geólogo, M.I.G.
Especialista en Geotecnia	Edgar Rodríguez Rincón	Ingeniero Civil, M.I.G.
Especialista en S.I.G.	Carlos Alfonso Gómez G.	Ingeniero Civil, Esp.
I.C. Estudiante de Maestría	Mauricio Bernal López	Ingeniero Civil
I.C. Estudiante de Maestría	Leonardo Rojas Rojas	Ingeniero Civil
Profesional de Apoyo en CAD	Mónica Ángulo Aranguren	Arquitecta
Profesional de Apoyo en SIG	Adriana Lucia Rodríguez	Ingeniera Catastral
Ingeniero de Apoyo Técnico	Néstor Castro Villamarín	Ingeniero Civil Cand. Msc.

1.5 ORGANIZACIÓN Y CONTENIDO DEL INFORME

El informe final se encuentra organizado teniendo en cuenta los alcances establecidos en el estudio y los aspectos tratados en los documentos previos, mediante el siguiente contenido:

- ✓ Antecedentes del proceso de subsidencia.
- ✓ Recopilación y análisis de información.
- ✓ Base de datos (de la información obtenida y procesada).
- ✓ Georreferenciación de la información (transformación de coordenadas).
- ✓ Análisis de los diferentes modelos hidrogeológicos de la zona.
- ✓ Modelo conceptual de subsidencia.
- ✓ Determinación de parámetros geomecánicos.
- ✓ Modelación numérica del proceso de subsidencia 1D (en 10 sitios) y 2D (en 1 tramo) para 5, 10, 20 y 50 años.
- ✓ Identificación de posibles efectos en zonas críticas y evaluación conceptual de aspectos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo asociados al fenómeno y estudios adicionales requeridos.
- ✓ Formulación de estrategias para dar continuidad al proyecto que desarrollen una mayor capacidad de análisis sobre el fenómeno de en Bogotá D.C.

1.6 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En la Figura 1 se presenta un esquema general con la delimitación geométrica de la zona de evaluación, la cual corresponde al área de suelos lacustres blandos a muy blandos de la ciudad según lo definido en el estudio de microzonificación sísmica, con una topografía aproximadamente plana del terreno. No se incluyen zonas de cerros, colinas, o similares.

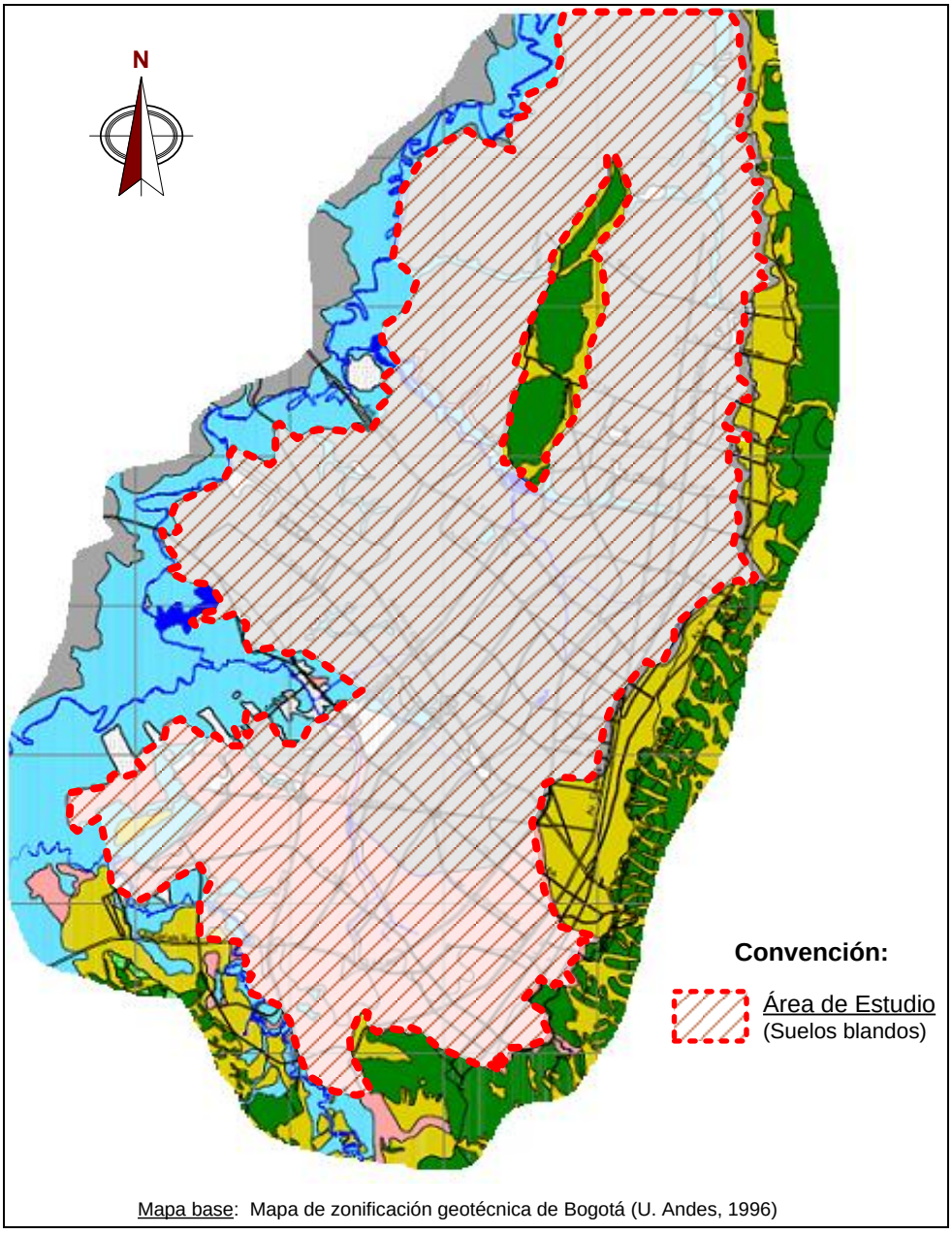


Figura 1. Esquema de delimitación del área de estudio: Zona lacustre de la ciudad.

2 ANTECEDENTES DEL PROCESO DE SUBSIDENCIA

2.1 ASPECTOS GENERALES

El término genérico de subsidencia hace referencia al hundimiento progresivo de la corteza terrestre, continental o submarina. La subsidencia terrestre es un fenómeno que implica el asentamiento de la superficie terrestre en un área extensa debido a varios factores, que pueden ser naturales o causados por el impacto de una gran variedad de actividades humanas (Corapcioglu, 1984).

La subsidencia es un fenómeno geológico, hidrogeológico y geotécnico que no suele ocasionar víctimas mortales, aunque los daños materiales que causa pueden llegar a ser cuantiosos. Es de gran importancia en zonas urbanas, donde los daños ocasionados pueden llegar a ser ilimitados, suponiendo una amenaza importante para edificaciones, canales, redes de infraestructura, vías de comunicación, así como en todo tipo de construcciones asentadas sobre el terreno que se deforma.

La subsidencia del terreno es únicamente la manifestación en superficie de una serie de mecanismos sub-superficiales de deformación. Prokopovich (1979) define desde un punto de vista genético dos tipos de subsidencia: endógena y exógena. La primera se refiere a aquellos movimientos de la superficie terrestre asociados a procesos geológicos internos como pliegues, fallas, vulcanismo, etc. La segunda se refiere a procesos de deformación superficial relacionados con la consolidación natural o antrópica de los suelos.

La subsidencia se puede clasificar en función de los mecanismos que la desencadenan (Scott, 1979). Las actividades extractivas de minerales subterráneos, la construcción de túneles, la extracción de fluidos (agua, petróleo o gas) acumulados en reservorios subterráneos, el descenso del nivel freático por estiajes prolongados, la disolución natural del terreno y lavado de materiales por efecto del agua, los procesos morfo-tectónicos y de sedimentación o los procesos de consolidación de suelos blandos u orgánicos, son algunas de las causas de los procesos de subsidencia (González de Vallejo et al., 2002).

2.2 SUBSIDENCIA EN LA SABANA DE BOGOTÁ

Es común observar en la ciudad de Bogotá deformaciones importantes en las vías y en las edificaciones, especialmente en los sectores donde se presentan suelos blandos muy compresibles. Estas deformaciones pueden estar relacionadas con los incrementos de carga que necesariamente producen las obras construidas, con deficiencias de diseño o de construcción de las obras, con drenajes de los niveles superficiales del suelo para construcción de sótanos, con desecación superficial durante largos períodos de sequía, con inadecuados sistemas de contención lateral en sectores próximos a canales y en muchos, casos con el efecto directo de los árboles que causan consolidación por la succión del agua del suelo. Sin embargo, además de las deformaciones locales y superficiales, existe subsidencia de tipo regional que involucra niveles más profundos del

subsuelo y es necesario evaluar si tales deformaciones tienen efecto en las obras superficiales.

En el Primer Foro sobre Geotecnia de la Sabana (Sociedad Colombiana de Ingenieros - Sociedad Colombiana de Geotecnia, 1992) se discutió este tema y se concluyó que hay varios estimativos de valores de subsidencia, los cuales van desde pocos centímetros hasta dos metros, pero no se presentaron datos de nivelaciones del terreno que permitieran determinar con precisión la magnitud de las deformaciones. También se presentaron en el Foro discrepancias sobre el verdadero efecto de la extracción de agua subterránea en las deformaciones del terreno, pues mientras para algunos el efecto es despreciable, otros consideran que es un factor importante de subsidencia.

La estratigrafía típica de la Sabana de Bogotá se caracteriza en general por la presencia de arcillas plásticas color gris oscuro, en estratos de 0.40 m a 1.0 m de espesor, con inter-estratificaciones de lentes de arena y grava e intercalaciones de ceniza volcánica de color gris blancuzco, las cuales son más abundantes hacia la parte media del depósito. Los niveles arenosos y de gravas son importantes para el almacenamiento de agua por su condición hidrogeológica y representan zonas de aprovechamiento hídrico para la región.

Uno de los principales estudios hidrogeológicos realizados en la Sabana de Bogotá fue el denominado proyecto INGEOMINAS - CAR, en el cual se llevó a cabo un inventario de los pozos, aljibes y manantiales existentes en la Sabana, se hizo un balance hídrico detallado por subcuencas hidrogeológicas y se evaluaron características del agua del subsuelo. Una de las conclusiones importantes de este estudio es que de acuerdo con el balance hídrico, existe sobreexplotación de acuíferos en algunas subcuencas hidrogeológicas.

En el trabajo de Rodríguez (1992) se propone que el modelo hidrogeológico de la Sabana corresponde a una cuenca cerrada, sin efluencia ni afluencia de agua subterránea, con una infiltración cercana a cero debido a que el acuífero se encuentra saturado y no puede almacenar mayor cantidad de agua, es decir, que los acuíferos aún permiten extraer grandes volúmenes de agua, sin sobrepasar los niveles de reserva. Los resultados de estos modelos indican valores de subsidencias bastante bajos (0.20 y 4.0 cm en 20 años) debido a que no se considera la consolidación de los niveles superiores de arcilla, sin embargo, la metodología de evaluación es interesante especialmente en lo relacionado con la obtención de coeficientes de consolidación (C_v), a partir de pruebas de bombeo.

El trabajo de Loboguerrero (1992) plantea un modelo hidrogeológico más complejo e indica con base en datos medidos que debido a la sobreexplotación de acuíferos, el nivel potenciométrico del agua subterránea está descendiendo entre 3 y 5 m/año y que este descenso de nivel de presión es una de las causas de fenómenos de hundimiento. Este trabajo es muy enfático en afirmar que hay subsidencia, por extracción de agua subterráneas y que sus efectos son significativos en superficie.

En el II Foro sobre Geotecnia de la Sabana de Bogotá (1997) se presentaron dos trabajos que tienen que ver con el tema de asentamientos y subsidencia: en primer lugar, Casas, Moreno y Rodríguez (1997) presentan la zonificación geotécnica por compresibilidad del sector norte de Bogotá, con base en el asentamiento que sobre los distintos suelos del

sector produciría una carga hipotética. Allí se presentan resultados indicativos de compresibilidad para distintas zonas.

En segundo lugar, Espinosa (1997) presenta un interesante recuento de experiencias sobre el proceso de desecación que han sufrido los suelos superficiales de Bogotá, principalmente por la urbanización y canalización de aguas lluvias y servidas, en el cual se destacan los casos de El Centro Administrativo Nacional (CAN), construido en 1955, donde los asentamientos de los edificios alcanzaron los 0,40 m e incluso fue necesario demoler una de las edificaciones por excesivo asentamiento. También comenta el caso de Ciudad Salitre, donde había varios cauces, que hoy en día están canalizados, entre ellos el río San Francisco y allí se observó desecación y aumento de la resistencia de los suelos superficiales. Este sector es particularmente significativo para el estudio actual, puesto que justamente en sus alrededores se han registrado las mayores tasas de subsidencia en los últimos años.

Otro sector que menciona Espinosa es Fontibón, donde el autor manifiesta haber encontrado el nivel freático en superficie en la década de los 70 pero que en 1997 ya existía una gruesa costra preconsolidada, de más de 10 m de espesor, es decir que había descendido significativamente en nivel freático.

Presenta adicionalmente el caso de El Cortijo Tibabuyes donde se presentaron casos de desecación coincidentes con el frente de urbanización, sobre terrenos anteriormente agrícolas.

En cuanto a mediciones de deformaciones, Espinosa presenta datos de asentamientos medidos en 3 edificios de 5 pisos sin sotano, ubicados entre el Cerro de Suba-La Conejera y el anticlinal de Bogotá, donde durante 9 años de lecturas se registraron asentamientos, destacándose que durante los períodos secos (fenómeno de El Noño) como el de 1992 se incrementó la tasa de asentamientos y que eso se vio además en deformaciones en edificios antiguos y hundimientos de calles. Destaca dentro de las lecturas de asentamientos que los sismos de Tauramena y de Risaralda, ocurridos en el año 1995, se vieron reflejados, ainque no de manera muy significativa, en las deformaciones medidas.

Un estudio del Departamento Administrativo de Media Ambiente (DAMA), hoy Secretaría Distrital del Ambiente (SDA), denominado *"Inventario de Pozos Profundos en Bogotá (1996)"*, indica que no existe relación entre las deformaciones superficiales del terreno y la explotación de agua subterránea, debido a que los volúmenes de extracción de agua a través de pozos profundos son muy bajos y que no podría generar un abatimiento del nivel freático capaz de ocasionar una consolidación local del terreno. No obstante no se presenta un análisis detallado desde el punto de vista geotécnico que fundamente esta afirmación.

Según Pérez (2000) la subsidencia en la Sabana de Bogotá es un fenómeno natural inherente a la formación de la cordillera Oriental y al consecuente gran lago, del cual eran afluentes el río Bogotá y sus tributarios, con su drenaje en el salto de Tequendama.

En la ciudad de Bogotá este fenómeno se ha venido estudiando desde los años 90 y en INGEOMINAS tuvo avances importantes entre 1996 y 1999 a raíz del aprovechamiento de la información derivada del estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá, donde se pudo hacer una caracterización en profundidad de los depósitos de arcilla, se instalaron piezómetros en diferentes sitios y se hicieron mediciones de deformaciones.

En años más recientes, diferentes entidades como la EAAB, CAR, IGAC y SDA, entre otras, han venido trabajando en la definición de diversos modelos que permiten complementar la información para evaluar de forma integral el fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá,

2.3 ALGUNOS CASOS HISTÓRICOS DE SUBSIDENCIA EN EL MUNDO

La subsidencia del terreno es un problema que afecta a varios sitios en el mundo, especialmente porque afecta su infraestructura y en zonas próximas al mar aumenta la vulnerabilidad ante inundaciones. Existen casos paradigmáticos y reportados en la literatura como los de ciudad de México, el Valle de San Joaquín en Estados Unidos, la ciudad Venecia en Italia y la ciudad de Murcia en España. A continuación se presenta una síntesis de algunos de estos casos.

Subsidencia de la ciudad de México D.F.

La ciudad de México – Tenochtitlan fue fundada por los aztecas en 1325 sobre unos islotes en el lago que se encontraba en la cuenca de México. Con el paso del tiempo, los aztecas construyeron islotes artificiales con el fin de ganar tierra para cultivo y crecimiento propio de la ciudad. Posteriormente, los españoles establecieron la capital de la Nueva España sobre los restos de la antigua ciudad azteca. Debido a una serie de inundaciones que afectaron la ciudad en el siglo XVII, los españoles decidieron abrir la cuenca con la construcción de los tajos de Huehuetoca y Nochistongo, con el fin de desecar el sistema lacustre para evitar futuras inundaciones, lo que llevó a la paulatina desaparición del lago (Tomás et al., 2009).

Actualmente, gran parte de la ciudad de México se ha desarrollado sobre los restos del antiguo lago, los cuales están formados por niveles arcillosos con alto contenido de agua (humedad media de 400%), y con un espesor entre 30 m y 70 m.

Tanto en la época prehispánica como en la colonial, el hundimiento de los pesados edificios religiosos y civiles se debió a la consolidación natural de las arcillas. Este fenómeno constituyó un serio problema para los constructores, el cual hizo necesario realizar frecuentes reconstrucciones y modificaciones, las cuales han continuado hasta nuestros días.

Con el tiempo, el suelo bajo las edificaciones se fue consolidando y el problema fue disminuyendo. Sin embargo, la subsidencia se acentuó nuevamente desde mediados del siglo XX, cuando las necesidades de agua potable de la ciudad llevaron a la explotación cada vez más intensa de los acuíferos de la cuenca, con el consiguiente drenaje del agua desde los estratos de suelo blando y su consolidación que es el origen del hundimiento del terreno (ver Figura 2). Para dar una visión clara de su magnitud se reportan algunos

datos: el nivel del terreno en la plaza central de la ciudad (el Zócalo) ha descendido cerca de 7.5 m desde inicios del siglo XX hasta la actualidad; la subsidencia actual es de unos 8 cm/año, sin que haya señales de que vaya a reducirse en el futuro. Los efectos de esta subsidencia han sido particularmente graves para el sistema de drenaje de la ciudad y para los edificios históricos. La única forma de resolver el problema es logrando un equilibrio entre la cantidad de agua que se extrae de los acuíferos y la que se recarga en los mismos por la filtración de agua de lluvia o por la inyección de agua tratada.

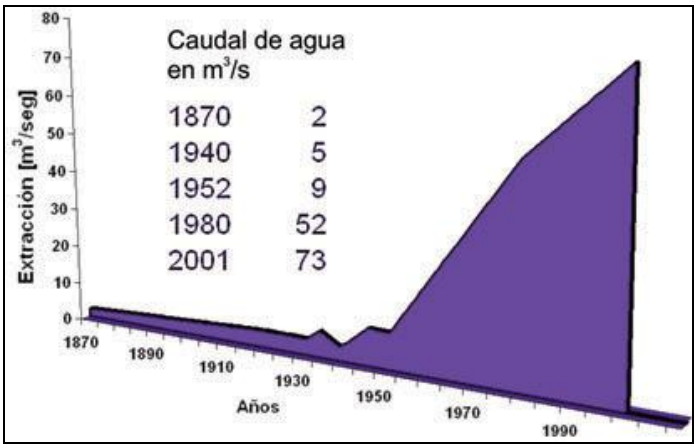


Figura 2. Cantidad de agua extraída del subsuelo de México D.F. (Fuente: Tomás et al., 2009).

Las construcciones modernas y los edificios históricos de la ciudad se comportan de modo diferente ante la subsidencia. En los edificios históricos la principal problemática es debida a asentamientos diferenciales, es decir, la deformación no es uniforme bajo la cimentación, debido principalmente a que distintos sitios han alcanzado diferentes grados de consolidación, dependiendo del peso de los edificios previos a los actuales. Así, las áreas sobre las que existió en el pasado una construcción muy pesada (por ejemplo estructuras aztecas) están más consolidadas y se deforman menos que otras por no haber recibido o soportado cargas importantes (calles, etc.), están menos consolidadas. Este fenómeno provoca que una zona con topografía originalmente regular presente pendientes e irregularidades en su elevación, las cuales se acentúan con el tiempo, y que los edificios ubicados en dicha zona se deformen.

En las construcciones modernas los asentamientos diferenciales no representan, generalmente, un problema. Sin embargo, durante el diseño y construcción de nuevas edificaciones, es importante tener en cuenta el fenómeno de subsidencia regional. Así algunos edificios construidos a mediados del siglo XX presentan el fenómeno de "emersión". Este fenómeno se debe a que dichos edificios se cimentaron sobre pilotes, los cuales se apoyan sobre niveles duros (rocosos) existentes en profundidad (pilotes columna), bajo los niveles arcillosos, por lo que su cimentación no se ve afectada por la consolidación de las arcillas. Sin embargo, conforme la ciudad sufre subsidencia, estos edificios no sufren movimiento alguno, por lo que el efecto que se produce es similar a una emersión del edificio, por lo cual los pilotes sufren un efecto de fricción negativa.

Subsidencia de la ciudad de Murcia

La ciudad de Murcia está situada en el sector más oriental de la Cordillera Bética, en el valle de la Vega Media del río Segura. El relleno del valle está constituido por materiales detríticos poco consolidados de edades comprendidas entre el Mioceno y el Cuaternario mientras que los bordes están delimitados por una serie de relieves periféricos de edad comprendida entre el Mioceno a Triasico al NW y SE.

Desde los años 90, la explotación del acuífero se ha intensificado considerablemente, de forma especial durante los periodos de sequía pluviométrica. Como consecuencia de esta sobreexplotación se produjeron descensos piezométricos considerables en el acuífero durante los periodos 1993-1996, 2000-2001 y 2006-2008 cuya magnitud media en la ciudad de Murcia fue de 6 m, 4 m y 8 m respectivamente, con valores extremos de hasta 15 m. Este descenso piezométrico produce una reducción de la presión del agua existente en los poros del suelo por lo que éstos se cierran progresivamente, causando un reajuste de las partículas, disminuyendo su volumen y, por lo tanto, generando la subsidencia superficial del terreno.

Como ya se ha comentado, en los años 90 tuvo lugar una importante crisis piezométrica que causó el hundimiento del terreno en gran parte de la ciudad y causó daños en más de 100 edificios y en la infraestructura urbana (aceras, redes de infraestructura, muros, etc.) lo cual generó una gran alarma social entre la población.

Entre el periodo 1993-2007 se ha producido una importante subsidencia generalizada en toda la cuenca sedimentaria del río Segura, con valores que llegan puntualmente hasta los 12 cm. En la ciudad de Murcia, los mayores asentamientos absolutos se localizan en el S y SE de la ciudad alcanzando valores inferiores a 10 cm.

En la siguiente Figura se observa la relación existente entre la evolución temporal del nivel piezométrico y la subsidencia en un punto de medida al SW de la ciudad de Murcia. Como se puede observar, los descensos piezométricos llevan asociados subsidencia (línea continua) a la vez que las recuperaciones piezométricas generan ascensos de la superficie de menor magnitud debido a que parte de la deformación previa es irreversible.

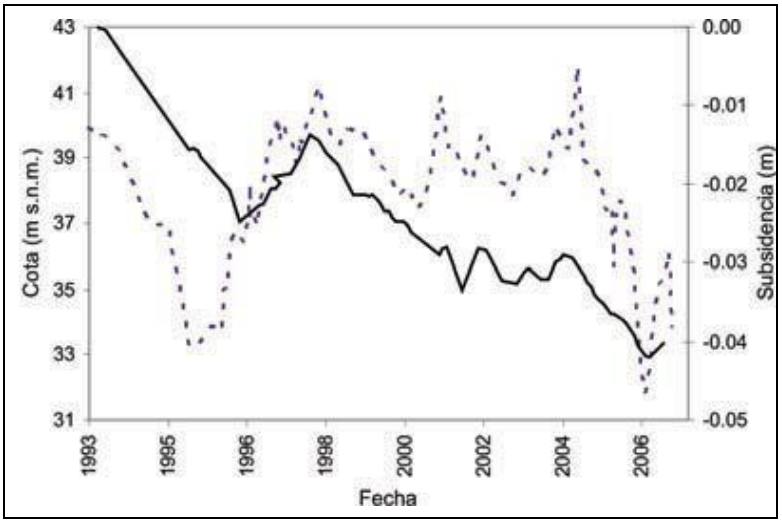


Figura 3. Evolución de la subsidencia y del nivel piezométrico en un pozo de la ciudad de Murcia (Fuente: Tomás et al., 2009).

Subsidencia de la ciudad de Venecia

La ciudad de Venecia está localizada en la región baja del Valle del río Po en el nor-este de Italia y ha sido tomada como referente histórico en diversos estudios sobre modelación de la subsidencia del terreno debido a la extracción de fluidos subterráneos.

Varios estudios de la subsidencia del terreno han señalado que el evento está relacionado con la densificación de la formación acuitardo (almacena agua pero transmite muy lentamente) debido a la gran extracción de agua subterránea de los 350 m superiores de sedimentos Cuaternarios no-consolidados subyacentes al estero, ocurrida especialmente durante el periodo entre los años 1950 y 1970 (Pietro Teatini et al., 1995).

Tres factores han contribuido principalmente al hundimiento de Venecia y sus regiones circunvecinas con respecto al nivel promedio del mar. Dos de estos factores son de origen natural: el incremento estacionario del nivel promedio del mar y el asentamiento debido a la consolidación natural de los depósitos de grano fino en el substrato del estero. El tercer factor en la subsidencia es la inducida por el hombre debido a la explotación subterránea.

El incremento glaciar-estacionario del nivel del mar depende de los cambios climáticos del planeta, teniendo este aumento desde comienzos del siglo XX un valor promedio 1.27 mm por año, resultando en una perdida de elevación de aproximadamente 9 cm durante el periodo de 1908 a 1980. Los efectos de la consolidación natural se han estimado en una subsidencia aproximada de 1.30 mm por año. Una contribución importante a este efecto fue originada por un incremento en la concentración de sal en el agua de saturación de las arcillas de los sedimentos por el cambio brusco de las características del estero a un ambiente salino durante la evolución del valle de sedimentación. Actualmente la velocidad natural de la subsidencia por consolidación es de casi 0.40 mm por año, contribuyendo a los 3.0 cm del total de la pérdida de elevación del terreno desde comienzos del siglo XX.

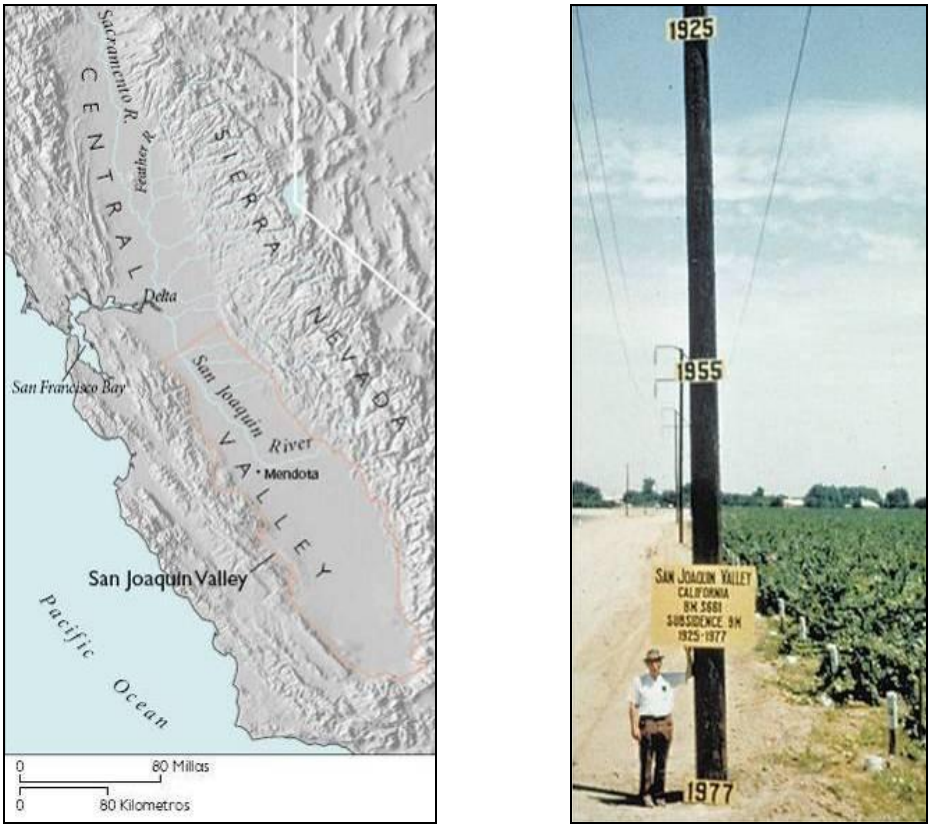
La subsidencia inducida por el hombre inició alrededor de 1925 con el desarrollo de la zona industrial de Marghera en el continente. En el periodo de 1952 a 1969 la extracción de agua en esta región originó un asentamiento de 10 cm; posteriormente la velocidad de subsidencia del terreno disminuyó debido a la reducción en la tasa de explotación subterránea. Los acuíferos se recuperaron y finalmente en 1975 se registró un rebote del terreno de aproximadamente 20 cm.

El efecto conjunto de los tres factores en la subsidencia entre 1908 y 1980 se puede relacionar que un 47% de la pérdida total de elevación fue por la contribución industrial, teniendo en cuenta el rebote. El efecto de los tres factores corresponde a un incremento total del nivel del mar de 22.4 cm, lo cual representa una situación seria para Venecia la cual tiene una elevación promedio de sólo 1.0 m sobre el nivel del mar. Si se considera que la altura de la marea promedio en primavera es de 55 cm sobre una media cero, entonces este incremento de casi 22 cm representa un 30% del margen de seguridad para una altura de marea normal. Como un resultado, la inundación de Venecia ocurre de forma más frecuente que en el pasado.

Subsidencia en el Valle de San Joaquín

La explotación de agua subterránea para la agricultura ha convertido al Valle de San Joaquín (California) en una de las regiones agrícolas más productivas del mundo, contribuyendo simultáneamente a una de las más grandes alteraciones de la superficie de la tierra, atribuibles a la humanidad. El Valle Central de California, que incluye el Valle de San Joaquín (Figura 4a), produce alrededor de 25% de los alimentos consumidos en Estados Unidos en tan sólo 1% de las tierras de labranza del país (Galloway et al., 2001). Desde el año 1900 hasta la década de 1970 se explotó el agua subterránea para la irrigación y cultivo agrícola, sin embargo, con el tiempo esta explotación rebasó considerablemente la recarga de los acuíferos de extracción y los más de 75 años de bombeo de aguas subterráneas provocaron la subsidencia o asentamiento del terreno en más de 8.50 m. En la Figura 4b) se aprecia un sitio cercano a Mendota, en el Valle de San Joaquín, la marca superior del poste indica el nivel de la superficie del suelo en 1925 en comparación con el nivel al momento de tomarse la fotografía, alrededor del año 1977 (tomado del USGS).

La subsidencia del suelo en el Valle de San Joaquín se descubrió inicialmente en 1935, identificándose la ocurrencia de cuatro tipos de procesos, descritos de mayor a menor magnitud como: 1) subsidencia causada por la consolidación del sistema acuífero debido al descenso de los niveles de agua subterránea por la sobreexplotación sostenida; 2) subsidencia por la hidro- consolidación de los depósitos de humedad deficiente presentes sobre el nivel freático; 3) subsidencia relacionada con la extracción de fluidos de los campos de petróleo y gas, y 4) subsidencia originada por movimientos neotectónicos de la corteza terrestre. La consolidación del sistema acuífero subterráneo existente en el Valle y la hidro-consolidación han disminuido significativamente la superficie del terreno desde la década de 1920, siendo estos dos aspectos las principales causas de la subsidencia. (Galloway et al., 2001).



a) b)

Figura 4. Valle de San Joaquín, California: a) Localización; b) Registro de efectos de la subsidencia. (Fuente: USGS, Servicio Geológico de los Estados Unidos).

El Valle de San Joaquín hace parte de una gran depresión, en un área de 13,500 km^2, creada por fuerzas tectónicas asociadas a la colisión de las placas Pacífica y Norteamericana. La cuenca esta rellena de sedimentos marinos sobre materiales continentales, en algunos sitios de hasta cientos de metros de espesor, depositados principalmente por corrientes drenando de las montañas, y parcialmente en lagos que inundaron porciones del fondo del valle periódicamente. Más de la mitad del espesor de sedimentos continentales está compuesto por depósitos de grano fino (arcillas, limos arcillosos arenosos y limos), fluviales y lacustres, susceptibles a la compactación o densificación.

El agua subterránea fluye en un sistema de acuíferos existentes a lo largo del valle, de tipo superficiales, inconfinados (nivel freático) o parcialmente confinados por arcillas de origen lacustre. La mayor parte de la subsidencia registrada en el valle ha sido asociada a la distribución del bombeo del agua subterránea y a la reducción de los niveles de agua en el sistema acuífero confinado profundo.

El bombeo acelerado del agua subterránea y las caídas del nivel freático, principalmente en el sistema de acuíferos profundo durante las décadas de 1950 y 1960, causaron casi el 75% del volumen total de la subsidencia del terreno en el Valle de San Joaquín. A finales

de 1960 la ejecución de proyectos hídricos estatales reemplazó ampliamente el agua subterránea para la irrigación de cultivos, por lo que los niveles comenzaron un dramático período de recuperación y la subsidencia se retardó o detuvo sobre una gran parte del área afectada, aunque muchas otras se continuaron asentando pero en una proporción menor. En la siguiente Figura se aprecia la evolución de este comportamiento.

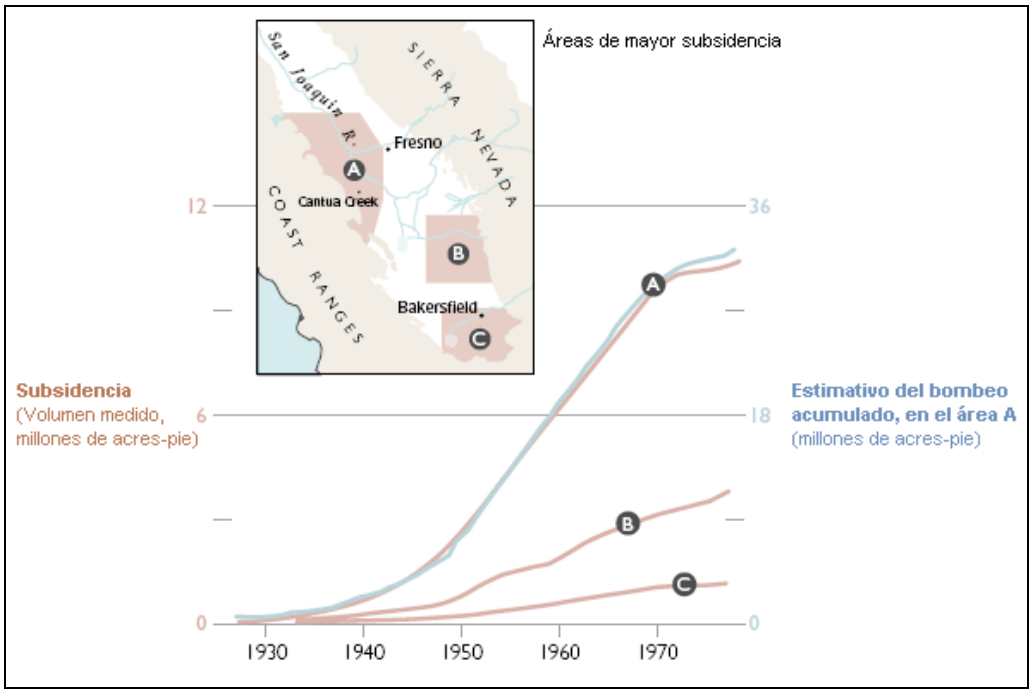


Figura 5. Áreas de mayor subsidencia en el Valle de San Joaquín y registros del comportamiento en el tiempo. (Fuente: Galloway et al., 2001).

En cuanto a la hidro-consolidación –compactación debida al humedecimiento– ésta es un proceso superficial que produce la subsidencia del terreno por un mecanismo diferente de la consolidación del sistema de acuíferos. Se presenta cuando el agua es aplicada en una cantidad suficiente para penetrar bajo la zona radicular que el cementante del suelo se debilita drásticamente por el humedecimiento, y el peso por sobrecarga hace que colapse el suelo por la excesiva porosidad. El proceso de densificación para lograr la resistencia requerida para soportar la sobrecarga existente puede reducir el volumen del suelo hasta un 10%, lo cual aumenta con el incremento de la profundidad y sobrecarga.

Subsidencia en Shangai

De acuerdo con Dassargues y Li (1991), en esta ciudad Chana, se ha presentado subsidencia con valoes máximos entre 2.5 y 3.0 m, principalmente asociada a la extracción de agua de un acuífero situado entre 60 y 80 m de profundidad, el cual está dentro de una espesa capa de sedimentos blandos de aproximadamente 300 m. A pesar del gran espesor de los sedimentos compresibles, se indica que entre el 65 y el 85% de la subsidencia ha ocurrido en los 70 m superiores. Las tasas de subsidencia media entre

1923 y 1965 fueron aproximadamente de 6 cm/año y en algunos casos se presentaron tasas máximas de subsidencia del orden de 16 cm/año.

Entre 1963 y 1965 se dejó de extraer agua y prácticamente se detuvo la subsidencia ya que el acuífero tuvo una fuerte recarga natural. En la ciudad existía una amplia información piezométrica y de registros de deformaciones del terreno que permitieron una completa modelación la subsidencia mediante elementos finitos haciendo una discretización de estratos y de zonas homogéneas de compresibilidad.

3 RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

3.1 INFORMACIÓN Y FUENTES DE CONSULTA

Respecto de la información necesaria para la modelación geotécnica del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá, y específicamente en lo que se relaciona con la definición del modelo conceptual de análisis en los aspectos hidrogeológico y geotécnico, se realizó la consulta respectiva a las siguientes entidades:

- Fondo de Prevención y Atención de Emergencias - FOPAE
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC
- Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAAB
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR
- Secretaría Distrital de Ambiente - SDA
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
- Instituto de Desarrollo Urbano - IDU
- Jardín Botánico de Bogotá "José Celestino Mutis"

La información secundaria solicitada a las diferentes entidades, gracias a la gentil gestión e intermediación del FOPAE, correspondió concretamente a los siguientes aspectos:

- ✓ Estudios previos de subsidencia disponibles, medición de deformaciones superficiales del terreno o asentamientos en redes de servicios.
- ✓ Bases cartográficas y/o coberturas geográficas de la ciudad de Bogotá: geología, topografía, drenajes naturales, distribución catastral, redes de infraestructura de servicios públicos, malla vial, etc.
- ✓ Datos de mediciones de los niveles del terreno que se han registrado a partir de la red geodésica fundamental de Bogotá.
- ✓ Mapas y modelos hidrogeológicos o de subsidencia elaborados para la ciudad de Bogotá o para la Sabana.
- ✓ Datos hidro-meteorológicos y climáticos disponibles para la ciudad de Bogotá en los últimos años.
- ✓ Inventario y localización de la instrumentación geotécnica existente en la ciudad (piezómetros y deformímetros), y mediciones realizadas.
- ✓ Inventario de localización de pozos, aljibes y manantiales existentes en la ciudad, lecturas piezométricas o de variación de los niveles de agua en dichos sitios y datos de cambios regionales de nivel freático.
- ✓ Resultados de pruebas de bombeo o datos de caudales de extracción de agua subterránea de pozos profundos, aljibes y manantiales.
- ✓ Base de datos de información geotécnica disponible e informes de estudios de suelos detallados con información geotécnica de interés para la investigación.
- ✓ Características de las especies y vegetación existente en la ciudad y datos sobre cambios importantes en el uso del suelo en los últimos años.

- ✓ Políticas, criterios o recomendaciones sobre la siembra de especies vegetales en la zona urbana de Bogotá.
- ✓ Políticas o lineamientos sobre el uso del recurso hídrico subterráneo y de sus posibles efectos colaterales.

La información suministrada se relaciona en los siguientes apartes.

3.2 BASES CARTOGRÁFICAS Y COBERTURAS

La información digital disponible y correspondiente a las bases cartográficas o coberturas existentes para la ciudad de Bogotá fue suministrada directamente por el FOPAE en formato "shapefile" y metadatos geográficos en formato "xml", con restricciones de uso y de confidencialidad. Esta información fue de gran importancia para integrar el sistema de información geográfica SIG para la modelación geotécnica del proceso de subsidencia, el cual se articuló mediante los programas ArcGIS v.9.3 y AutoCAD.

En la Tabla 2 se detallan las principales coberturas geográficas suministradas, en donde se destaca la información correspondiente a la geología, topografía del terreno (curvas de nivel), drenajes naturales (acequias y ríos) y canales existentes, distribución catastral de predios mediante barrios y manzanas, malla vial de la ciudad, redes de infraestructura de servicios públicos de acueducto y alcantarillado, etc. También se incluye una cobertura de iso-espesores del depósito cuaternario superficial, equivalente a la profundidad de la roca.

Tabla 2. Coberturas de información suministradas por el FOPAE en formato digital.

Coberturas	Entidades	Metadatos
Zonificación de unidades geológicas	INGEOMINAS	100543
Microzonificación sísmica de Bogotá	FOPAE	100045
Sectores catastrales (barrios)	UAECD	100688
Distribución de Manzanas a 2009	UAECD	100038
Acequias existentes	UAECD	100699
Trazado de Canales	EAAB, UAECD	100059, 100673, 100703
Drenajes naturales (perimetrales)	UAECD	100700
Red hídrica (rural - perimetral)	FOPAE	--
Trazado de ríos (7)	EAAB	100055
Curvas de nivel secundarias cada 1.0 m	UAECD	100308
Malla vial actualizada a 2010	UAECD	100689
Profundidad a la roca (Espesor depósito)	FOPAE	100612
Línea de alcantarillado pluvial	EAAB	100650
Línea de alcantarillado sanitario	EAAB	100651
Línea de acueducto a presión	EAAB	100647

En cuanto a coberturas digitales de información, también se suministro la base de datos alfanumérica de las edificaciones existentes de la zona lacustre y de las zonas de construcciones y lotes catastrales de la ciudad de Bogotá.

3.3 BASE DE DATOS GEOTÉCNICA

Para este campo de búsqueda específico se concentró un esfuerzo importante en lograr conseguir tanto la información correspondiente a la Base de Datos Geotécnica (BDG) de la zona plana de la ciudad de Bogotá, integrada inicialmente hasta el 2007 por el FOPAE, como en la recopilación de la información de estudios geotécnicos detallados (sondeos, ensayos de laboratorio, pruebas geofísicas, etc.) realizados en los últimos años o que no fueron considerados o incluidos en la DBG.

En la Tabla 3 se resumen los aspectos más relevantes de la información contenida en la BDG inicial (FOPAE, 2007). Los estudios se relacionan a tres fuentes: Microzonificación Sísmica de Bogotá (MZSB), Estudios de Efecto Local (EEL) y el Proyecto Metro de Bogotá (PMB, PMBR), en donde a cada estudio le corresponde una perforación o sondeo geotécnico en los intervalos mínimo y máximo de profundidad presentados. Se indica igualmente el número de muestras recuperadas y la cantidad de ensayos de geofísica tipo Down-Hole de los que se dispone de información registrada en la DBG.

Tabla 3. Resumen de la información contenida en la base de datos geotécnica (FOPAE).

Fuente	Estudios	Perforaciones	Prof. (m)	Muestras	Geofísica
MZSB	37	37	20 – 250	2.551	--
EEL	51	51	13 – 100	733	45
PMB(R)	126	126	10 – 102	1.738	5
TOTAL	**214**	**214**		**5.022**	**50**

La BDG está elaborada en una hoja electrónica y los datos están estructurados en cinco entidades u hojas básicas para la agrupación de la información: Estudio, Exploración, Estrato, Muestra y Campo, con una relación entre cada entidad del tipo uno a varios mediante identificadores propios a cada dato.

Los 214 estudios de la BDG inicial corresponden en general a perforaciones y ensayos de laboratorio de mecánica de suelos de clasificación, de resistencia estática al cortante (compresión inconfinada y veleta) y algunos datos de compresibilidad (relación de vacíos); se hace mención a la ejecución de ensayos dinámicos tipo triaxial cíclico, columna resonante y bender element, pero no se incluyen o integran los resultados. La estratigrafía se presenta simplificada mediante estratos y profundidades según la clasificación de las muestras y la descripción del material, y se relacionan igualmente los resultados de los ensayos de campo realizados (SPT y Down-Hole).

La información geotécnica con la que se realizó la actualización de la BDG (al año 2011) consistió específicamente de los resultados de ensayos de laboratorio en relación con

parámetros de compresibilidad (pruebas de consolidación) fundamentales para evaluar deformaciones. Se incluyeron algunos datos de resistencia al corte por fricción y cohesión (triaxial estático, corte directo y compresión inconfinada), módulos de elasticidad o rigidez cortante (curvas dinámicas), etc., contenidos en informes de Estudios de Efecto Local y Microzonificación realizados en la zona lacustre de Bogotá. La base de datos actualizada (BDG FOPAE-UNAL 2011, incluida como Anexo digital a este informe) comprende de un total de 299 estudios con igual número de perforaciones, es decir, de 75 nuevos registros.

3.4 GEORREFERENCIACIÓN (TRANSFORMACIÓN)

La Georreferenciación es el proceso de describir la localización correcta y forma de los rasgos de la información, típicamente por asignación de coordenadas de un sistema de referencia conocido, tales como latitud y longitud, UTM (Universal Transverse Mercator) o proyección de condición plana. La georreferenciación permite la adecuada integración de varios tipos de datos independientes mediante coberturas de información geográfica.

Este proceso requiere de una estructura o soporte para definir la localización de los datos en el mundo real, para lo cual se puede emplear un sistema de coordenadas geográficas y así asignar la localización geográfica de un objeto. Un sistema de coordenadas global de latitud y longitud es una de tales estructuras o soportes para la localización, entre otros sistemas como el planar o proyectado, derivados del global.

En relación con las bases cartográficas o coberturas geográficas disponibles (Tabla 2), el identificador del sistema de coordenadas de referencia corresponde a EPSG: 8307 – MAGNA BOGOTA, Planas cartesianas (proyección Transverse Mercator).

En cuanto a lo que es la georreferenciación propiamente dicha, no se ha referenciado la información suministrada, lo que se realizó fue un proceso de transformación geográfica o corrección del sistema de coordenadas de la base de datos geotécnica, pues la localización de todos los puntos de exploración se encuentran en otro sistema (BOGOTA - BOGOTA). Esta actividad puede implicar en algunos casos la traslación de ejes (x, y, z) en cierta magnitud de distancia, su, ajustes por diferencia escala (ppm), o hasta la traslación de los ejes de origen (x_0, y_0, z_0).

Respecto de la información que se encuentra consignada en hojas electrónicas (formato Excel) y que contienen datos de coordenadas Norte y Este, se procedió a convertir estos datos alfanuméricos en coberturas de información de puntos y formato "shapefile", con ayuda del software ArcGIS v.9.3.

Desde el programa de manejo del SIG se adiciona la tabla de datos alfanuméricos que se desea convertir en cobertura, se procede a visualizarlos como datos X-Y y se especifica el atributo de la tabla origen que contiene la coordenadas X y Y, seleccionando el sistema de coordenadas utilizado. De esta forma se transforman y obtienen los datos como puntos y se exportan como una cobertura "shapefile". En las siguientes Figuras se resume el procedimiento básico realizado para la conversión.

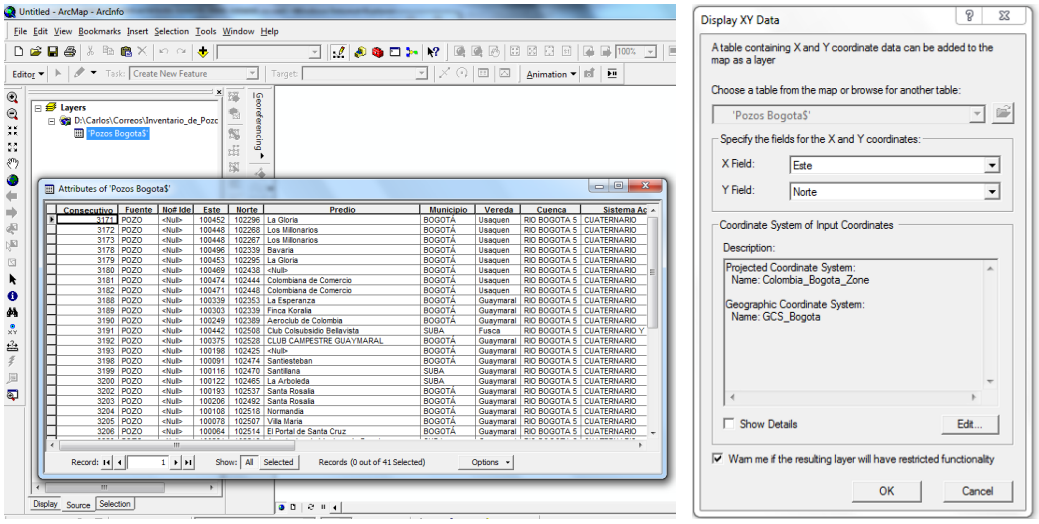


Figura 6. Tabla de datos origen y especificación de atributos para conversión.

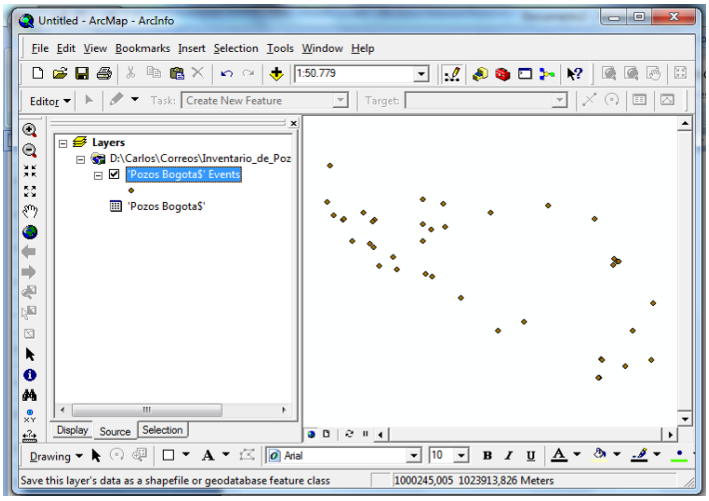


Figura 7. Conversión de datos alfanuméricos a puntos y obtención de cobertura.

3.5 ESTUDIOS RECOPILADOS

A continuación se resumen los aspectos más importantes de la información secundaria recopilada para el proyecto como antecedentes del estudio de modelación geotécnica del fenómeno de subsidencia.

3.5.1 Estudio de Interferometría Diferencial DinSAR (ICC-FOPAE)

En relación con los estudios previos para el conocimiento del fenómeno de subsidencia en la ciudad, el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias – FOPAE – ha adelantado los estudios que se relacionan en la siguiente Tabla:

Tabla 4. Estudios previos contratados por el FOPAE para evaluación de la subsidencia.

Autor	Nombre del Estudio	Año
Instituto Cartográfico de Catalunya – ICC	Estudio Interferométrico Diferencial SAR (DInSAR) que permitiera determinar la evolución de las subsidencias del terreno en la ciudad de Bogotá en un periodo de tiempo comprendido entre el año 1992 y el año 2005	2006
Instituto Cartográfico de Catalunya – ICC	Estudio Interferométrico 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 de masa	2008

Estos estudios se realizaron con el propósito de determinar la evolución de la subsidencia del terreno en la ciudad de Bogotá utilizando imágenes de radar satélites en dos periodos de tiempo comprendidos entre los años 1992 y 2005 y junio de 2008 y enero de 2009.

De acuerdo con los resultados de este estudio, se identificaron velocidades de subsidencia entre 1 cm y 7 cm por año para el área urbana de la ciudad de Bogotá (tasas de subsidencia de hasta 7.0 cm/año en la parte centro, noroeste y suroeste de la ciudad), con magnitudes totales de deformación entre 40 y 80 cm durante el período de evaluación, por lo que, según esta información, es claro que están ocurriendo procesos de subsidencia muy importantes que se concentran en unas zonas más que otras pero que corresponden a un fenómeno generalizado que puede generar una grave afectación sobre obras de infraestructura de la ciudad, en particular sobre redes de servicios públicos, vías y edificaciones.

3.5.2 Nivelaciones en la red geodésica de Bogotá (IGAC)

En lo relacionado con los datos de la nivelación geométrica que corresponden a dos campañas realizadas en abril del 2003 y entre el 5 de julio y el 24 de agosto del 2007 en la red geodésica de Bogotá del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), se observa que las desviaciones estándar de estas medidas oscilan entre los 2 mm y 4 mm.

De estas mediciones se obtuvo que las mayores variaciones en las nivelaciones para el período de estudio se presentaron para la zona occidental de la ciudad, específicamente en los puntos próximos a la Avenida Ciudad de Cali y la Calle 26 (estación BOGOTA-9), hacia el sector Suba Compartir (BOGOTA-3) y al costado sur del aeropuerto El Dorado (estación BOGOTA-8), con diferencias de nivel registradas entre los 33 y 110 mm/año.

De la comparación entre los resultados obtenidos a partir de la técnica DInSAR y de las nivelaciones de la red geodésica de Bogotá del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) se encontró que el carácter de la deformación (subsidencia o elevación) coincide en 32 de los 35 puntos coincidentes de la red.

La media del error de es -0.3 cm y su desviación estándar es de 3.2 cm. Sólo 1 de los 35 puntos coincidentes muestra un error por encima de los 10 cm mientras que el 8.5% de las muestras (3 sobre 35) muestran un error por encima de los 5 cm. A su vez, excluyendo el punto con error mayor de 10 cm, la media se puede considerar nula y la desviación estándar baja a 2.6 cm (Fopae-ICC,2008. Blanco et al, 2010).

3.5.3 Caracterización climática de Bogotá (IDEAM - FOPAE)

En el *"Estudio de la caracterización climática de Bogotá y la cuenca alta del río Tunjuelo"*, realizado por el IDEAM y el FOPAE en el año 2007, se presenta la caracterización climática del Distrito Capital con el objeto de conocer la situación actual y los aspectos concernientes al clima y las condiciones meteorológicas existentes en la zona de estudio, así como las condiciones, seguimientos, generalidades de las diferentes variables y parámetros que influyen en el comportamiento del clima en el área de Bogotá y la cuenca alta del río Tunjuelo.

En este estudio se presentan inicialmente aspectos generales de la zona de interés, en lo relacionado a su descripción como la localización, entorno geológico y geomorfológico, hidrografía, y aspectos ecológicos y de desarrollo espacial, igualmente se presentan los trabajos de compilación y análisis de antecedentes e información secundaria.

Para su ejecución se tuvo en cuenta el análisis de las diferentes variables climatológicas (temperatura, humedad, brillo solar, radiación solar, evaporación, nubosidad, presión atmosférica, precipitación, vientos, nivel ceráunico y nieblas o neblinas), para lo cual se realizaron procesos estadísticos dirigidos a establecer el comportamiento de cada uno de estos elementos y su distribución espacio temporal, al igual que el análisis de los eventos significativos de desbordamiento del río Tunjuelo, para la posterior clasificación climática del área de estudio en diferentes zonas.

Se elaboraron veinte (20) mapas de referencia como resultado de la investigación, entre los que se destacan los de distribuciones de las estaciones meteorológicas, del brillo solar, espacio – temporal de la precipitación media mensual, precipitación media anual, precipitación media mensual para los doce meses, y de la distribución espacial del comportamiento del flujo de viento en Bogotá.

Entre algunas de las conclusiones de este estudio se destacan:

- La temperatura media presenta valores con poca variación durante el año, de 12ºC a 15ºC en el área urbana, pero en los Cerros Orientales y la cuenca alta del río Tunjuelo, se observan temperaturas que alcanzan valores medios de 5ºC a 6ºC.
- La humedad relativa media anual se distribuye entre el 73% y 86%, y sus valores están condicionados a las incidencias de los comportamientos de las demás variables meteorológicas.
- La distribución espacial del brillo solar en la ciudad de Bogotá no es uniforme y por el contrario existen zonas en sentido longitudinal bien diferenciadas.
- En lo referente a la evaporación, esta variable presenta en la mayor parte de la ciudad valores más altos para los meses de enero, febrero y marzo. Los meses de

menor evaporación lo constituyen abril, mayo, octubre y noviembre, en consideración a la disminución de horas de sol y al aumento de lluvias para estos meses considerados de invierno.

- El cubrimiento total de la nubosidad presenta los meses de enero y febrero como los característicos con cielos más despejados en el año, presentando 67% de cielos entre despejados a parcialmente cubiertos. En tanto, abril, mayo, junio y octubre son meses que alcanzan mayor cubrimiento de nubosidad entre mayormente nublado a nublado con 54% del cielo cubierto.
- El área de estudio ofrece regímenes pluviométricos variados, estableciendo en la mayor parte de la zona urbana de Bogotá un régimen de carácter bimodal, entre tanto, en el sector sureste de la ciudad y la cuenca alta del río Tunjuelo se caracteriza por régimen monomodal, y un tercer sistema de transición aparece en sector medio de la cuenca y en los sectores del centro y sur de los Cerros Orientales.
- De acuerdo con la clasificación climática de Thornthwaite, se estableció un análisis para el área de Bogotá y la cuenca alta del río Tunjuelo, diferenciando varios tipos de clima a saber: Semiseco, Semihúmedo, Ligeramente Húmedo, Moderadamente Húmedo, Húmedo, Muy Húmedo y Súper Húmedo.

En las siguientes figuras se presentan algunos de los mapas producto de estudio.

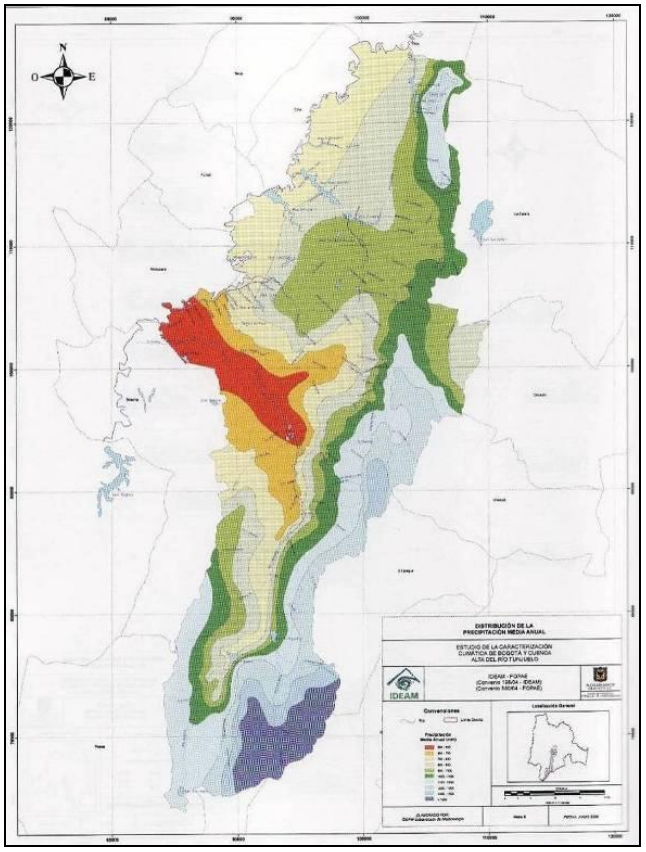


Figura 8. Distribución de la precipitación media anual en la zona (IDEAM – FOPAE 2007).

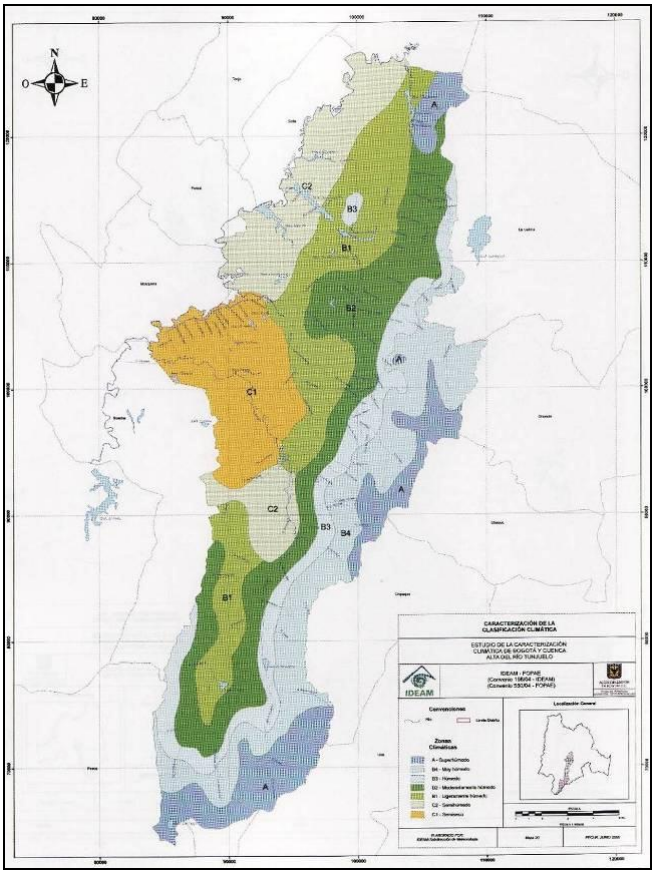


Figura 9. Caracterización de la clasificación climática en Bogotá (IDEAM – FOPAE 2007).

3.5.4 Microzonificación Sísmica de Bogotá (INGEOMINAS, 1997)

La información contenida en el informe del estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá, realizado por INGEOMINAS y la Universidad de los Andes entre 1994 y 1997, corresponde a los aspectos de evaluación de la amenaza sísmica regional, las características del subsuelo de la ciudad en cuanto a geología, estudios geofísicos y zonificación geotécnica, la microzonificación sísmica de Bogotá, la vulnerabilidad sísmica urbana de la ciudad, conclusiones y recomendaciones.

De este estudio se definieron cinco zonas de comportamiento homogéneo (Cerros, Piedemonte, Lacustre A, Lacustre B y Terrazas y conos), caracterizadas por parámetros particulares útiles para el diseño y construcción de edificaciones y líneas vitales.

Los productos incluidos en la información suministrada del estudio de MZSB comprenden:

- ✓ Mapa geológico de Bogotá; planta general y dos cortes oeste - este.
- ✓ Mapa hidrogeológico de Bogotá (1996); planta general y dos cortes.
- ✓ Mapa de zonificación geotécnica.
- ✓ Mapa de microzonificación sísmica.

En la Figura 10 se aprecia el mapa de zonificación geotécnica propuesto para Bogotá. En el Anexo # 1 se presentan los cortes del modelo hidrogeológico propuesto.

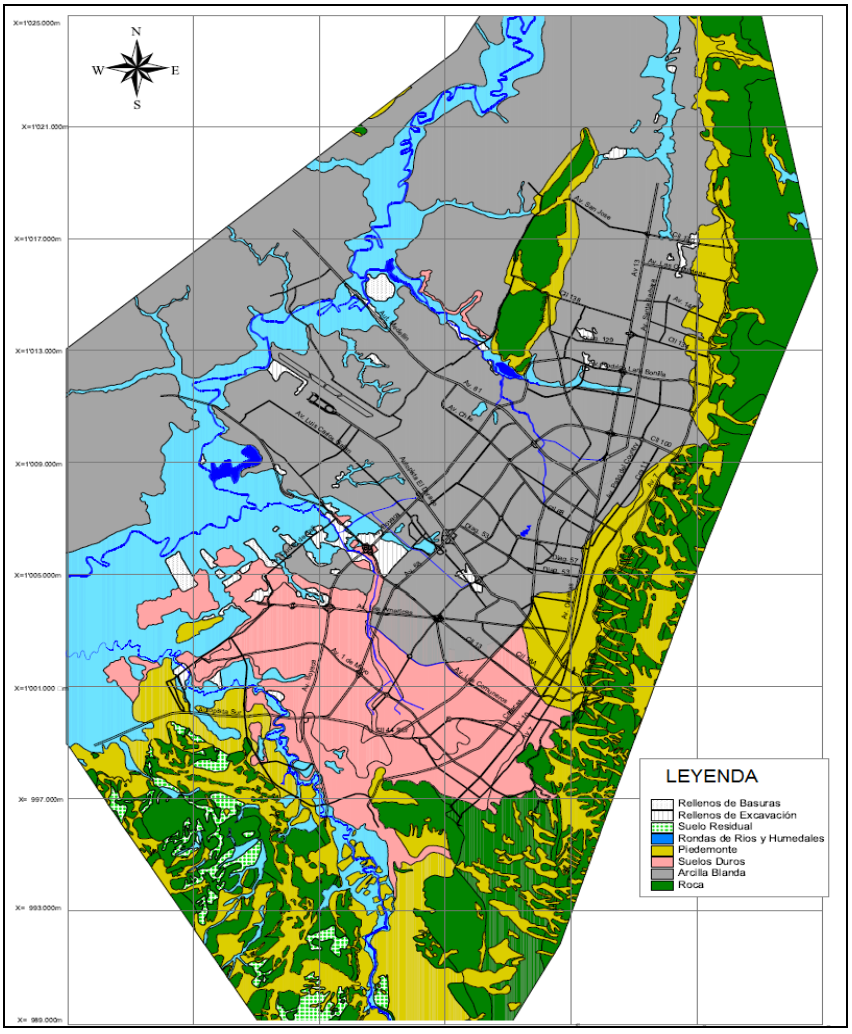


Figura 10. Mapa de zonificación geotécnica de Bogotá (INGEOMINAS, 1997).

3.5.5 Balances hídricos de la Sabana de Bogotá (INGEOMINAS)

Este informe corresponde a los *"Balances hídricos en la zona suroccidental de la Sabana de Bogotá con énfasis en la hidrología subterránea"*, estudio realizado por INGEOMINAS y la CAR en 1987 (proyecto PIC 2).

Se incluyen aspectos sobre la localización y delimitación de la cuenca de estudio, la conceptualización del balance hídrico a nivel anual (teoría del balance hídrico y la ecuación de balance), la evapotranspiración real media anual en Sabana de Bogotá y consideraciones referentes a la infiltración efectiva, consumo humano e industrial, precipitación, escorrentía y evaporación de agua libre, cálculos de la evapotranspiración real media anual las cuencas de los ríos Bojacá, Subachoque y Chicú, la infiltración

potencial media anual en el Grupo Guadalupe en las zonas de los ríos Bogotá (Cota, Chía y Cajicá), Bojacá (Facatativá, Bojacá, Madrid, Mosquera, Funza y Fontibón), Subachoque (Subachoque, La Pradera y El Rosal) y Chicú (Tabio y Tenjo).

Los balances hídricos en la zona suroccidental de la Sabana de Bogotá se realizaron mediante el análisis de la hidrología superficial a nivel anual durante el periodo de 1964 a 1983, calculando la infiltración potencial en los afloramientos del Grupo Guadalupe. Los resultados obtenidos son de 316.8 lt/s para la zona central del río Bogotá, 23.3 lt/s para la zona del río Chicú, 1,202.8 lt/s para la zona del río Subachoque y de 530 lt/s para la zona del río Bojacá.

Los productos incluidos en la información suministrada de este estudio comprenden:

- ✓ Mapa de precipitación media anual de la Sabana de Bogotá (1964-1983)
- ✓ Mapa de evaporación media anual de la Sabana de Bogotá (1964-1983)
- ✓ Mapas geológicos con localización de pozos, aljibes, manantiales y diagramas Stiff
- ✓ Mapa de zonas de infiltración del acuífero Guadalupe

3.5.6 Modelos hidrogeológicos de la Sabana y la ciudad de Bogotá

3.5.6.1 Modelo hidrogeológico de la Sabana de Bogotá (INGEOMINAS)

Esta información corresponde al informe técnico final del proyecto *"Aplicación de Técnicas Isotópicas en los Estudios de Aguas Subterráneas"* para la definición del modelo hidrogeológico conceptual de la Sabana de Bogotá", elaborado por el grupo de aguas subterráneas de INGEOMINAS en 2002.

El objeto de este estudio fue precisar el modelo hidrogeológico conceptual de la Sabana de Bogotá, contribuyendo al conocimiento del recurso hídrico subterráneo, además de conocer el manejo de las técnicas isotópicas para su aplicación en la solución de problemas específicos en los estudios de aguas subterráneas.

Con base en la información evaluada en este estudio se definió el Modelo Hidrogeológico Conceptual para el área de la Sabana de Bogotá, clasificando esta zona como una cuenca artesiana que consta de una cobertura (Complejo Acuífero de Depósitos in consolidados Neógeno-Cuaternario **NgQ** y Complejo Acuitardo del Paleógeno **Pg**) y un piso (Complejo Acuífero Guadalupe **Kg**).

Basándose en un análisis estructural, se definió la estructura de bloques como una de las particularidades más importantes de la cuenca artesiana. Dicha estructura provoca la discontinuidad de las diferentes unidades hidroestratigráficas, además determina el espesor muy variable de los depósitos no consolidados.

Se estableció la Discontinuidad lateral y vertical de las rocas que componen el Complejo Acuitardo Paleógeno **Pg**, restringiéndose la presencia de estas rocas básicamente a lo largo del borde oriental de la cuenca artesiana.

Se plantea el sistema hidrodinámico de la cuenca artesiana, con dos principales zonas de recarga (interior y exterior), zonas de almacenamiento (flujo artesiano) y de descarga de aguas subterráneas; ver detalles en la Figura 11.

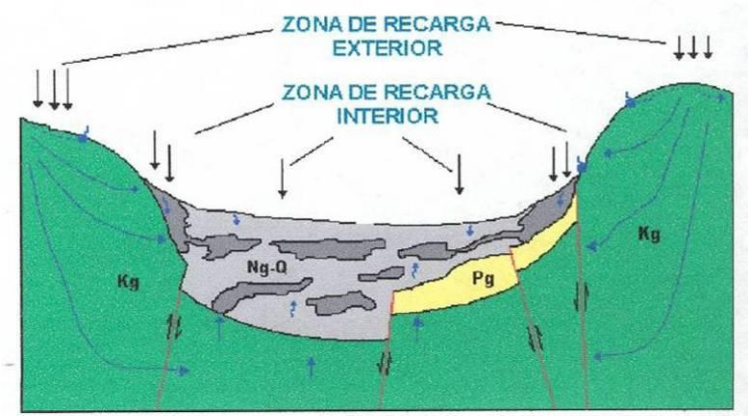


Figura 11. Esquema de la cuenca artesiana de la Sabana de Bogotá (INGEOMINAS, 2002).

Los dos sistemas de flujo (ascendentes y descendentes) que se generan dentro de la cuenca artesiana y una particular estructura de la misma, permiten la interconexión entre los principales complejos acuíferos.

Los productos incluidos en la información suministrada comprenden:

- ✓ Mapa de Isopacas (espesor de los depósitos no consolidados en la parte central de la Sabana de Bogotá)
- ✓ Mapa de los depósitos Precuaternarios
- ✓ Mapa Hidrogeológico de la Sabana de Bogotá (planta general y cuatro cortes)
- ✓ Mapa de los parámetros hidráulicos del complejo acuífero de los depósitos no consolidados Neógeno-Cuaternarios
- ✓ Mapa de parámetros hidráulicos del complejo acuífero Guadalupe.

En el Anexo # 2 al final de este informe se incluyen las características de las unidades hidrogeológicas del modelo conceptual propuesto por INGEOMINAS.

3.5.6.2 Modelo hidrogeológico EAAB (JICA, 2009)

- **Aspectos geológicos y topografía**

El área de estudio está limitada por los Cerros Orientales y por los cerros de la estribación Occidental de la Cordillera Oriental. Esta cuenca se denomina Sabana de Bogotá. Su elevación está entre 2.500 y 2.600 m.s.n.m. y la superficie dominante del terreno es casi plana. El lado oriental y norte de la cuenca forman pendientes marcadas que determinan la cresta principal de la Cordillera Oriental. En cuanto a la vertiente sur y occidente, las montañas y cerros se dividen con una pendiente suave hacia la Sabana.

El área de estudio consta de dos partes. Una de ellas es el área de montañas que atraviesa de sur a norte el lado oriental de la Sabana de Bogotá (llamada "Área de los Cerros Orientales"). La otra es el cerro que se extiende en la parte sur de la Sabana de Bogotá (llamada "Área de los Cerros Sur").

El mapa geológico de la Sabana de Bogotá donde se encuentra el área de estudio se muestra en la Figura-2.1-12. La Sabana de Bogotá está compuesta de rocas sedimentarias y sedimentos del Cretáceo-Cuaternario con ausencia de rocas ígneas. En el área de estudio se encuentran formaciones superiores a la Formación Chipaque del Cretáceo. La estructura geológica se caracteriza por la repetición anticlinal y sinclinal con ejes en dirección NNE-SSW o NE-SW. La falla de gran escala es principalmente longitudinal a lo largo de la estructura geológica tal como se ha mencionado. Sin embargo la estructura geológica del área de los Cerros del Sur es irregular en parte por una falla en dirección NW-SE. Los rasgos geológicos del Cretácico y del Cuaternario en el área de estudio se resumen a continuación.

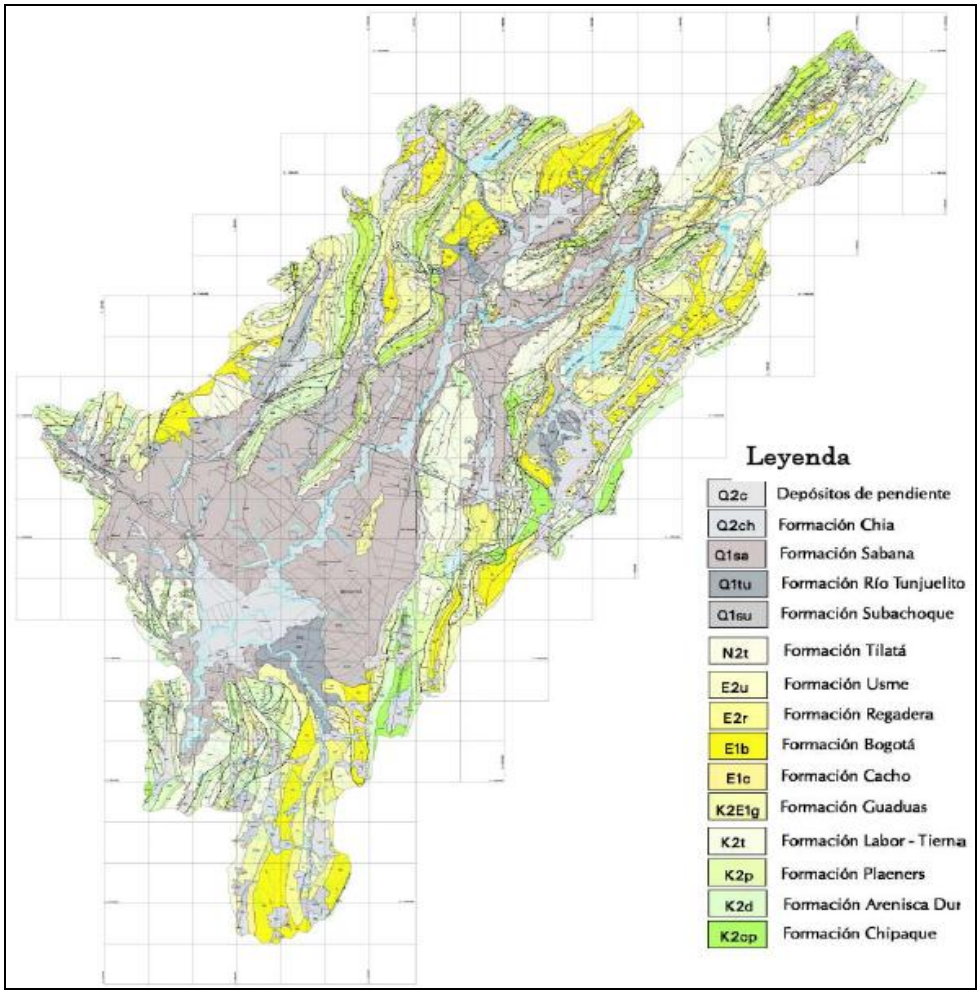


Figura 12. Mapa geológico del área de estudio EAAB-JICA (2009). Fuente: INGEOMINAS.

a) El Cretáceo

El Cretáceo en el área de estudio se divide en cuatro formaciones: Formación Chipaque, Formación Arenisca Dura, Formación Plaeners y Formación Labor-Tierna en la parte inferior. El origen de todas ellas es de sedimentos marinos y de las rocas de sal de Zipaquirá al norte de Bogotá las cuales fueron formadas en el mar Cretácico.

La Formación Chipaque consta principalmente de arcillolitas con presencia ocasional de arenisca, lodolitas y limolitas silíceas; el espesor es de alrededor de 1.000 m y puede ser clasificada desde el punto de vista hidrogeológico como una barrera impermeable. La Formación Arenisca Dura está compuestas por capas gruesas de areniscas intercaladas con pequeñas de lodolitas y capas cherts; el espesor es alrededor de 320 m y se puede formar un excelente acuífero por generación de porosidad secundaria por fracturamiento. La Formación Plaeners consta principalmente de capas delgadas de lodolitas y limolitas, ocasionales de chart y areniscas en menor proporción con un espesor de casi 100 m; puede ser considerada como una capa semi-impermeable. La Formación Labor-Tierna consta principalmente de areniscas intercaladas con lodositas; el espesor es de 100 m y se puede formar un excelente acuífero por el desarrollo de grietas.

b) Terciario

El Terciario está dividido en cinco formaciones desde la base a la superficie: Formación Guaduas, Formación Cacho, Formación Bogotá, Formación La Regadera y Formación Usme en la parte inferior. Se localiza en el piedemonte de los Cerros Orientales formando una topografía suavemente ondulada, la cual contrasta con la topografía escarpada del Cretáceo en los Cerros Orientales. La Formación Usme como el tope del Terciario está distribuida únicamente en la Cuenca del río Tunjuelo en la parte sur del área de estudio. Los estratos después de la Formación Usme son sedimentos continentales porque el movimiento orogénico comenzó en la mitad del Paleoceno. Se piensa que el Cretácico fue cubierto ampliamente por la formación marina de Guaduas en un comienzo, pero luego la formación Guaduas fue erosionada por eventos glaciales. Actualmente el Cretáceo está expuesto directamente en la mayor parte de las montañas en el área de estudio.

c) Cuaternario

El Cuaternario en el área de estudio consiste de la Formación Tilatá del Pleistoceno y del Aluvión del Holoceno. El Cuaternario conforma la parte plana en el área de estudio. El Cretácico y el Terciario fueron ampliamente erosionados por glaciares en el Pleistoceno. Ahora los sedimentos gruesos de glaciar se acumulan en la Sabana de Bogotá.

- **Hidrogeología**

Cada estrato distribuido en el Área de Estudio está caracterizado por su edad geológica y faces de sus rocas. Se clasifican de acuerdo a su carácter hidrogeológico como se muestra en la Tabla 5.

✓ Características de los Acuíferos

Los acuíferos en el área del estudio se clasifican en tres tipos: Acuífero Cuaternario, Terciario y Cretáceo, los cuales consisten de formaciones permeables e impermeables

intercaladas, por lo tanto los acuíferos están limitados a las formaciones permeables en ellos.

Tabla 5. Clasificación de acuíferos en el área de estudio EAAB-JICA (2009). Fuente: JICA.

Edad		Estratigrafía	Facies de las Rocas	Modo	Permeabilidad General
Cuaternario	Holoceno	Aluvial	Arcilla, limos, arena, grava	Medio Poroso	Alta-Baja
	Pleistoceno	Formación Terraza	Arcilla, arenisca arcillosa, arena		Media-Baja
		Formación Sabana	Arcilla, arenisca arcillosa, arena		Media-Baja
		Formación Tilatá	Arena y grava,		Alta
			limos, arcilla (consolidada)		
Terciario	Oligoceno	Formación Usme	Arcillolita	Medio Poroso – Fisurado	Baja
	Eoceno	Formación Regadera	Arenisca, conglomerado, Arcillolita	Medio Fisurado	Baja
		Formación Bogotá	Arcillolita, caliza , arenisca		Media-Baja
	Paleoceno	Formación Cacho	Arenisca, conglomerado	Medio Fisurado	Alta
		Formación Guaduas	Arcillolita, lutita fisil		Media-Baja
Cretáceo		Grupo Guadalupe	Arenisca, limolita, lutita fisil		Alta-Baja
		Formación Chipaque	Lutita fisil, arenisca		Baja

Acuífero Cuaternario

El agua subterránea actualmente bombeada por los pozos en el área de estudio está almacenada en capas de arena y grava de la Formación Sabana. El Acuífero Cuaternario consiste de capas de arena y grava que se distribuyen irregularmente a diferentes profundidades con pobre continuidad.

Acuífero Terciario

El Terciario consiste principalmente de sedimentos arcillosos. Sólo pequeños estratos de arena y grava incluidos localmente en el estrato arcilloso pueden formar el acuífero. El desarrollo a gran escala de agua subterránea en el Terciario es difícil ya que el acuífero es muy pequeño.

Acuífero Cretáceo

El sistema Cretáceo consiste del Grupo Guadalupe (Formación Labor-Tierna, Formación Plaeners y Formación Arenisca Dura) y la Formación Chipaque. El Grupo Guadalupe forma un excelente acuífero incluyendo formación de arena. Por otro lado la Formación Chipaque consiste principalmente de lutita y no se considera como un buen acuífero.

- ✓ Estructura Hidrogeológica

La estructura hidrogeológica del área de estudio esta fuertemente dominada por una estructura geológica complicada, donde la distribución y continuidad de acuíferos esta

influenciada por fallas y plegamientos. Al parecer los acuíferos Cuaternario, Terciario y Cretáceo forman acuíferos confinados. El acuífero superficial del Cuaternario al parecer forma un pequeño acuífero no-confinado.

El agua subterránea está también confinada en los acuíferos Terciario y Cuaternario. El nivel estático de agua subterránea del Cuaternario, Terciario y Cretáceo esta entre los -50 m y -20 m del nivel del suelo. Aunque la profundidad de estos acuíferos es diferente, sus niveles estáticos de agua subterránea son similares. Esto sugiere que existe una conexión hidrogeológica entre los tres acuíferos.

- **Distribución del Acuífero – Aguas subterráneas**

De igual forma que las características topográficas reflejan su geología, la distribución del acuífero también esta estrechamente ligada con las características topográficas. El área de distribución del acuífero Cretáceo forma montañas empinadas generalmente. Por otro lado el área de distribución del acuífero Terciario forma piedemonte con una pequeña pendiente. En cuanto a el área de distribución del acuífero Cuaternario, ésta forma una planicie de baja altitud (ver Figura 13).

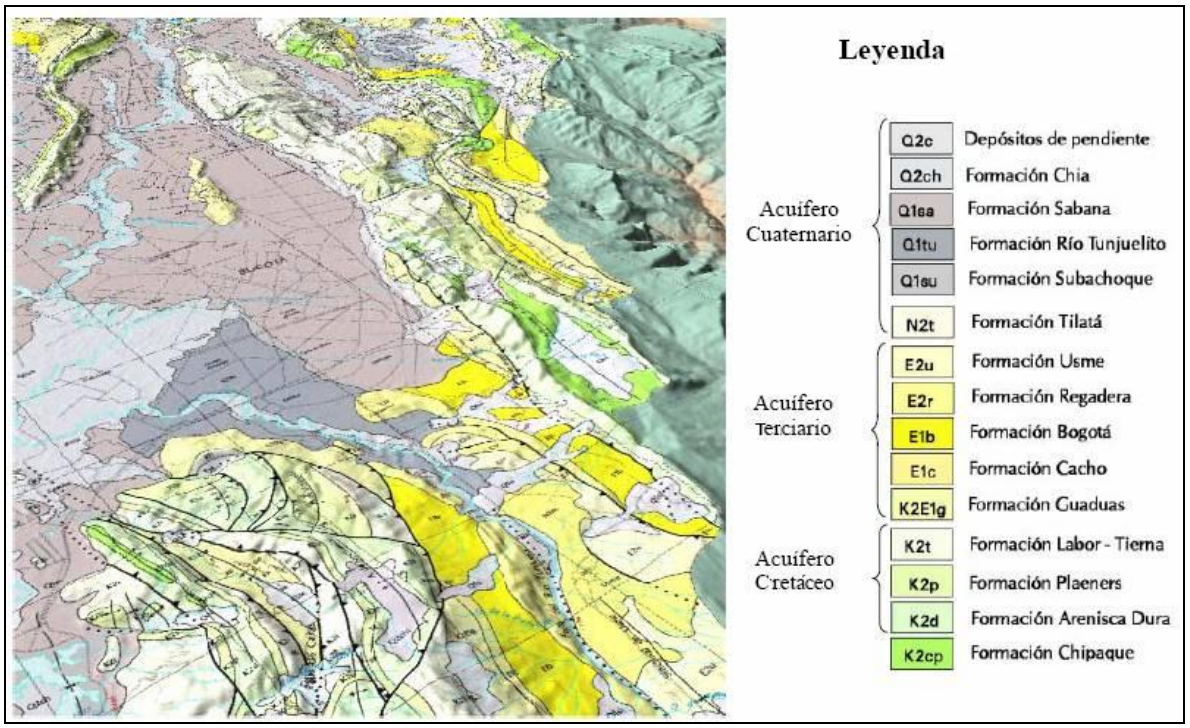


Figura 13. Relación entre la topografía y la distribución de los acuíferos. Fuente: EAAB-JICA (2009).

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

Agua subterránea en las Rocas (medios agrietados)

Las observaciones de campo de las pendientes de grandes excavaciones, túneles o minas, permiten caracterizar experimentalmente el flujo del agua subterránea dentro de la masa de rocas:

i) El agua subterránea fluye a lo largo de la grieta en el macizo rocoso (surgiendo de la grieta).
ii) Algunas grietas proveen gran cantidad de agua, mientras otras no, aunque se observan en el mismo plano de fractura y a la misma altura.
iii) Se puede presentar una brecha entre el nivel de agua subterránea en ambos niveles de una falla, dependiendo de la permeabilidad de la falla (ya sea para sellar un flujo o controlar la dirección del flujo).
iv) La zona de fractura a lo largo de la falla puede convertirse en la ruta principal de flujo de agua subterránea.
v) El agua subterránea puede fluir fácilmente a través de una grieta abierta (en donde una grieta abierta es una grieta de tensión en el sentido amplio, creada bajo condiciones de tensión).

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

Estratos con buenas condiciones de Almacenamiento de Agua Subterránea

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

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

Estructuras geológicas con buenas condiciones para Almacenar Agua Subterránea

Generalmente, una zona de fractura a lo largo de una falla se conoce como la posición geotectónica donde se forman muchas grietas en una masa de rocas. Adicionalmente, una grieta abierta frecuentemente se desarrolla cerca de un eje anticlinal, lo que se considera como un excelente acuífero. Esta condición geológica es deseable para la existencia de un acuífero. Sin embargo, para que exista presencia de agua subterránea se necesita una cuenca de captación que pueda suministrar suficiente agua al acuífero. Dado que la cuenca de captación de agua subterránea (cuenca de agua subterránea) está delimitada por la estructura hidrogeológica, el área de la cuenca de agua subterránea no es siempre la misma que la cuenca del río, pero a menudo ocurre que la cuenca del río es la misma cuenca de agua subterránea en zona montañosa que consiste en masa de rocas. Ver detalles en la Figura 14.

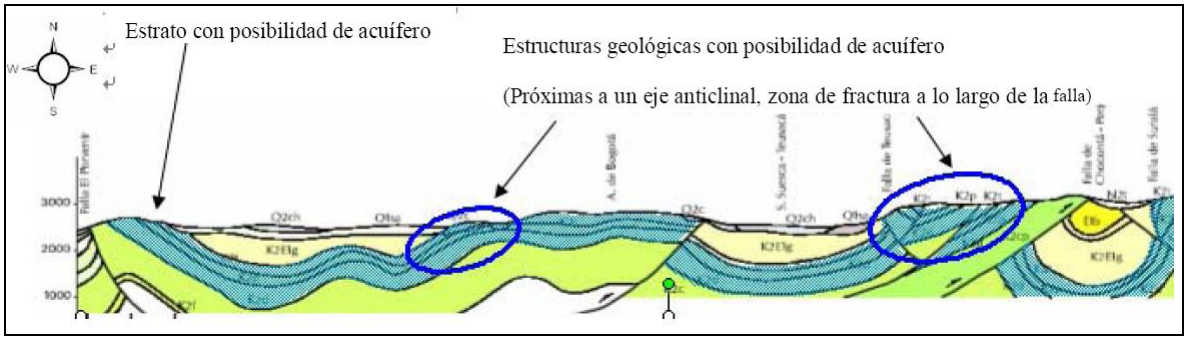


Figura 14. Estructura hidrogeológica del área de estudio EAAB-JICA (2009). Fuente: INGEOMINAS.

- **Diseño del Modelo de Simulación de Aguas Subterránea**

✓ Modelo Conceptual

Dentro del modelo de simulación de aguas subterráneas del estudio (EAAB-JICA, 2009) se asumieron los siguientes supuestos según algunas consideraciones hidrogeológicas.

Ríos

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

Distribución del Acuífero

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

Recarga / Dirección del flujo / Niveles Subterráneos

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

Zona Vadosa

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

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

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

✓ Estructura / Parámetros / Condiciones Límites del Modelo

La información básica del modelo del estudio EAAB-JICA (2009) se presenta en la siguiente Tabla.

Tabla 6. Diseño del modelo de simulación de agua subterránea. Fuente: EAAB-JICA (2009).

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

Nota: En donde **GHB** es el Límite General de Cabezas Hidráulicas (General Head Boundary), dependiente de la capa externa. Las conductividades hidráulicas son los valores iniciales, con **K_V = 0,10 x K_H**.

3.5.6.3 Otros modelos hidrogeológicos (CAR, SDA)

De forma preliminar se logró obtener información parcial disponible en la Web sobre otros dos estudios realizados para evaluar las características hidrogeológicas de la Sabana y en especial de la ciudad de Bogotá. Esta información se obtuvo previa a la respuesta formal de las solicitudes. Estos estudios son:

- Mapa de Unidades Hidrogeológicas, parte del proyecto "Plan de manejo de la reserva forestal protectora bosque oriental de Bogotá", elaborado por la CAR (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca) en el 2006.

- "Elaboración del Modelo Hidrogeológico para los Acuíferos de Santa Fe de Bogotá", elaborado por el Departamento Administrativo de Medio Ambiente DAMA (hoy SDA, Secretaria Distrital de Ambiente) y la firma Hidrogeocol Ltda. en el 2000, con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo en Colombia (PNUD).

El primer estudio corresponde a un mapa de las principales unidades hidrogeológicas identificadas en el costado oriental de la ciudad de Bogotá, indicándose su extensión y el porcentaje de cobertura en el área de evaluación. Se identifican en esencia seis unidades hidrogeológicas: Acuífero Cuaternario (Ac), Acuitardo Bogotá (ACb), Acuitardo Guaduas (ACg), Acuífero Cacho (Ach), Acuífero Labor-Tierna (Aclt) y Acuífero Dura Plaeners (Acpad); ver detalles en el Anexo # 3.

El segundo estudio corresponde al informe final de elaboración del modelo hidrogeológico conceptual y numérico de los acuíferos de Bogotá, con el cual se pretende contar con una herramienta operacional de análisis para los acuíferos de la ciudad y que permita dar un manejo eficiente a los recursos hídricos subterráneos.

Teniendo en cuenta que en las unidades hidrogeológicas mencionadas previamente emplean los términos acuífero y acuitardo, es conveniente aclarar que por definición un Acuífero es un estrato o formación geológica permeable que permite la fácil circulación y almacenamiento del agua subterránea por sus poros, discontinuidades, grietas, etc., es decir que se trata de materiales en general granulares, mientras que un Acuitardo es una formación que contiene agua pero que la transmite muy lentamente (por "goteo") y en general se asocia a la presencia de suelos finos.

3.5.7 Deformaciones corticales a partir de información satelital

A partir del trabajo de Téllez P. (2009) sobre el análisis de deformación en la zona andina con base en las velocidades corticales derivadas de Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS), se extrae en cuanto a la configuración tectónica y la deformación que el modelo de interacción entre placas en el noroccidente de Suramérica basado en datos GPS más difundido plantea un movimiento hacia el este de la placa de Nazca a una tasa de 6 cm/año y un movimiento de la placa Caribe hacia el E-SE a una tasa de 1-2 cm/año con respecto a la placa de Suramérica.

Teniendo en cuenta los análisis presentados por Téllez P. (2009) en relación con vectores de velocidad de las estaciones evaluadas y las incertidumbres asociadas, el movimiento relativo con respecto a la Placa de Suramérica en la zona Andina y sus alrededores se puede resumir así: El Bloque Panamá se desplaza a razón de 24.9 mm/año en dirección E-NE, la Placa Caribe a 16.2 mm/año hacia el E-NE, la Placa de Nazca con velocidad de 54.7 mm/año hacia el E, y la Cordillera con velocidad de 6.3 mm/año hacia el NE. La Costa Pacífica presenta un comportamiento diferente para cada una de las estaciones relacionado con la subducción diferencial de la Placa de Nazca bajo la Costa Pacífica

colombiana, presentando velocidades de 7.8 y 10.2 hacia el E-NE y 19.1 hacia el E-SE respectivamente.

Para la ciudad de Bogotá, las estaciones BOGA (ubicada en la terraza del edificio IGAC) y BOGT (anclada a nivel del terreno entre INGEOMINAS y la Universidad Nacional) con incertidumbres muy bajas, muestran valores notablemente distintos de las estaciones más próximas, sugiriendo efectos distintos de los tectónicos. La conformación de los suelos de la ciudad, principalmente arcillosos, podrían afectar las observaciones, en particular la subsidencia, estimada en 50 mm/año (Herrera et al., 2008). Además, la estación BOGA presenta valores algo distintos de BOGT pero muestran una tendencia similar, a pesar de estar separadas 200 m aproximadamente. Este comportamiento puede deberse a que BOGA se encuentra en un edificio de 10 pisos con problemas de subsidencia. Desde su instalación, las estaciones BOGA (año 2000) y BOGT (1996) han presentado un inusual desplazamiento vertical con respecto a estaciones de referencia (ITRF05, International Terrestrial Reference Frame 2005). La velocidad estimada del desplazamiento vertical es 54.90 ± 0.1 mm/año para la estación BOGA y de 47.80 ± 0.1 mm/año para BOGT. Por otro lado, los resultados procesados de la Red Geodésica indican comportamiento uniforme en la componente vertical del movimiento, con una tendencia del orden de 15 ± 1 mm/año, sin embardo, existen algunas áreas en la ciudad de Bogotá en donde el comportamiento es notoriamente diferente alcanzando valores de hasta 96 mm/año.

Como conclusión se resalta que los movimientos relativos entre las placas y bloques que interactúan en el noroccidente de Suramérica calculados a partir de las estaciones GNSS son consistentes con los observados por otros autores. La similitud entre los vectores de velocidad entre algunas estaciones cercanas, aparentemente relacionados con su localización sobre el mismo "terreno" geológico, y su diferenciación de las estaciones de "terrenos" distintos, sugiere que hay movimiento relativo entre algunos "terrenos" vecinos, que posiblemente se expresa como actividad a lo largo de las fallas que los separan. Esta hipótesis debe ser probada con datos más precisos y con confrontación de otro tipo de información geológica y geofísica.

Respecto del artículo de Tabares et al., (1999) sobre la actividad sísmica y la tasa de deformación sismo-tectónica en la zona del Viejo Caldas, se puede determinar además, a partir de datos de mecanismos focales, que la placa de Nazca se está subduciendo a una velocidad horizontal resultante de 41 mm/año con azimut aproximado de 133°, y con una componente vertical de hasta -9.52 mm/año, valores muy aproximados a mediciones geodésicas satelitales de alta precisión realizadas por INGEOMINAS.

3.6 INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA: PIEZÓMETROS

Otro tipo de fuente de información básica y valiosa para el estudio lo constituye la instrumentación geotécnica instalada por INGEOMINAS, la cual consiste de una serie de piezómetros localizados en diferentes sitios de la ciudad y a diferentes profundidades, cuyas características, detalles de ubicación y calibración y registros iniciales están descritos por Ávila (1998).

De esta instrumentación se tiene registro desde 1996 hasta 2004, pero a partir de 2004 no se volvieron a tomaron lecturas y sólo mediante este proyecto que adelanta la Universidad Nacional para el FOPAE se rescataron los piezómetros y se reanudaron las lecturas.

Los piezómetros instalados por INGEOMINAS en 1996 se ubicaron en algunas de las perforaciones realizadas para el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá, por lo que la selección de los sitios no obedeció específicamente a criterios hidrogeológicos sino de disponibilidad de las perforaciones profundas de interés geotécnico.

Con esta red de piezómetros se llegó hasta profundidades de 236 m y tiene como ventajas que se cuenta con un registro estratigráfico completo, el diseño de instalación de los instrumentos específicamente para propósitos de geotecnia y una lectura sistemática para el período de registro. Fueron instalados 21 piezómetros, entre equipos de cuerda vibrante y de tubo abierto tipo Casagrande, cada uno de lectura independiente a diferentes profundidades, en 6 perforaciones localizadas en diversos lugares de la ciudad (Ingeominas, Aeropuerto El Dorado CNA, Parque Timiza, Suba, Universidad Agraria y hacia la Calle 127 con Carrera 20).

Entre algunas de las conclusiones obtenidas de este estudio reportadas por Ávila (1998), en relación al análisis de resultados, se puede mencionar que la presión del agua en el subsuelo de la ciudad de Bogotá para profundidades entre 50 m y 250 m tiende a ser inferior que la correspondiente presión hidrostática y esta diferencia aumenta con la profundidad, de tal manera que se observan descensos de presión hasta de 22 m, lo cual necesariamente debe ocasionar descensos en los niveles freáticos y por lo tanto consolidación del suelo.

Igualmente se indica que los datos analizados en un periodo de medición entre 2 y 3 años permiten evidenciar que hay una tendencia generalizada en la reducción en las presiones de poros en profundidad y que no es obvia una recuperación de carácter estacional, claro que debido a la baja permeabilidad de los materiales, es posible que exista un desfase de varios años entre los regímenes de lluvia y los cambios de presión del agua subterránea identificados.

Esta información constituye un dato de entrada importante para poder refinar el modelo hidrogeológico de la Sabana de Bogotá y en particular de la ciudad, el cual presenta varias incertidumbres que se deben aclarar para evaluar el fenómeno de subsidencia.

Como tarea prioritaria de este estudio se han adelantado visitas para evaluar el estado de esta instrumentación para su eventual ajuste o mantenimiento y efectuar la actualización de los registros de monitoreo.

4 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN RECOPILADA

4.1 MODELOS HIDROGEOLÓGICOS REVISADOS

A continuación se indican brevemente los aspectos esenciales que para el análisis de subsidencia tienen los distintos estudios y modelos hidrogeológicos que se consultaron, sin que se pretenda hacer un análisis riguroso de cada uno de ellos puesto que tal propósito está fuera de los alcances del presente estudio.

4.1.1 Mapa hidrogeológico INGEOMINAS (1996)

El mapa hidrogeológico elaborado para la microzonificación sísmica del área de la ciudad de Bogotá detalla específicamente las litologías de las rocas sedimentarias y las clasifica hidrogeológicamente, además reporta varias de las estructuras geológicas existentes.

Este modelo permite observar diferentes formaciones de rocas sedimentarias. Los suelos transportados que rellenaron el antiguo lago de la sabana de Bogotá los muestra de manera global. Se presentan también dos perfiles geológicos regionales, de éstos el Perfil A-A es el más representativo del área de estudio. De acuerdo con este perfil, en la superficie del contacto discordante entre el relleno cuaternario y las rocas sedimentarias, el cuaternario está representado por las formaciones Subachoque y Sabana y las rocas sedimentarias por las formaciones Tilatá (Tqt) y Guaduas (Ktg), de estas dos la que posee algunas características de acuitardo es la Tilatá, el Guaduas es más un acuicludo.

Para las formaciones de rocas sedimentarias se presenta una diferenciación según la permeabilidad que poseen y muestra detalles del paleorelieve o superficie de contacto o frontera entre las rocas y el relleno de la Sabana de Bogotá, este paleorelive fue obtenido por prospección geofísica. La topografía del paleorelieve es básica para delimitar cuales de los pozos explotan acuíferos que hacen parte del relleno de la Sabana de Bogotá y cuales explotan los acuíferos localizados en las rocas.

En cuanto a la geología estructural del área de estudio, se reportan pliegues y fallas:

Pliegues. La depresión del antiguo lago de la Sabana de Bogotá está controlada por la existencia de dos pliegues sinclinales amplios y separados por un pliegue anticlinal que corresponde al alto topográfico del Cerro de Suba, este anticlinal está afectado en su flanco oeste por una falla geológica normal de extensión local, el bloque estructural occidental bajó. Los pliegues sinclinales facilitan la acumulación de agua en el acuitardo Tilatá y en el Grupo Guadalupe.

Fallas Geológicas. Hay dos estilos principales de fallas que podrían estar genéticamente relacionadas. Las fallas de cabalgamiento y las fallas de desplazamiento compuesto pero con predominio en el rumbo del plano de falla.

Fallas de cabalgamiento: Dentro de las fallas de cabalgamiento se destaca el sistema de fallas de Bogotá (falla de Bogotá y falla del Alto del Cabo). Estas fallas tienen tendencia en orientación noreste-suroeste y buzamiento hacia el sureste. Según observaciones de campo relacionadas a estas fallas hay franjas anchas de fractura en las rocas.

Fallas de movimiento compuesto: De este estilo de falla, en el área de estudio reportan las siguientes: Usaquén-Sasaima y San Cristobal, además hay varias fallas relacionadas a las inversiones locales que existen en los cerros de Monserrate y El Cable. Todas estas fallas tienen tendencia en orientación noroeste-sureste y buzan hacia el suroeste con buzamiento alto.

En el mapa del estudio no se detallan los tipos de sondeos ni prospección realizada para determinar los parámetros presentados en el modelo, aunque de manera general sólo se establecen espesores de cada formación y la geología estructural asociada.

4.1.2 Modelo hidrogeológico SDA (2000)

Este estudio que fue elaborado en el año 2000 está actualmente en actualización, pero el documento inicial disponible y consultado presenta información geológica y detalla de manera puntual los tipos de sondeos y estudios realizados con el fin de cubrir un área bastante extensa de la Sabana de Bogotá hasta Sogamoso, donde se identifican los acuíferos con su tipología y otros detalles de los mismos.

Se indica que la extracción de agua subterránea de acuíferos de Bogotá está concentrada en zonas muy delimitadas, específicamente en sectores en donde los niveles acuíferos se encuentran a profundidades no mayores a los 500 m lo cual facilita la captación de los mismos. En aquellos sectores en donde los horizontes acuíferos se encuentran a una profundidad mayor a los 500 m la captación de los mismos disminuye debido a las dificultades técnicas y los elevados costos que implica la extracción del agua.

Con base en la información contenida en el estudio de la Secretaria Distrital de Ambiente se determina que en el área de estudio existen dos sistemas acuíferos principales de extensión regional:

Acuífero Sabana: Corresponde a los sedimentos Cuaternarios con un espesor de hasta 400 m que pueden producir caudales de hasta 5 lt/s. Este acuífero es el de mayor explotación en el área de estudio.

Acuífero Guadalupe (Arenisca Labor Tierna): Corresponde a areniscas cretácicas con un espesor promedio de 120 m que puede producir caudales del orden de 20 l/s. A pesar de ser el acuífero más importante en el área, debido a la profundidad a la que se encuentra (entre 800 m a 1300 m en la mayoría del área) su explotación es limitada y localizada en aquellos lugares cerca a los afloramientos.

Entre las conclusiones del estudio se hace mención al estado del agua subterránea en la Sabana de Bogotá, para la cual en general se tiene un buen almacenamiento de agua del orden de los 40.000 millones de m^3 hasta una profundidad media de los 1000 m. Sin embargo, la recarga es muy reducida, la conductividad hidráulica en general media a baja,

y coeficientes de almacenamiento también bajos, lo que se traduce en descensos pronunciados haciendo uso del agua almacenada.

Igualmente los tiempos de viaje medios desde las zonas de recarga hasta la zona media de la ciudad son del orden de 10.000 años, siendo también concordantes con los descensos pronunciados y el consecuente uso del agua en almacenamiento.

Se indica también que aunque hay gran cantidad de agua subterránea almacenada en los acuíferos de Bogotá, la recarga es únicamente del orden de 1 m^3/s. Los inventarios evaluados de pozos de extracción dan un caudal de bombeo del orden de 1 m^3/s, es decir, a nivel de la ciudad y alrededores, se está utilizando, aproximadamente, la recarga natural de los acuíferos, sin embargo, su uso está concentrado en zonas muy delimitadas.

4.1.3 Modelo hidrogeológico INGEOMINAS (2002)

El objetivo esencial de este estudio, realizado a escala regional fue precisar el modelo hidrogeológico inicial de la Sabana de Bogotá mediante técnicas isotópicas. En este modelo actualizado se presentan más aspectos del perfil o variabilidad de los estratos en profundidad, con detalles de las zonas posibles de falla o discontinuidad de las formaciones rocosas subyacentes. Este es un estudio que se considera bastante completo puesto que permite detallar o complementar los perfiles estratigráficos de suelos de los primeros metros en la zona de la Sabana de Bogotá, los cuales resultan ser los estratos más importantes para evaluar su comportamiento por fenómenos asociados con asentamientos inducidos por variación de niveles piezométricos, por tal razón, se adoptó como base para el modelo de subsidencia que se plantea en la presente investigación.

Este modelo destaca a la Sabana de Bogotá como una cuenca artesiana con cobertura (Complejo acuífero de depósitos inconsolidados Neógeno-Cuaternario y Complejo acuitardo del Paleoceno) y como piso (Complejo acuífero Guadalupe). La cuenca se caracteriza por su estructura de bloques que genera discontinuidad de las unidades y grandes variaciones en los espesores de los depósitos no consolidados. Presenta dos zonas de recarga: una exterior (cadenas montañosas donde afloran las rocas del acuífero Guadalupe) y una interior (Infiltración por precipitación en los bordes de la cuenca, infiltración desde las corrientes superficiales). En las etapas siguientes del estudio se profundizará más sobre las condiciones de recarga puesto que las mismas son fundamentales para identificar variaciones piezométricas de carácter regional que tengan incidencia en el proceso de subsidencia.

Presenta como inconveniente que no se detallan los tipos de sondeos o prospección realizada para determinar los parámetros presentados en el modelo, aunque de manera general sólo se establecen espesores de cada formación y la geología estructural asociada, al parecer establecida con mayor detalle que en el modelo anterior.

4.1.4 Modelo hidrogeológico EAAB (JICA, 2009)

El propósito fundamental de este estudio fue el de formular un Plan Maestro para el abastecimiento de agua del área metropolitana de la ciudad de Bogotá, a través del uso de agua subterránea, con miras al año 2020.

Los aspectos hidrogeológicos considerados en el modelo de este estudio, se relacionan con las unidades geológicas de la Sabana de Bogotá, la cual está compuesta de rocas sedimentarias y sedimentos del Cretáceo-Cuaternario con ausencia de rocas ígneas. En cuanto a la clasificación de acuíferos, cada estrato distribuido está caracterizado por su edad geológica y de sus rocas, diferenciándose tres tipos de acuíferos: Cuaternario, en donde el agua subterránea actualmente bombeada por los pozos está almacenada en capas de arena y grava de la Formación Sabana que se distribuyen irregularmente a diferentes profundidades sin continuidad. El acuífero Terciario consiste de sedimentos arcillosos con pequeños estratos de arena y grava. El acuífero Cretáceo consiste del Grupo Guadalupe (un excelente acuífero incluyendo formación de arena) y la Formación Chipaque (principalmente de lutitas y no se considera como un buen acuífero).

El área de distribución del acuífero Cretáceo forma montañas empinadas generalmente. Por otro lado el área de distribución del acuífero Terciario forma pendientes suaves de piedemonte. En cuanto al área de distribución del acuífero Cuaternario, forma una planicie de baja altitud. El desarrollo a gran escala de agua subterránea en el terciario es difícil ya que el acuífero es muy pequeño.

La estructura hidrogeológica está fuertemente dominada por una estructura geológica compleja, donde la distribución y continuidad de acuíferos está influenciada por fallas y plegamientos. Al parecer los acuíferos Cuaternario, Terciario y Cretáceo forman acuíferos confinados. El acuífero superficial del Cuaternario al parecer forma un pequeño acuífero no confinado.

En el estudio se investigó principalmente el flujo de agua subterránea en el acuífero Cretáceo de los Cerros Orientales y Sur en la cuenca del río Bogotá, considerando en la distribución de los acuíferos que las rocas sedimentarias del Cretáceo desarrollan fisuras extensivas, y por ende con una permeabilidad lo suficientemente alta. Se asume que las formaciones Terciaria y Cuaternaria, encima del acuífero Cretáceo, tienen baja permeabilidad considerando la naturaleza de sus rocas (no son buenos acuíferos).

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

4.1.5 Mapa de unidades hidrogeológicas CAR (2006)

Este mapa de unidades hidrogeológicas está enfocado específicamente a la identificación de las unidades litológicas de la Sabana de Bogotá y a su clasificación hidrogeológica a escala regional, sin incluir información ni análisis para la ciudad de Bogotá, de allí sus principales limitantes en relación con el presente estudio, sin embargo conceptualmente es de interés puesto que enmarca la hidrogeología local con la regional.

En particular este mapa muestra las condiciones de tipo de acuífero de la zona de los Cerros Orientales, pero no permite detallar un perfil completo de los espesores de las capas de materiales. Sin embargo, es posible tratar de completar el perfil con los demás modelos para determinar los puntos de recarga o de posible infiltración de agua en las formaciones de la Sabana.

Las unidades hidrogeológicas obtenidas en este estudio de la CAR son:

Acuífero Cuaternario: Es un acuífero de extensión regional, que se correlaciona con sedimentos cuaternarios. Puede aportar caudales entre 1 l/s a 5 l/s dependiendo de los niveles arenosos que se atraviesen.

Acuífero Tilatá: Acuífero de extensión local de alto rendimiento, que se correlaciona con la Formación Tilatá (QTt). Puede aportar caudales entre 10 l/s a 40 l/s.

Acuífero Cacho: Acuífero de extensión local, de bajo a mediano rendimiento, que se correlaciona con la Formación Cacho (Tpc). Puede aportar caudales entre 3 l/s a 9 l/s.

Acuitardo Bogotá Regadera: Es un acuitardo discontinuo de extensión regional, asociado a rocas arcillosas con algunas intercalaciones de arenas. Puede aportar caudales del orden de 2 l/s.

Acuitardo Guaduas: Es un acuitardo continuo de extensión regional de bajo rendimiento, asociado a rocas arcillosas principalmente. En el área de estudio se estima que puede aportar un caudal entre 1 l/s a 3 l/s.

Acuífero Labor Tierna: Acuífero de extensión regional de alto rendimiento, siendo el más importante para el aporte de agua subterránea en el área de estudio. Se correlaciona con la Formación Labor Tierna, y puede producir caudales entre 10 l/s a 60 l/s.

Acuífero Plaeners Arenisca Dura: Acuífero de extensión regional, cuya producción está ligada al grado de fracturamiento que puedan tener las formaciones asociadas. Puede aportar caudales hasta de 12 l/s.

Basamento: Unidad impermeable que se correlaciona con la Formación Chipaque (Ksch). Corresponde al límite inferior del acuífero.

4.2 DOCUMENTOS E INFORMACIÓN ADICIONAL EVALUADA

Entre los documentos e información complementaria que han sido evaluados por su posible aporte en aspectos del modelo hidrogeológico y análisis de la subsidencia se destacan:

4.2.1 Nivel estático en los pozos de extracción de agua subterránea

En el documento *"Comportamiento del nivel estático en los pozos de extracción de agua subterránea en Bogotá"* (SDA, 2010), el área del estudio abarca la ciudad de Bogotá

(jurisdicción de la Secretaría Distrital de Ambiente), presenta una escala local (para cada pozo) y su objeto es el de mantener un control del comportamiento que muestra la unidad hidrogeológica captada en relación a la explotación del pozo y construir mapas de superficies piezométricas. Se analiza el comportamiento del nivel de agua estático (sin bombeo) de 104 pozos de concesión vigente, de donde se concluye que el 50.5% tienen un comportamiento estable, un 28.2% presentan tendencias de recuperación y el 6.8% son pozos saltantes.

4.2.2 Balances hídricos en la zona suroccidental de la sabana de Bogotá

En el informe *"Balances hídricos en la zona suroccidental de la sabana de Bogotá con énfasis en la hidrología subterránea"* (INGEOMINAS, 1987) se presentan dos áreas de estudio: una es la cuenca del río Bogotá entre Puente Vargas hasta Alicachín, a una escala regional (cuenca del río Bogotá), en donde se hace la estimación de la infiltración potencial media anual en el acuífero de la Formación Guadalupe, considerando infiltración potencial en Cota, Chía, Cajicá, Tabio, Tenjo, Subachoque, La Pradera, El Rosal, Facatativa, Bojacá, Madrid, Mosquera, Funza y Fontibón. Como resultado se obtiene una Infiltración Potencial de 2072 l/s (para un área total de aproximadamente 302 km^2).

La segunda área de estudio corresponde al río Bojacá y al río Subachoque, a una escala regional (a nivel de cuenca), calculando la infiltración real con la separación de flujo base y modelo lluvia, infiltración, escorrentía, considerando la cuenca alta de los ríos. Como resultado se reporta una Infiltración Real del río Bojacá de 202.8 l/s y 169.9 l/s, y una Infiltración Real del río Subachoque de 328.7 l/s y 314.7 l/s.

En este estudio no se concluye respecto a los balances realizados, pero sí se recomienda efectuar balances hídricos subterráneos complementarios mediante la instalación de una red de pozos de observación, en conjunto con los pozos de bombeo existentes. Sugiere que con esta información, además de la de niveles piezómetricos, y modelación numérica, se pueden conocer la hidráulica y direcciones de flujo de los sistemas hidrogeológicos en la Sabana de Bogotá. Igualmente se indica que con estudios del comportamiento de iso-piezas y de los cambios de las superficies piezométricas a través del tiempo, se pueden identificar zonas de sobreexplotación subterránea, direcciones de flujo, variaciones de almacenamiento y la delimitación de unidades hidrogeológicas.

4.2.3 Registros litológicos de exploraciones geotécnicas

La información básica que se emplea en este estudio corresponde a la que se obtuvo en el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá (MZSB) realizado por INGEOMINAS y la Universidad de Los Andes (1997).

Tal información y documentación complementaria sobre la estratigrafía y características geotécnicas de los suelos de Bogotá está contenida en la base de datos geotécnica que actualizó preliminarmente el FOPAE para la Microzonificación Sísmica de Bogotá en el año 2010. En este estudio se realiza una nueva actualización de dicha base de datos, alimentándola fundamentalmente con los parámetros de compresibilidad que se requieren para modelar la subsidencia; a esta base actualizada se le llamará aquí (BDG, FOPAE-UNAL 2011). Con esta información se hizo la evaluación de los registros litológicos de las

perforaciones realizadas en el depósito de suelo superficial o relleno de la Sabana de Bogotá, con profundidad mayor o igual a 100 m, con el propósito de actualizar los perfiles estratigráficos detallados y en particular para identificar la presencia de materiales gruesos como arenas que pueden constituir acuíferos que intervienen en el proceso de subsidencia.

Para identificar estas litologías arenosas o niveles acuíferos que facilitan la circulación y el almacenamiento del agua subterránea, se seleccionaron perforaciones representativas del estudio MZSB realizadas entre los años 1996 y 1997, las cuales se resumen en la Tabla 15 del literal 8.4 (Análisis de la secuencia litológica del relleno).

De los cuerpos de arena o acuíferos identificados se deduce que desde los 65 m de profundidad hasta los 250 m existen cuerpos de arena de grano fino algo arcillosa, de extensión no regional, con espesores identificados mayores a los 10 m excepto en la zona del Terminal de Transporte (Salitre) en donde se registraron tan sólo 4.0 m; en el sector del Parque Timiza se identifican cuatro cuerpos de arena distribuidos desde 0.0 m hasta 130 m. Las perforaciones de Timiza y Aeropuerto El Dorado (CNA) indican que hacia el oeste de Bogotá existe un cuerpo de arena de alguna continuidad importante entre los 110 m y 130 m de profundidad.

En el área urbana de la Sabana de Bogotá estos cuerpos de arena o materiales gruesos podrían estar asociados a los estratos o acuíferos de los que se ha venido extrayendo agua subterránea a través del tiempo mediante pozos de profundidad inferior a los 250 m, pero hay que precisar la profundidad de instalación de cada una de las rejillas en los 104 pozos de extracción legales que tiene registrada la Secretaría Distrital del Ambiente (SDA). Lo que queda visualizado es que el modelo hidrogeológico del relleno Cuaternario es multicapas o estratificado.

4.2.4 Reservas y extracción de agua subterránea

Es importante precisar en cuanto a lo que se refiere a reservas de aguas subterráneas, en cuáles de los pozos que le ha hecho seguimiento la SDA ésta ha sido agotada y en cuáles hay explotación, además del estado de la reserva actual de agua. Esta información es importante dentro de la evaluación del asentamiento y proceso de subsidencia.

En cuanto al volumen concesionado por la SDA entre el año 2000 y el 2009, en la Tabla 7 se indican datos tomados del *"Informe estadístico del recurso hídrico subterráneo dentro del perímetro urbano de Bogotá D.C."* con corte a diciembre 31 del 2009 (página 22). De estos volúmenes concesionados, de acuerdo con un estudio realizado por la Universidad Nacional (Contrato 190-2005) se ha utilizado sólo el 52%, por lo tanto, esta información georreferenciada y vinculada al modelo hidrogeológico es interesante para analizar qué incidencia sobre la subsidencia podría tener la extracción de los 49.080.000 m3 (≈ 52%) durante estos 10 años, si la velocidad de recuperación del nivel de agua es muy lenta. En la Figura 15 se presenta la gráfica de variación en el tiempo del volumen total acumulado concesionado de extracción de agua subterránea en el área urbana de Bogotá y los respectivos porcentajes asociados, según lo reportado en la Tabla previa.

Tabla 7. Volumen total de extracción de agua concesionado (SDA) y real consumido.

Año	Volumen total Concesionado (m^3)	Vol. concesión acumulado (m^3)	Volumen total Consumido (m^3)	Vol. consumido acumulado (m^3)
2000	9,574,717	9,574,717	5,390,153	5,390,153
2001	10,425,324	20,000,041	5,124,185	10,514,338
2002	11,866,659	31,866,700	5,181,852	15,696,191
2003	11,615,390	43,482,090	4,776,925	20,473,116
2004	8,813,691	52,295,781	4,161,899	24,635,016
2005	9,092,442	61,388,223	3,441,099	28,076,115
2006	9,436,082	70,824,305	5,160,085	33,236,199
2007	8,758,325	79,582,630	6,204,141	39,440,341
2008	7,423,087	87,005,717	5,094,119	44,534,459
2009	7,378,056	**94,383,773**	4,793,065	**49,327,525**

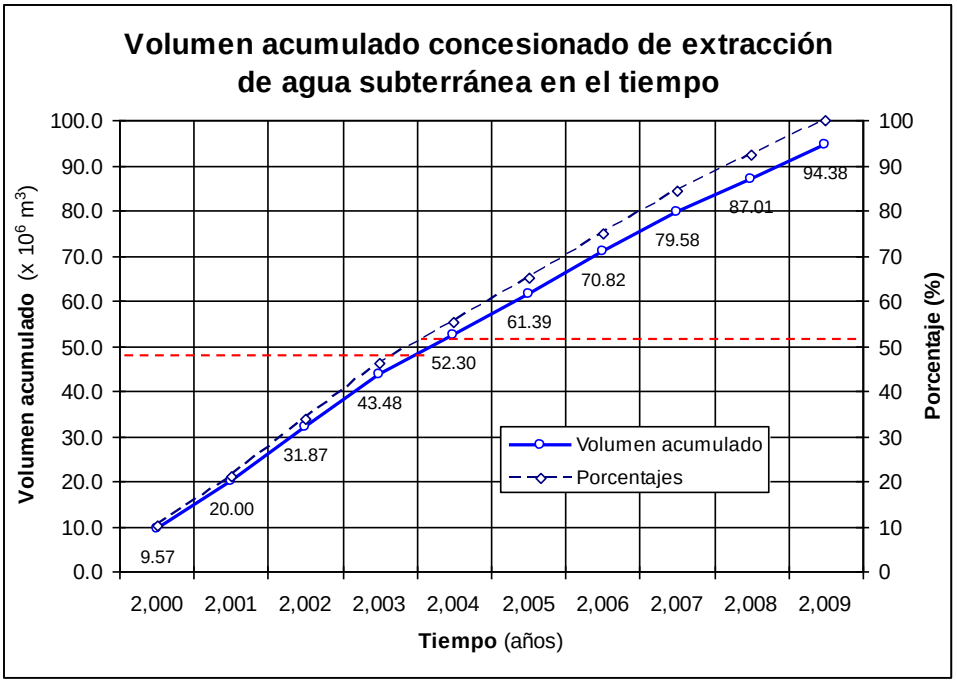


Figura 15. Volumen acumulado de extracción de agua subterránea en el tiempo.

De acuerdo con el estudio del la SDA las áreas de recarga de los cuerpos de arena que se mantienen en producción parece provenir del contacto discordante, en los bordes de la cuenca, con los deltas de los ríos y principales quebradas que fluían hacia la laguna de la Sabana de Bogotá, como también en algunos sectores del Este con el contacto con la Arenisca del Cacho, en el Noreste y Suroeste con la Arenisca Labor-Tierna del Grupo Guadalupe y en el Sur-oriente con las Formaciones Usme y Regadera.

En cuanto al volumen de agua clasificada por localidad, según lo reportado en el informe estadístico, el mayor volumen consumido por localidad se presenta en Fontibón, Kennedy, Puente Aranda y Ciudad Bolívar, lo que demuestra que la demanda y uso del recurso se concentra en zonas industriales y permite confirmar que la mayor utilización del recurso es el industrial (86%). En la Tabla 8 se muestran el reporte del volumen consumido (real) por localidad de Bogotá para el periodo del año 2009.

Tabla 8. Volumen de agua consumido y reportado por localidad para el año 2009.

Localidad	**Caudal promedio** (l/s)	**Volumen diario** (m^3/día)	**Volumen anual** (m^3/año)
Suba	13.24	1,144.22	417,640.0
Ciudad Bolívar	19.22	1,660.47	606,071.0
Fontibón	46.76	4,039.71	1,474,493.8
Kennedy	30.14	2,604.42	950,614.0
Puente Aranda	32.39	2,798.74	1,021,539.0
Otras	10.24	888.13	322,707.5
Total	**151.99**	**13,131.69**	**4,793,065**

4.3 INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

Teniendo en cuenta la información recopilada, se procedió a la integración y análisis en conjunto de los datos disponibles sobre la geología de la zona de estudio, localización de los sondeos geotécnicos (litologías geológicas) y pozos profundos, extracción de agua subterránea en el tiempo, las deformaciones del suelo y precipitaciones registradas. Una vez integrada toda la información se evaluaron los posibles aspectos de influencia en el proceso de subsidencia.

En la Figura 16 se aprecia una gráfica de comparación entre el volumen total acumulado de extracción de agua subterránea entre los años 2000 y 2009, obtenido de los datos de consumo reportados en Bogotá de los pozos profundos (SDA), y los desplazamientos relativos acumulados (subsidencia) en el tiempo registrados del estudio de Interferometría Diferencial DinSAR (ICC, FOPAE 2006-2008) para las máximas y mínimas velocidades de desplazamiento vertical del terreno, los cuales se pueden asociar posiblemente a sitios en la localidad de Puente Aranda (7.50 cm/año) y zona norte de la ciudad (1.40 cm/año), respectivamente, según lo reportado en el mapa de velocidad lineal de deformación para el área urbana de Bogotá para el periodo entre octubre de 1997 y marzo de 2009.

En la Tabla 7 se aprecia que los máximos caudales de extracción de agua subterránea corresponden a las localidades de Puente Aranda y Fontibón, sectores en donde se han reportado asentamientos importantes del terreno en las campañas de monitoreo del IGAC (2003-2007), para la zona occidental de Bogotá en Fontibón, y en los estudios del FOPAE (ICC, 2006-2008) para el sector de Puente Aranda.

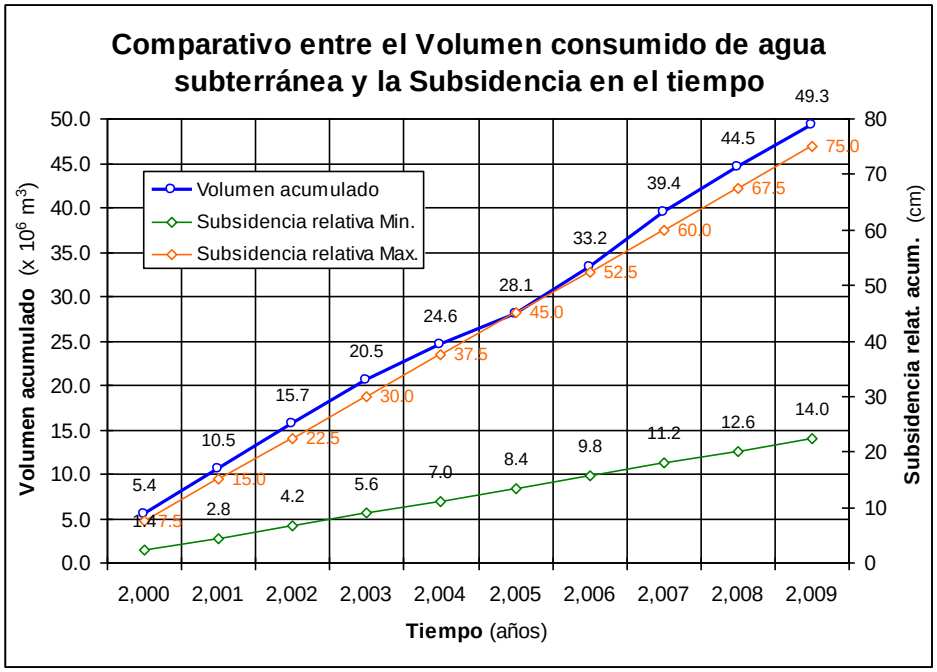


Figura 16. Comparativo entre el volumen acumulado de extracción de agua subterránea y la subsidencia relativa acumulada en el tiempo.

En la Figura 17 y en los Planos 6 y 7 (Vol. 2 de este informe), se presentan la integración mediante el SIG de la información disponible recopilada (deformaciones, precipitación, pozos de extracción de agua, etc.) para el análisis de la subsidencia en la ciudad de Bogotá.

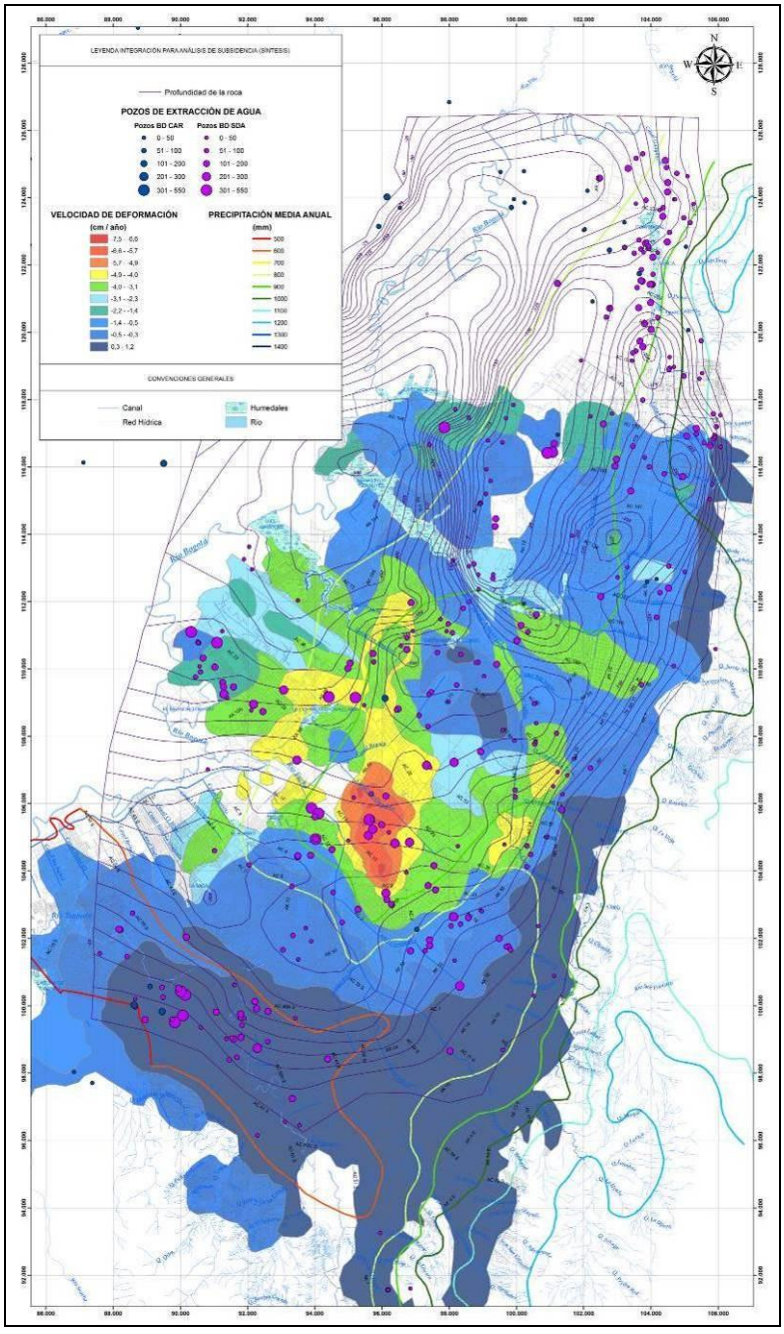


Figura 17. Mapa de integración de la información para análisis de subsidencia.

5 EVALUACIÓN DE DEFORMACIONES EN CAMPO

Como una fase inicial del estudio, se consideró necesario evaluar la confiabilidad de la información existente sobre mediciones de deformaciones superficiales realizadas por diferentes entidades (principalmente el IGAC y el FOPAE) para el estudio del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá, cuyos análisis y resultados se muestran en el presente informe.

Este capitulo contiene la revisión y análisis del estudio de Interferometría Diferencial realizado por el ICC (Instituto Cartográfico de Catalunya) y el FOPAE, el inventario general de las estaciones de medición de la Red Geodésica de Bogotá (implementada por el IGAC), la confiabilidad de las mediciones de deformación superficial realizadas en estos estudios, y las respectivas conclusiones y recomendaciones.

5.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO

A continuación se presenta la metodología de trabajo utilizada para evaluar la confiabilidad de la información existente sobre mediciones de deformación superficial realizadas por diferentes entidades para el estudio del proceso de subsidencia en Bogotá.

- **Revisión y análisis del estudio de Interferometría Diferencial**: Se realizó la revisión, procesamiento y análisis de la información existente sobre mediciones de deformación superficial registradas en la ciudad de Bogotá, mediante el análisis de imágenes satelitales.

- **Inventario general de las estaciones de la Red Geodésica de Bogotá**: Consistió en la identificación, ubicación y registro de las características principales de la mayoría de las estaciones de medición instaladas por el IGAC como parte de la Red Geodésica de la ciudad de Bogotá.

- **Visitas de inspección de campo**: Se realizaron algunas visitas de inspección de campo a la zona de mayor subsidencia (según el estudio de Interferometría Diferencial del ICC) y las diferentes estaciones de medición de la Red Geodésica de Bogotá, con el propósito de establecer la condición actual de la zona de mayor subsidencia, conocer el estado actual de las estaciones de la Red Geodésica de Bogotá y de los elementos existentes en la zona de influencia directa (edificaciones, vías, vegetación, redes de servicios públicos, actividad económica, etc.), e identificar daños estructurales y movimientos en el terreno que puedan relacionarse con el fenómeno de subsidencia.

- **Confiabilidad de las mediciones de deformación superficial registradas en la ciudad de Bogotá**: Con base en los resultados obtenidos en las actividades anteriores, se evaluó la confiabilidad de las mediciones de deformación superficial registradas en la ciudad de Bogotá en el estudio de Interferometría Diferencial y los reportes de la Red Geodésica de Bogotá.

5.2 INVENTARIO DE LA RED GEODÉSICA DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ – ESTACIONES IGAC

Con el fin de validar la información registrada por las diferentes estaciones de medición instaladas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en varios puntos de la ciudad de la Bogotá, es importante conocer el estado actual de estas estaciones y de los elementos existentes en la zona de influencia directa (edificaciones, vías, vegetación, redes de servicios públicos, actividad económica, etc.), e identificar daños estructurales y movimientos en el terreno que puedan relacionarse con el fenómeno de subsidencia.

Para esto, se realizaron visitas de inspección de campo en los puntos de medición instalados por el IGAC en las cuales se revisaron los aspectos ya mencionados.

5.2.1 Descripción de la red geodésica de la ciudad de Bogotá

La Red Geodésica de la ciudad de Bogotá consta de 22 puntos de medición instalados por el IGAC en varias zonas de la ciudad, los cuales están materializados en campo por mojones en concreto con una placa de bronce debidamente identificada (nombre de la estación y entidad encargada). En la Tabla 9 se presenta la localización general de cada una de las estaciones de medición de la Red Geodésica de Bogotá.

Tabla 9. Localización 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

A la fecha se han realizado varias mediciones de nivelación topográfica en las diferentes estaciones de la Red Geodésica durante los años 2003 y 2007, a cargo del IGAC.

5.2.2 Caracterización de la zona de influencia de los puntos de la red

Para caracterizar la zona de influencia directa de los diferentes puntos de medición que conforman la Red Geodésica de la ciudad de Bogotá, se evaluaron aspectos como

Edificaciones, Vías, Vegetación, Redes de Servicios Públicos y Actividad Económica, cuyos resultados se presentan a continuación. En el Anexo # 4 al final de este informe se presentan los reportes de inspección de cada una de las estaciones de la red.

5.2.3 Evidencias de subsidencia en los diferentes puntos evaluados

Durante la inspección de campo realizada a las diferentes estaciones que conforman la red geodésica del IGAC, y su área adyacente de influencia directa, se identificaron daños estructurales y movimientos en el terreno que pueden relacionarse con el fenómeno de subsidencia de la ciudad de Bogotá, los cuales se describen a continuación, junto con algunas observaciones respecto de la evaluación de cada sitio.

- **Estación IGAC No. 1**: En la zona de estudio se presentan deformaciones en el adoquín dispuesto en el área aledaña al puente construido sobre el canal en concreto (costado suroriental del mojón). No se presenta afectación de las vías, no hay inclinación de los árboles (ver Fotografía 1a). Las redes de conducción eléctrica están ligeramente inclinadas debido al peso y la tensión de los cables. El canal de conducción de aguas lluvias no presenta afectación.

- **Estación IGAC No. 3**: En la zona de estudio no se evidencian daños en las canchas y zonas peatonales contiguas al parque, ni asentamientos en las zonas verdes. Dichas zonas son irregulares. Algunos postes y árboles se encuentran ligeramente inclinados. En la Fotografía 1b) se aprecian características de esta estación.



a) **b)**

Fotografía 1. a) Estación IGAC No. 1 Jardines de Paz; b) Estación IGAC No. 3 Suba Compartir.

- **Estación IGAC No. 4**: En la parte superior del parque mirador Los nevados (junto al mojón) se presenta erosión superficial de la ladera, que no afecta la estabilidad local de la estructura del mojón (ver la Fotografía 2a). No se aprecian deformaciones superficiales ni fenómenos de remoción en masa que comprometan la estabilidad general del parque y la zona aledaña del mojón. En la vía que conduce a la Iglesia de Suba se presentan daños en la estructura del pavimento rígido y deterioro de la red de alcantarillado.

- **Estación IGAC No. 7**: Se observan labores de mantenimiento de las vías peatonales en el costado occidental de la Avenida 19. Se aprecian asentamientos en la carpeta asfáltica existente. En el parque adyacente no se pueden identificar fácilmente evidencias, ya que ha sido conformado por medio de rellenos. No hay afectación por la vegetación en zonas peatonales y vías vehiculares. Se presenta inclinación de algunos de los postes de conducción eléctrica (ver Fotografía 2b) y asentamientos diferenciales en algunas construcciones existentes en el costado occidental de la Avenida 19 con la Calle 137.



a) **b)**

Fotografía 2. a) Estación No. 4 Parque Los Nevados; b) Estación No. 7 Av. 19 – Cll. 137.

- **Estación IGAC No. 8**: En la zona de estudio se presenta un cabeceo en el cerramiento externo (ladrillo y malla eslabonada), postes relativamente inclinados e irregularidades en los accesos a las viviendas. No se aprecian deformaciones en las viviendas y las vías se encuentran en buen estado.
  El mojón materializado para esta estación se encuentra sobre un terraplén construido alrededor de la pista del Parque Atahualpa (sector Aeropuerto), el cual no ofrece la estabilidad suficiente para medir deformaciones generales del terreno y por tanto puede estar registrando movimientos locales del terraplén (ver la Fotografía 3a).

- **Estación IGAC No. 9**: En la zona de estudio se presentan daños tipo piel de cocodrilo en la estructura del pavimento, los cuales son debidos principalmente al paso del tráfico. La estructura del puente vehicular se encuentra en buen estado, verticalidad en árboles y postes, y el adoquín existente no presenta hundimientos apreciables (su superficie es irregular).
  El mojón de esta estación se ubicó en la parte alta de una 'planicie' conformada por la construcción del puente existente sobre la Calle 26 en la Avenida Ciudad de Cali (ver la Fotografía 3b), y esta cimentado sobre un relleno de condición estable. No es confiable para medir deformaciones generales del terreno, ya que el material de fundación del mojón es un relleno y por consiguiente, estaría registrando movimientos locales del relleno.



a) b)

Fotografía 3. a) Estación No. 8 Parque Atahualpa; b) Estación No. 9 Av. Ciudad de Cali – Cll. 26.

- **Estación IGAC No. 10**: Se observan inclinaciones en los edificios existentes en la zona noroccidental de la Autopista Norte. No se evidencian afectaciones por redes de servicios públicos. En el monumento de los Héroes se presenta una inclinación de la estructura hacia el costado sur; la pilastra se encuentra en la zona verde adyacente según lo presentado en la Fotografía 4a).

- **Estación IGAC No. 11**: En la zona de estudio se presenta un cabeceo en las urbanizaciones de interés social ubicadas en el costado sur-occidental de la Biblioteca El Tintal. Se aprecian deformaciones en la estructura de las vías locales, las cuales son debidas principalmente al paso del tráfico; verticalidad en los postes y árboles. La estación (placa) se encuentra a nivel del terreno en una zona verde (ver la Fotografía 4b) adyacente a la biblioteca.



a) b)

Fotografía 4. a) Estación No. 10 Los Héroes; b) Estación No. 11 Biblioteca El Tintal.

- **Estación IGAC No. 12**: En la zona de estudio no se evidencian deformaciones apreciables en vías, puentes, edificaciones y redes de servicios.
  La referencia o pilastra (mojón) de la Estación No. 12 se encuentra localizada sobre el relleno conformado en la oreja noroccidental del puente que conecta la Avenida de Las Américas con Avenida Boyacá, ver detalles en la Fotografía 5a), por tal razón es probable que las deformaciones registradas en dicha estación correspondan al movimiento local del relleno.

- **Estación IGAC No. 13**: En la zona de estudio se observan algunos daños en andenes peatonales en el costado norte del Parque El Jazmín producto de la vegetación, así como en la misma zona se presentan deformaciones por tránsito y vegetación. No se aprecian evidencias en canchas deportivas, cerramiento del parque, edificaciones y redes de servicios públicos.
  La placa de esta estación se localiza embebida en un terraplén conformado en suelo y con recubrimiento vegetal (ver Fotografía 5b), el cual se ubica hacia el costado occidental de la pista de patinaje del Parque El Jazmín, sector Puente Aranda. De acuerdo con la observación realizada en campo los datos de deformación registrados por dicha estación pueden corresponder a deformaciones locales del terraplén en mención.



a) **b)**

Fotografía 5. a) Estación No. 12 Av. Las Américas - Av. Boyacá; b) Estación No. 13 El Jazmín.

- **Estación IGAC No. 14**: No se presentan evidencias del fenómeno de subsidencia en la zona ya que no hay deformaciones apreciables en los postes de alumbrado público, senderos peatonales y demás estructuras. Se aprecian daños en las vías adyacentes los cuales se pueden atribuir específicamente al tráfico vehicular y al precario mantenimiento que se aprecia.
  El mojón de esta estación se encuentra localizado en la parte superior y nivel de la corona de un terraplén armado con recubrimiento vegetal que sirve como gradería al estadio del Parque Timiza (ver la Fotografía 6a), donde se exhibe erosión producto de la temporada de lluvias que se presenta en el momento de realizar la visita, por tal

razón las deformaciones registradas por dicha estación pueden estar registrando los movimientos locales del terraplén en mención.

- **Estación IGAC No. 15**: Algunas de las estructuras del parque presentan deterioro por el efecto del ambiente, ya que el parque se encuentra cerrado al público, no se presentan evidencias en el coliseo, no hay inclinación de árboles y los diques a cada lado del río no presentan erosión.
  La pilastra de referencia se encuentra ubicada en el parque El Río San José de Maryland, en uno de los diques en tierra de la margen izquierda del río Tunjuelo (ver detalle de la Fotografía 6b), aparentemente en un relleno conformado durante la construcción del parque; el río no presenta recubrimiento en la zona y los bordes del mismo no se encuentran erosionados, por tal razón las lecturas de deformación registradas por esta estación pueden corresponder al movimiento local del terraplén en mención.



a) **b)**

Fotografía 6. a) Estación No. 14 Parque Timiza; b) Estación No. 15 Parque Maryland (Bosa).

- **Estación IGAC No. 16**: Se observan algunos daños en los senderos peatonales por evidente afectación de la vegetación, no se aprecia afectación en las redes de servicios, ni inclinación de árboles, el cerramiento del parque se encuentra en buen estado y las canchas deportivas se encuentran en buen estado. En el costado nororiental del parque se presentan pequeñas deformaciones del sendero peatonal ya que por esta zona pasa el lecho de un canal natural sin revestimiento. La gradería de la cancha de fútbol ubicada en el sector noroccidental del parque presenta cabeceo hacia el costado oriental siendo esta la única estructura construida en concreto, ya que las demás graderías se encuentran construidas en terraplenes con revestimiento vegetal.
  El mojón de la Estación No. 16 se encuentra ubicado en una zona aparentemente estable en el costado oriental del Parque Metropolitano San Cristóbal al sur de la ciudad (ver la Fotografía 7a), por tal razón es probable que las deformaciones registradas sean representativas de acuerdo con los movimientos del terreno.

- **Estación IGAC No. 17**: En la zona de estudio se presenta cabeceo del Coliseo del Parque el Tunal hacia el costado sur-occidental. Se observan además algunas deformaciones en la vía interna del parque producto del tráfico y el inadecuado drenaje de la misma.
  El mojón que se instaló como referencia está ubicado en la zona centro del parque El Tunal, sobre un terraplén armado en tierra que no presenta una compactación adecuada (Fotografía 7b) y en la zona aledaña se evidencia erosión y no hay suficiente cobertura vegetal, por tal razón la zona no ofrece estabilidad para la medición de deformaciones del terreno y es muy probable que se estén registrando los movimientos locales del terraplén.



a) **b)**

Fotografía 7. a) Estación No. 16 Parque San Cristóbal; b) Estación No. 17 Parque El Tunal.

- **Estación IGAC No. 18**: En la zona de estudio no se presentan deformaciones evidentes en las vías ni construcciones; en los taludes adyacentes al cementerio no se evidencia erosión y no se aprecian deslizamientos o movimientos en masa. Se observan algunos afloramientos de roca y bloques en superficie.
  La pilastra de la estación se encuentra en una zona aparentemente estable aunque está ubicada en la zona cercana a la vía interna del cementerio Serafín (Usme) y al talud colindante con el lecho del río Tunjuelo. Ver detalles en la Fotografía 8a).

- **Estación IGAC No. 19**: En la zona no se presentan deformaciones en las estructuras, inclinaciones en los postes de servicios públicos, movimientos en masa, ni otro tipo de evidencia a posible inestabilidad.
  El mojón se encuentra ubicado en la parte superior del tanque almacenamiento de agua la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) en el barrio Sierra Morena III, por lo que las deformaciones registradas por dicha estación pueden atribuirse a desplazamientos sufridos por el tanque o asentamientos del mismo. En la Fotografía 8b) se aprecia la ubicación de esta estación.



a) b)

Fotografía 8. a) Estación No. 18 Cementerio Serafín; b) Estación No. 19 Sierra Morena III.

- **Estación IGAC No. 20**: En la zona de estudio (barrio Chuniza, Usme) se presentan deformaciones en la estructura del pavimento rígido de la calle 91 Sur producto del tráfico de la zona, así como se presentan ondulaciones en la estructura del pavimento flexible de la transversal 2B Este en la zona aledaña a los pozos de inspección de la red de alcantarillado. En el canal que se encuentra ubicado en la parte baja del costado oriental de la meseta donde se encuentra el mojón presenta deformaciones de los muros en gavión que estabilizan la masa de la parte superior, además, se presenta erosión en la zona.
  En la Estación No. 20 el mojón se encuentra aparentemente en suelo natural, en la parte superior de una 'planicie' (ver la siguiente Fotografía) en donde se aprecian afloramientos de areniscas y presencia de algunos bloques de roca.



Fotografía 9. Detalles del sitio devaluado de la Estación IGAC No. 20: Parque barrio Chuniza.

5.3 CONFIABILIDAD RELATIVA DE LAS MEDICIONES DE DEFORMACIÓN SUPERFICIAL REALIZADAS

Con base en los resultados obtenidos en la revisión y análisis del Informe de Interferometría Diferencial y el Inventario de la Red Geodésica de la ciudad de Bogotá, se evaluó la confiabilidad relativa de las mediciones de deformación superficial registradas. A continuación se presenta una descripción de los criterios de evaluación, categorización y los resultados obtenidos en el análisis de confiabilidad de las mediciones registradas en las estaciones de la Red Geodésica de Bogotá.

5.3.1 Criterios de evaluación y categorías de confiabilidad relativa

Para evaluar la confiabilidad de las mediciones de deformación superficial registradas por las estaciones de la Red Geodésica de Bogotá, se utilizaron principalmente tres criterios (F_i) de comparación:

- Lugar de cimentación (F1): Se refiere a la condición del suelo o terreno de fundación del mojón de referencia en cada estación. La calificación asignada fue: **5** para suelo natural en zona plana, **4** para estructuras rígidas (edificios, tanques, puentes, etc.), **3** para rellenos homogéneos, **2** para estructuras flexibles (terraplenes, diques, gaviones, etc.), y **1** para rellenos heterogéneos. El porcentaje de ponderación para este factor fue 50%.

- Interferencia en las lecturas (F2): Se refiere a las condiciones de sitio que pueden afectar las lecturas registradas. La calificación definida fue: **5** Zona despejada, **4** Construcción de obras de ingeniería, **3** Edificaciones vecinas, **2** Tráfico vehicular, y **1** Vegetación abundante. El porcentaje de peso o ponderación en importancia para este factor fue del 30%.

- Condición estructural del mojón (F3): Se refiere al estado estructural del mojón, a partir de aspectos tales como inclinación y deterioro de los elementos. La calificación asignada fue: **5** Estable, **4** Ligeramente inclinado, **3** Inclinado, **2** Deteriorado, y **1** Destruido. El porcentaje de ponderación para este factor fue del 20%.

Con base en lo criterios descritos anteriormente y en los posibles valores ponderados obtenidos para cada sitio, se definieron cuatro categorías de evaluación según los intervalos indicados en la Tabla 10. Estas categorías se utilizaron para evaluar la confiabilidad de cada una de las estaciones.

Tabla 10. Categorización propuesta para evaluación de la red geodésica IGAC.

Intervalo de Calificación	Categoría para evaluación de confiabilidad relativa
1 – 2	Baja
2 – 3	Baja a media
3 – 4	Media
4 – 5	Alta

5.3.2 Análisis de confiabilidad relativa

Para las estaciones de medición de la Red Geodésica de Bogotá se presenta la siguiente clasificación de confiabilidad relativa, con base en los criterios de evaluación definidos y tal como se resumen en la categorización mostrada en la Tabla 11 y en la Figura 18.

Tabla 11. Criterios de confiabilidad de las estaciones de medición de la Red Geodésica.

No.	Referencia Estacion	Coordenadas			ΔH (mm/año)	F1	F2	F3	FC	Confiabilidad	Observaciones
		Norte	Este	Cota							
1	BOGOTA-01	1020282.68	1004003.06	2575.21	-18.50	3.0	2.0	5.0	3.1	Media	
2	BOGOTA-02	1018501.25	1000382.41	2661.34	4.20	0.0	0.0	0.0	0.0	Sin evaluar	No encontrado
3	BOGOTA-03	1017498.81	996848.99	2574.55	-35.40	5.0	2.0	4.0	3.9	Media	
4	BOGOTA-04	1016233.17	999613.84	2671.35	-4.20	5.0	5.0	5.0	5.0	Alta	
5	BOGOTA-05	1014033.88	996620.62	2571.05	-6.30	2.0	5.0	5.0	3.5	Media	El mojon se encuentra ubicado sobre un terraplen
6	BOGOTA-06	1013096.29	999307.83	2649.77	-6.50	0.0	0.0	0.0	0.0	Sin evaluar	No encontrado
7	BOGOTA-07	1013821.17	1003390.64	2578.96	-9.70	5.0	2.0	5.0	4.1	Alta	
8	BOGOTA-08	1010378.55	992426.86	2571.80	-33.00	2.0	1.0	4.0	2.1	Baja Media	El mojon se encuentra ubicado sobre un terraplen
9	BOGOTA-09	1009176.79	995437.94	2577.08	-110.80	3.0	2.0	5.0	3.1	Media	El mojon se encuentra ubicado en el relleno dispuesto para la construcción del puente de la Av. Ciudad de Cali con Cll. 26, oreja N-E
10	BOGOTA-10	1007864.74	1001882.97	2578.76	-10.00	3.0	2.0	5.0	3.1	Media	El mojon se encuentra ubicado contiguo a la estación "heroes" del sistema Transmilenio y con la influencia directa del paso de los vehiculos articulados
11	BOGOTA-11	1005282.58	991347.29	2567.53	-19.70	0.0	0.0	0.0	0.0	Sin evaluar	No encontrado.
12	BOGOTA-12	1003840.58	993196.47	2579.56	-14.90	3.0	2.0	5.0	3.1	Media	El mojon se encuentra ubicado en el relleno dispuesto para la construcción del puente de la Av. De las Americas con Av. Boyacá, oreja N-W
13	BOGOTA-13	1001429.51	995858.54	2580.55	-20.40	3.0	1.0	3.0	2.4	Baja Media	El mojón se localiza sobre un terraplén ubicado en la zona aledaña a la pista de patinaje del parque El Jazmin
14	BOGOTA-14	1001602.11	991501.50	2581.02	-12.20	3.0	5.0	2.0	3.4	Media	El mojón se encuentra ubicado en la parte superior del terraplén localizado en el costado norte del estadio del Parque Timiza
15	BOGOTA-15	1002441.32	986130.20	2569.38	-20.50	2.0	1.0	5.0	2.3	Baja Media	El mojón se encuentra ubicado en el costado sur-occidental del parque El Rio San José de Maryland, en uno de los diques del río Tunjuelo que bordea el parque en los costados sur y occidente.
16	BOGOTA-16	997481.65	999322.90	2642.71	3.10	5.0	3.0	5.0	4.4	Alta	
17	BOGOTA-17	997348.55	993991.44	2583.77	-13.10	2.0	3.0	2.0	2.3	Baja Media	El mojón se localiza sobre un terraplén armado en tierra en el costado occidental de la Biblioteca El Tunal.
18	BOGOTA-18	992966.07	994667.75	2626.02	1.30	3.0	3.0	5.0	3.4	Media	
19	BOGOTA-19	997651.33	989672.09	2829.93	28.30	4.0	3.0	5.0	3.9	Media	El mojón se encuentra ubicado en la parte superior del tanque almacenamiento de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB, por lo cual las deformaciones registradas por dicha estación pueden atribuirse a deformaciones sufridas por el tanque o asentamientos del mismo.
20	BOGOTA-20	989591.21	996469.31	2792.98	0.80	5.0	3.0	5.0	4.4	Alta	
21	BOGA	1004697.24	999729.13	2610.23	-----					No aplica	No registra Medición
22	BOGT	1004851.23	999619.22	2576.61	-----					No aplica	No registra Medición

Al observar la Figura 18 se puede apreciar que el 23% (en total 5) de estas estaciones se encuentra en confiabilidad relativa baja y baja a media, lo cual quiere decir que las mediciones tomadas pueden tener ciertos márgenes de error que no necesariamente implican que sus datos sean erróneos sino que pueden tener cierta afectación por aspectos externos, especialmente cuando las tasas de deformación son muy bajas. Estas

lecturas pueden verse afectadas por estar ubicadas en áreas susceptibles a presentar movimientos locales no asociados estrictamente con el fenómeno de subsidencia, tales como terraplenes, rellenos, diques de protección, estructuras sometidas a vibración, entre otras.

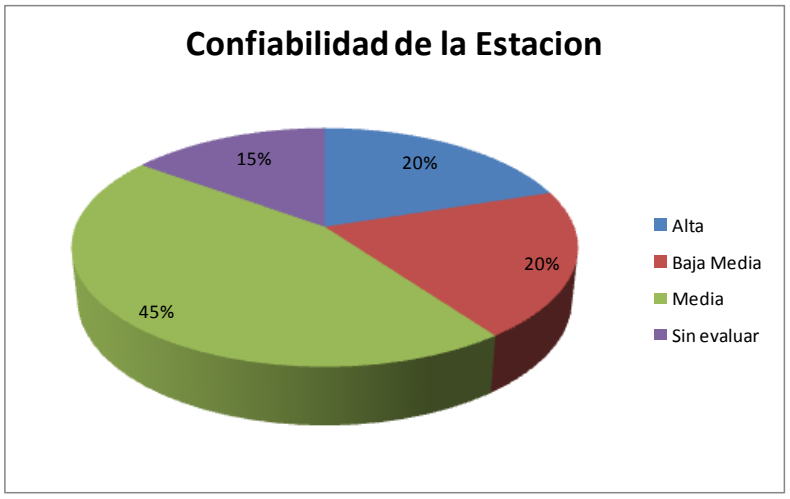


Figura 18. Clasificación de la confiabilidad por categorías de las estaciones de medición de la red geodésica de Bogotá (IGAC).

Por otra parte, no se encontró evidencia física de un punto de medición en 6 estaciones de la red (27%), las cuales registraron bajas tasas de deformación. Esto es consistente con lo observado en campo, ya que no se evidencian deformaciones en el terreno ni en las estructuras adyacentes.

Si se compara lo anterior con los registros obtenidos en el estudio de Interferometría Diferencial, se puede apreciar que en la zona de mayor subsidencia no se encuentran estaciones de la red geodésica de Bogotá, 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.

5.4 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE MAYOR SUBSIDENCIA: PUENTE ARANDA

Para caracterizar la zona de mayor subsidencia definida en el estudio de Interferometría Diferencial, se realizó una visita de inspección de campo a la Localidad de Puente Aranda, el día 18 de abril de 2010. De acuerdo con el estudio de Interferometría, en este sector se han registrado las mayores tasas de subsidencia en la ciudad de Bogotá.

5.4.1 Visita de inspección a la 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 se continuó por la Avenida Carrera 68 hasta la Calle 26 en sentido sur-norte y finalmente en sentido occidente-oriente se continuó 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 la visita de inspección realizada, 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.

Al comparar el área de mayor subsidencia en la ciudad de Bogotá según el estudio efectuado por el FOPAE y la visita de campo realizada se puede concluir que solamente se presentan hundimientos en el Centro Urbano Antonio Nariño, en el resto de las zonas inspeccionadas, no se evidencian daños en vías, asentamientos marcados en edificaciones, ni agrietamientos en el terreno.

En el sector de Ciudad Salitre se evidenciaron agrietamientos y hundimientos en la estructura del pavimento, producto de la presencia de árboles en vías pero no hay una clara evidencia de asentamientos regionales, aunque pueden estar ocurriendo grandes asentamientos locales debidos a las recientes construcciones de gran altura.

En el Anexo #·5 se presenta el informe de la visita de inspección de campo realizada a esta zona crítica de mayor subsidencia, según las deformaciones registradas (FOPAE).

5.4.2 Observaciones generales

Como resultado de la revisión y análisis del estudio de Interferometría Diferencial, y la inspección de campo realizada a la zona de mayor subsidencia, se tienen las siguientes observaciones generales:

- Se encontró un foco principal de subsidencia en la zona de Puente Aranda, donde la magnitud del movimiento alcanza los 7.5 cm/año. De acuerdo con esta información, la máxima deformación registrada para esta zona fue de 80 cm, en el periodo comprendido entre octubre de 1997 y marzo de 2009. Este es un valor bastante alto que debería notarse claramente en el terreno pero no hay evidencias de tales deformaciones, lo cual es indicativo de que las deformaciones son más o menos uniformes, por lo cual los asentamientos diferenciales serían imperceptibles.

- Es importante considerar que tal como se expresa en el estudio del IIC-FOPAE, existen problemas de conectividad temporal entre las distintas imágenes utilizadas en este estudio, por lo cual es difícil detectar fenómenos no lineales en el comportamiento de la deformación, durante el periodo de tiempo considerado (octubre de 1997 a marzo de 2009).

- Al realizar una comparación cualitativa entre la deformación temporal y la precipitación registrada para la zona del barrio El Paraíso y la Universidad Nacional, se puede establecer que la unidad de comparación es diferente, ya que las lecturas de deformación se encuentran cada 35 días, mientras las lecturas de precipitación acumulada se encuentran cada 5 días; por lo tanto, no es posible establecer una correspondencia directa entre ambas magnitudes.

- De igual manera, al analizar los resultados de deformación temporal obtenidos por el método DInSAR, con las lecturas de nivelación registradas en la Red Geodésica de Bogotá, se utilizaron los datos de nivelación obtenidos por el IGAC en las dos campañas de medición realizadas en abril de 2003 (primera campaña) y entre el 5 de julio y el 24 de agosto de 2007 (segunda campaña). Se calcularon los valores de deformación registrada para cada estación geodésica como la diferencia entre la lectura de nivelación final e inicial (segunda y primera campaña), de esto se identificaron dos focos de deformación principal, ubicados en la parte norte de la ciudad. El intervalo de deformación registrada se encuentra entre 22.8 cm y 25.6 cm. No existen 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.

- El estudio ICC-FOPAE compara las deformaciones registradas en toda el área urbana de Bogotá, por las estaciones de la Red Geodésica de Bogotá y el método DInSAR, y se indica allí que el carácter de la deformación (subsidencia o elevación) coincide en 32 de los 35 puntos comunes de medición. La media del error entre las dos mediciones es -0.3 cm y su desviación estándar es de 3.2 cm. Sin embargo, excluyendo el punto con error mayor de 10 cm, la media se puede considerar nula y la desviación estándar baja a 2.60 cm.

- Es importante considerar que aunque el período de comparación de estas mediciones es el mismo, el área de incidencia de cada medición es diferente. Las mediciones de la Red Geodésica son puntuales, mientras las mediciones por el método DInSAR inciden en una superficie del terreno de 30 cm x 30 cm. Además, las deformaciones registradas por el método DInSAR, se estimaron a partir de la interpolación lineal de los valores de deformación en las fechas que se disponían de imágenes (Informe ICC-FOPAE, 2008).

- Con base en los resultados obtenidos en el presente el estudio, fue posible definir las zonas con mayor tasa de subsidencia, que en este caso, corresponde a la zona urbana de Puente Aranda, con una velocidad de movimiento de 7.5 cm/año. Aunque se presentaron problemas de conectividad temporal entre las diferentes imágenes utilizadas en este estudio, el método DInSAR es una herramienta muy útil para el monitoreo de fenómenos de subsidencia a gran escala espacial y temporal.

- Al comparar el área de mayor subsidencia en la Ciudad de Bogotá según el estudio efectuado por la FOPAE y la visita de campo realizada se puede concluir que solamente se presentan hundimientos en el Centro Urbano Antonio Nariño, en el

resto de las zonas inspeccionadas, no se evidencian daños en vías, asentamientos marcados en edificaciones, ni agrietamientos en el terreno.

- Para determinar las posibles causas de los agrietamientos evidenciados en el Centro Urbano Antonio Nariño se hace necesario conocer la información básica relacionada con las condiciones geotécnicas del sitio, tanto las propiedades físicas del suelo como los diseños de cimentación realizados.

5.5 CONCLUSIONES DE LA EVALUACIÓN DE DEFORMACIONES

5.5.1 Estaciones de la red geodésica IGAC

Acorde con el recorrido de campo realizado se incluyó la caracterización de cada una de las estaciones de la red Geodésica del IGAC en cuanto a edificaciones, estado de las vías, vegetación presente en la zona, redes de servicios públicos y actividad económica, así como las principales evidencias de la subsidencia, dando como resultados los siguientes: en algunas zonas se presentan asentamientos diferenciales en edificaciones y estructuras de los parques, afectación en vías peatonales y vehiculares producto de la vegetación y el trafico, erosión en algunas de las estaciones que se encuentran sobre terraplenes y algunas afectaciones producto del inadecuado drenaje de las estructuras.

En ciertas zonas se presenta dificultad para realizar la inspección visual en cuanto a las evidencias producto del fenómeno de subsidencia, ya que la mayoría de las estaciones se encuentran ubicadas en parques donde constantemente se realizan reparaciones y conformaciones.

De acuerdo con el recorrido de campo realizado se pudo ver que algunos mojones instalados para representar las estaciones de la red geodésica del IGAC se encuentran ubicados sobre estructuras como terraplenes, diques, tanques y rellenos, y es probable que no registren las deformaciones reales del terreno natural, sino las deformaciones sufridas por efectos locales de las estructuras donde se encuentran, tal es el caso de las estaciones 8, 12, 13, 14, 15, 17 y 19.

En cuanto a la topografía la mayoría de las estaciones se ubican en zonas planas, y algunas en zonas montañosas inclinadas o escarpadas y otras en zonas de piedemonte.

Para las estaciones 2, 5, y 6, no se logró encontrar los mojones respectivos de acuerdo a la localización indicada y por tal razón no se pudieron hacer las verificaciones correspondientes.

5.5.2 Zonas identificadas como de mayor subsidencia

De acuerdo con la información del estudio de Interferometría Diferencial la zona de mayor subsidencia corresponde aproximadamente al Centro Urbano Antonio Nariño (CUAN) ubicado entre la Avenida La Esperanza y la Avenida de Las Américas, al sector conocido como Zona Industrial y en alguna medida al sector de ciudad Salitre, sin embargo, esta ubicación no se puede definir con precisión puesto los datos que se entregaron a la

Universidad Nacional sólo están referenciados en un mapa que no cuenta con los puntos georreferenciados mediante coordenadas. De todas formas, con el fin de identificar si estas altas magnitudes de subsidencia presentaban alguna evidencia en la superficie del terreno, se hizo una inspección detallada de la zona, donde se pudieron observar algunos aspectos como los siguientes:

En el CUAN se presentan asentamientos diferenciales menores de las edificaciones y algunos agrietamientos en los muros de fachada pero no hay muestras claras de deformaciones de gran magnitud sino probablemente estos problemas se asocian más a deficiencias en el sistema de cimentación. Es importante además considerar que estas edificaciones tienen más de 50 años de haber sido construidas y por lo tanto es de esperarse que la consolidación por sobrecarga ya haya concluido su fase principal.

En el sector de la Zona Industrial, la principal problemática observada en el terreno es el alto grado de deterioro de muchas de sus vías, principalmente las secundarias, este es un factor que en general puede asociarse a las altas cargas que por allí circulan y por el escaso mantenimiento que se les ha hecho a tales vías, por otra parte no se observaron problemas de asentamientos diferenciales en las estructuras ni deformaciones indicativas de posible subsidencia.

En algunas zonas del barrio Ciudad Salitre se identificaron asentamientos y agrietamientos en la capa de rodadura de algunas vías, además asentamientos locales originados por el efecto de las raíces de árboles cercanos y asentamientos de edificaciones por efectos de las cargas. Es de anotar que esta zona de la ciudad está construida sobre terrenos muy blandos, saturados y altamente compresibles y que el desarrollo urbanístico que ha presentado durante los últimos 20 años ha sido constante y con alta densidad, por lo cual se pueden haber generado asentamientos cuyas magnitudes son compatibles con las tasas de subsidencia reportadas en el estudio del ICC.

5.5.3 Confiabilidad de las mediciones de deformación superficial

El 20% (4 en total) de las estaciones de la Red Geodésica de Bogotá se encuentran en confiabilidad baja y baja media, lo cual quiere decir que las mediciones tomadas no son representativas para analizar el fenómeno de subsidencia, por estar ubicadas en áreas susceptibles a presentar movimientos locales no asociados con este fenómeno. Estas áreas corresponden a terraplenes, rellenos, diques de protección, estructuras sometidas a vibración, entre otras. En estas estaciones se han registrado las mayores deformaciones superficiales en el terreno, con una tasa de variación entre los 13 mm/año y 33 mm/año.

Si se compara lo anterior con los registros obtenidos en el estudio de Interferometria Diferencial, se puede apreciar que en la zona de mayor subsidencia no se encuentran estaciones de la Red Geodésica de Bogotá, lo cual es una limitante importante de este sistema de medición, ya que no se puede establecer si las deformaciones medidas por Interferometria Diferencial son locales o por efectos regionales.

En el Anexo # 4 del informe se presenta el registro fotográfico de la inspección de la campo realizada para las Estaciones 15 (Bosa) y 19 (Sierra Morena III).

6 EVALUACIÓN DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS

6.1 RECONOCIMIENTO DE LA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA DISPONIBLE

Una de las tareas prioritarias de este estudio consistió en realizar visitas de campo para verificar el estado actual de la instrumentación geotécnica instalada por INGEOMINAS en 1996 y 1997, evaluar su eventual ajuste o mantenimiento y efectuar la actualización de los registros de monitoreo. En la Tabla 12 se resume la instrumentación instalada.

Tabla 12. Relación de la instrumentación geotécnica instalada en la ciudad (1996-1997).

Sitio	Ubicación general	Prof. (m)	Instrumentación instalada
1	Calle 127Bis con Carrera 20	188.5	Tres piezómetros a profundidades de 7.0 m, 29.50 m y 72.0 m.
2	Suba: Av. Cundinamarca con Calle 139	245	Dos piezómetros a profundidades de 7.0 m y 90.0 m. (Equipos destruidos)
3	Parque Timiza Carrera 74 con Calle 72 Sur	130	Tres piezómetros a profundidades de 4.50 m, 29.0 m y 139.0 m.
4	Universidad Agraria Calle 170 No. 54-10	130	Tres piezómetros a profundidades de 4.0 m, 29.0 m y 83.0 m.
5	INGEOMINAS Carrera 30 con Calle 53	177	Cinco piezómetros a profundidades de 10 m, 24.0 m, 66.0 m, 112.0 m y 172.0 m.
6	Aeropuerto El Dorado (CNA) Calle 26 No. 112-09	250	Cuatro piezómetros a profundidades de 7 m, 30.0 m, 116.0 m y 240.0 m.

De las campañas realizadas con acompañamiento de personal de INGEOMINAS, se logró confirmar la ubicación de los equipos instalados en cinco de los seis sitios, constatando que la instrumentación dispuesta en el sector de Suba (Avenida Cundinamarca con Calle 139) fue destruida o enterrada debido a las labores de urbanismo que han sido ejecutadas en los últimos años en la zona.

A continuación se resumen los aspectos más relevantes de la revisión y verificación del funcionamiento de la instrumentación existente actualmente, salvo de los equipos que están instalados en INGEOMINAS, pues está pendiente su evaluación.

- ✓ Calle 127Bis con Carrera 20:

En este sector de perforación se encontraron cuatro piezómetros distribuidos en dos sitios y cubiertos con cajas de protección en concreto, en cada una de las cuales se encuentra instalado un piezómetro de Cuerda vibrante y uno tipo Casagrande.

Según la información suministrada y la verificación realizada, uno de los piezómetros de Cuerda vibrante fue dañado muy posiblemente en el momento de su instalación o de la

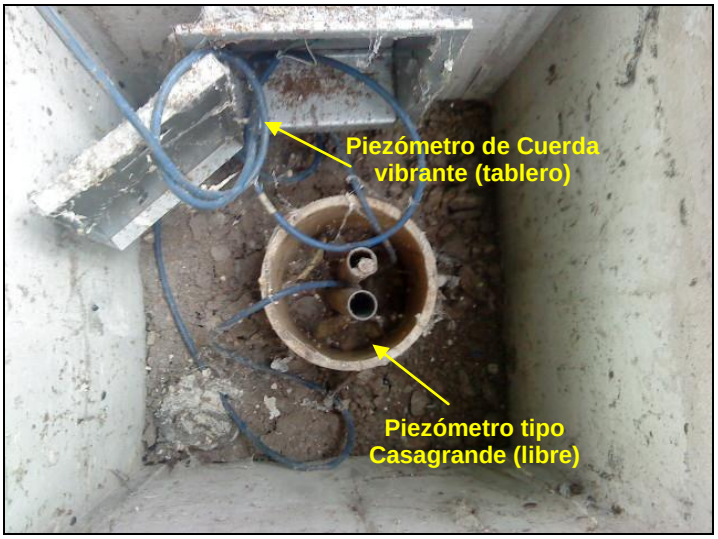
colocación de un deformímetro, por lo tanto solamente se encuentran en funcionamiento tres de los cuatro equipos.

La instrumentación disponible e identificada en esta zona se relaciona a continuación. En las Fotografías siguientes se presenta detalles del estado actual.

- Piezómetro tipo Casagrande: Profundidad 7 metros
- Piezómetro tipo Casagrande: Profundidad 72 metros
- Piezómetro de Cuerda Vibrante: Profundidad 29.5 metros



Fotografía 10. Detalle de ubicación y estado de piezómetros – Calle 127Bis – Cra. 20.



Fotografía 11. Distribución de los piezómetros instalados – Calle 127Bis – Cra. 20.

✓ Parque Timiza:

En este sitio se encontraron tres piezómetros distribuidos en dos cajas, relacionados a continuación:

- Piezómetro tipo Casagrande: Profundidad 4.50 metros
- Piezómetro tipo Casagrande: Profundidad 139 metros
- Piezómetro de Cuerda Vibrante: Profundidad 29 metros

En esta perforación se encontró afectada (parcialmente destruida) una de las cajas que protege a uno de los piezómetros tipo Casagrande y al piezómetro de Cuerda vibrante, y taponada la instrumentación con suelo orgánico hasta el tope de la caja. La otra caja de protección no había sido violentada ni deteriorada, pero se evidencia igualmente que toda la zona ha sido reconformada y elevado el nivel del terreno, pues el relleno se encuentra hasta casi el nivel de las tapas en ambas cajas.

Para proceder con la verificación del estado y lecturas de la instrumentación, se retiró el relleno y se recupero el piezómetro tipo Casagrande así como el de Cuerda vibrante sin presentar errores en las lecturas obtenidas. En las siguientes Fotografías se aprecian detalles del sitio de instalación.



Fotografía 12. Estado inicia de los piezómetros afectados – Parque Timiza.

✓ Universidad Agraria:

En esta perforación se encontraron cuatro piezómetros distribuidos en dos cajas, en cada una de las cuales hay un piezómetro de Cuerda vibrante y uno tipo Casagrande.

De acuerdo con la información suministrada, uno de los piezómetros tipo Casagrande instalado a 15 m de profundidad se encuentra dañado, por lo que se evidencia el nivel de agua en superficie casi a tope (ver detalle en la Fotografía 15), aunque en el registro histórico de lecturas el nivel de agua se presenta superficial; igualmente dos piezómetros tipo Casagrande externos están taponados. Por lo anterior, solamente se encuentran en funcionamiento tres equipos de instrumentación geotécnica, distribuidos así:

- Piezómetro tipo Casagrande: Profundidad 83 metros
- Piezómetro de Cuerda Vibrante: Profundidad 29 metros
- Piezómetro de Cuerda Vibrante: Profundidad 125 metros



Fotografía 13. Detalle de ubicación y estado de piezómetros – Universidad Agraria.



Fotografía 14. Verificación del estado de los piezómetros – Universidad Agraria.



Fotografía 15. Detalle de piezómetro libre posiblemente dañado – Universidad Agraria.

✓ Aeropuerto El Dorado (Centro Nacional de Aeronavegación):

En este sector de perforación se encontraron cuatro piezómetros instalados, distribuidos en dos cajas de protección así: un piezómetro tipo Casagrande en un sitio y los otros tres en otro. La profundidad de cada uno es la siguiente:

- Piezómetro tipo Casagrande: Profundidad 7 metros.
- Piezómetro tipo Casagrande: Profundidad 116 metros
- Piezómetro de Cuerda vibrante: Profundidad 30 metros
- Piezómetro de Cuerda vibrante: Profundidad 240 metros

En las siguientes Fotografías se aprecian detalles del estado de la instrumentación y de las labores de verificación y registro.



Fotografía 16. Distribución de los piezómetros – Aeropuerto El Dorado CNA.



Fotografía 17. Verificación del estado de piezómetros de Cuerda vibrante – CNA.



Fotografía 18. Verificación del estado del piezómetro tipo Casagrande – CNA.

Vale la pena mencionar que se procederá a efectuar el mantenimiento y reparación de la instrumentación y cajas de protección de los piezómetros localizados en la Calle 127Bis con Carrera 20 y en el Parque Timiza, esto con el propósito de preservar su estado y así efectuar un monitoreo periódico de niveles piezométricos.

6.2 ANÁLISIS DE LAS LECTURAS PIEZOMÉTRICAS

Para la evaluación de los niveles piezométricos actuales de los acuíferos de la ciudad, y cuya variación es un posible factor asociado al proceso de subsidencia, se realizaron dos campañas de toma de lecturas piezométricas entre noviembre de 2010 y enero de 2011 como parte fundamental de análisis.

A continuación se resumen los datos reportados de este monitoreo, integrados con los resultados ya reportados por Ávila (1998).

- ✓ Calle 127Bis con Carrera 20:

Las lecturas tomadas del piezómetro Casagrande (PzC) a 7 m de la Figura 19 indican una de columna de agua cercana a los 6.40 m en 1996 y el descenso hasta casi 4.90 m para lecturas posteriores, correspondientes con un nivel de agua de -2.20 m.

Para el piezómetro tipo Cuerda vibrante (PzCV) a 30 m, ver gráfica de la Figura 20, se observan variaciones de la columna obtenida entre los 27.80 m y 29.20 m durante todo el período de registro, con una tendencia general hacia los 28.40 m, pero con una caída hacia los 27.85 m para el último registro.

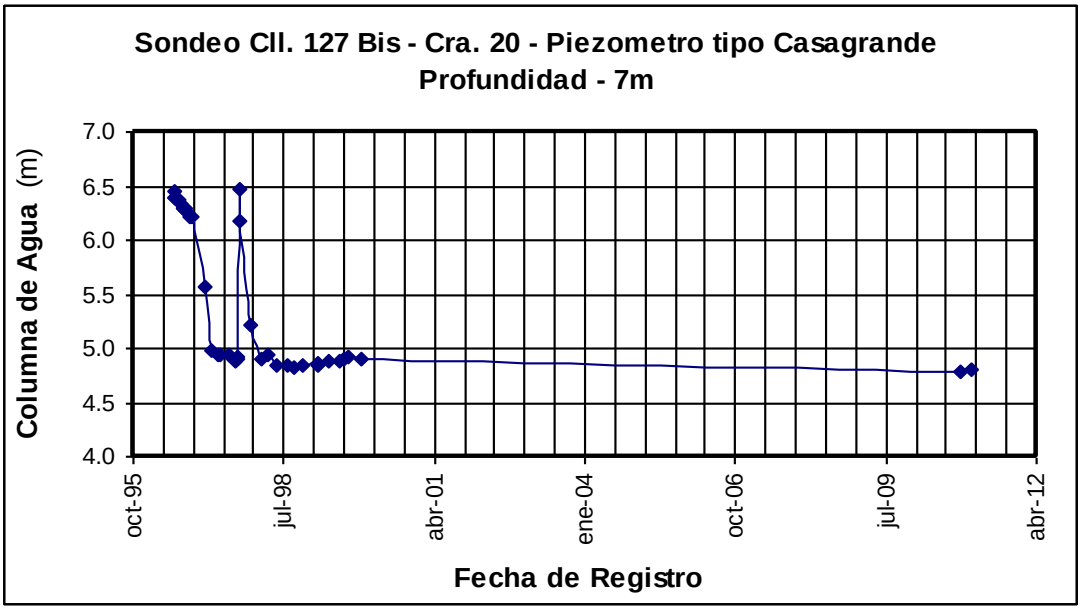


Figura 19. Lecturas Cll. 127Bis con Cra. 20 – Piezómetro tipo Casagrande a -7 m.

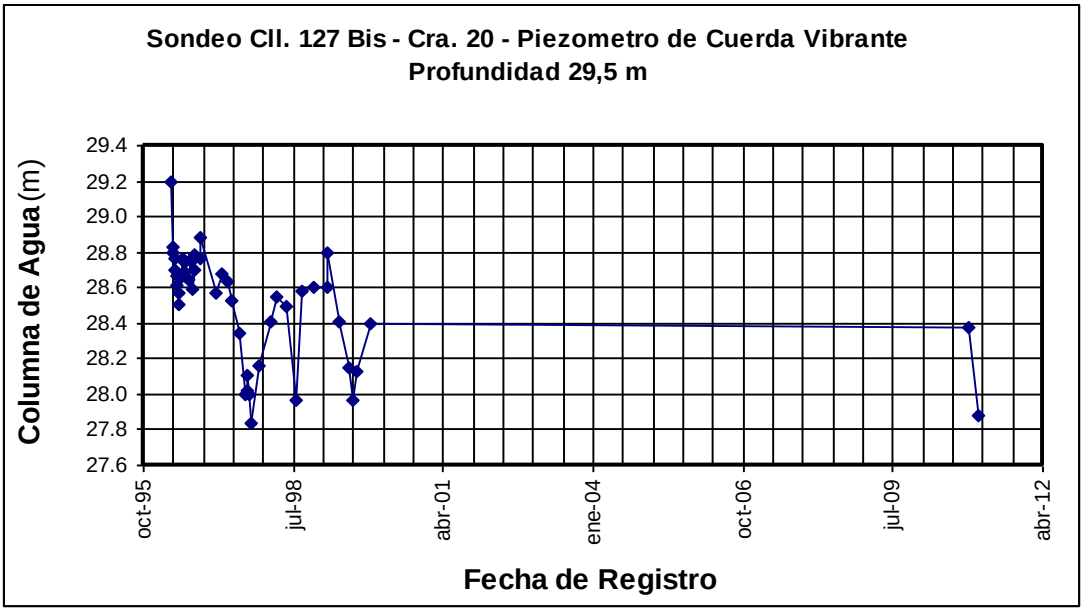


Figura 20. Lecturas Cll. 127Bis con Cra. 20 – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -30 m.

Del piezómetro Casagrande (PzC) a 72 m se puede generalizar un descenso no muy significativo de la columna de agua de 70.80 m a 70.10 m, con oscilaciones importantes desde las lecturas iniciales en 1996 a las del 2010 (cuatro descensos hasta casi 70.30 m) y con un nivel de agua promedio cercano a los -1.60 m.

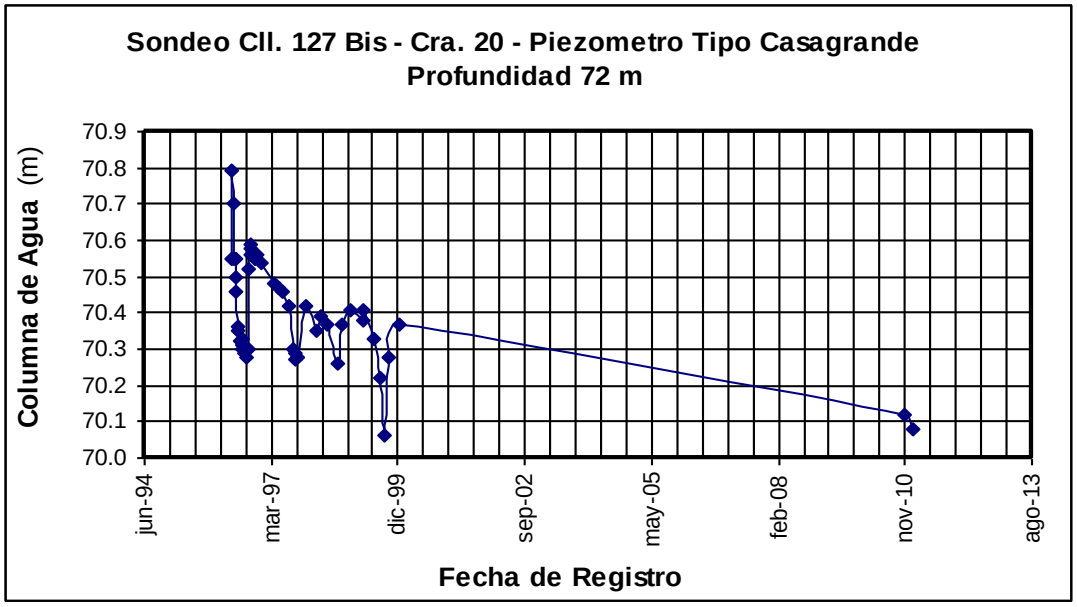


Figura 21. Lecturas Cll. 127Bis con Cra. 20 – Piezómetro tipo Casagrande a -72 m.

✓ Parque Timiza:

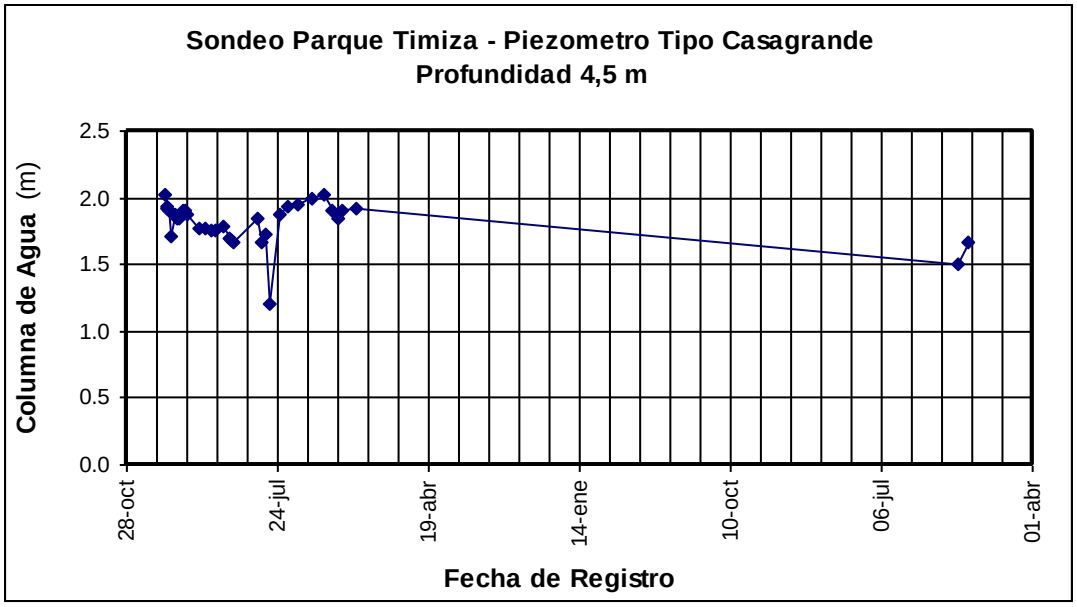


Figura 22. Lecturas Parque Timiza – Piezómetro tipo Casagrande a -5 m.

La tendencia general del PzC a 4.50 m indica una variación de la columna de agua entre los 1.20 m y 2.0 m, correspondientes a un nivel de agua promedio cercano a -2.70 m.

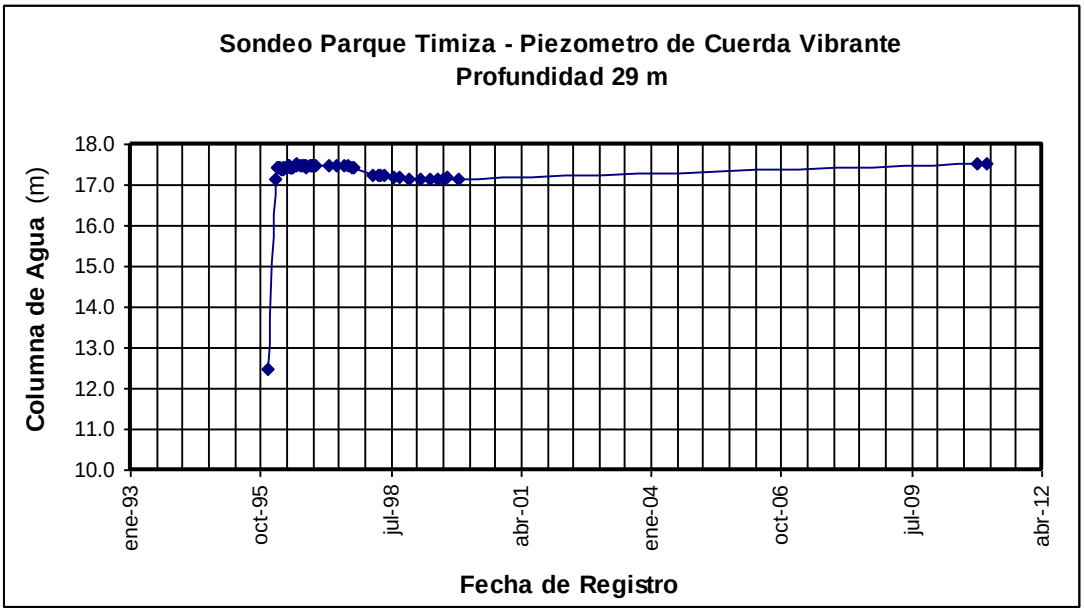


Figura 23. Lecturas Parque Timiza – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -29 m.

Del PzCV a 29 m no se aprecia una variación sustancial de las lecturas posteriores al año 1995, donde se pasa de una columna de agua de 12.50 m a una promedio de 17.40 m.

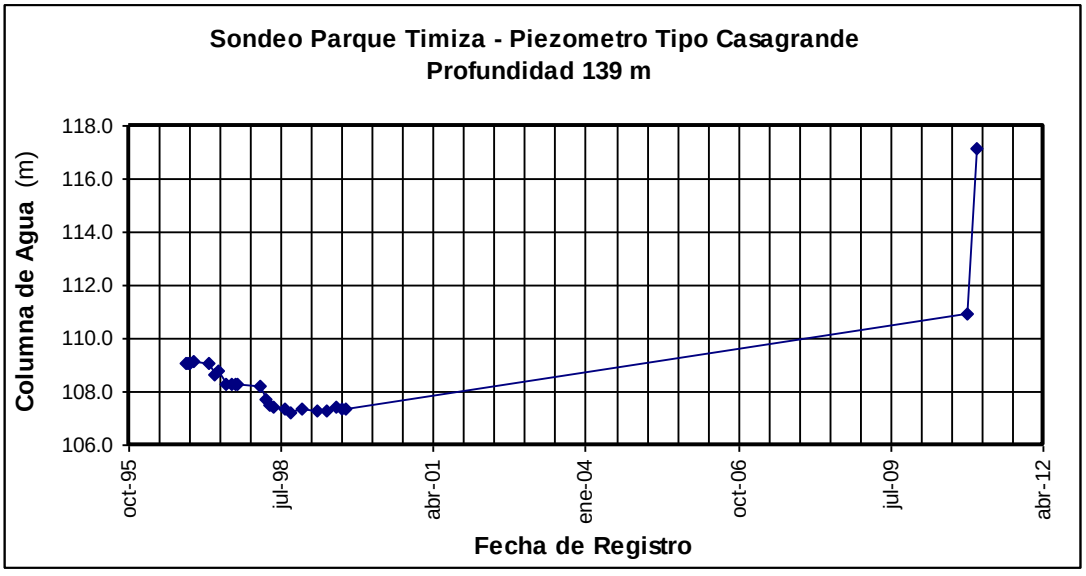


Figura 24. Lecturas Parque Timiza – Piezómetro tipo Casagrande a -139 m.

En el PzC a 139 m se pasa de un descenso inicial de la columna de agua de 109 m a 107.30 m, entre 1996 y 1999, a un incremento hasta casi 117 m en el año 2011, pasando de un nivel de agua inicial promedio de casi -30.90 m a los -21.9 m en la última lectura.

✓ Universidad Agraria:



Figura 25. Lecturas Universidad Agraria – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -29 m.

Las lecturas del PzCV a 29 m presentan una columna de agua relativamente homogénea variando para dos periodos entre los 20.90 m y 21.60 m en promedio, con dos saltos o "picos" reportados en mayo de 1996 y en febrero de 1998.

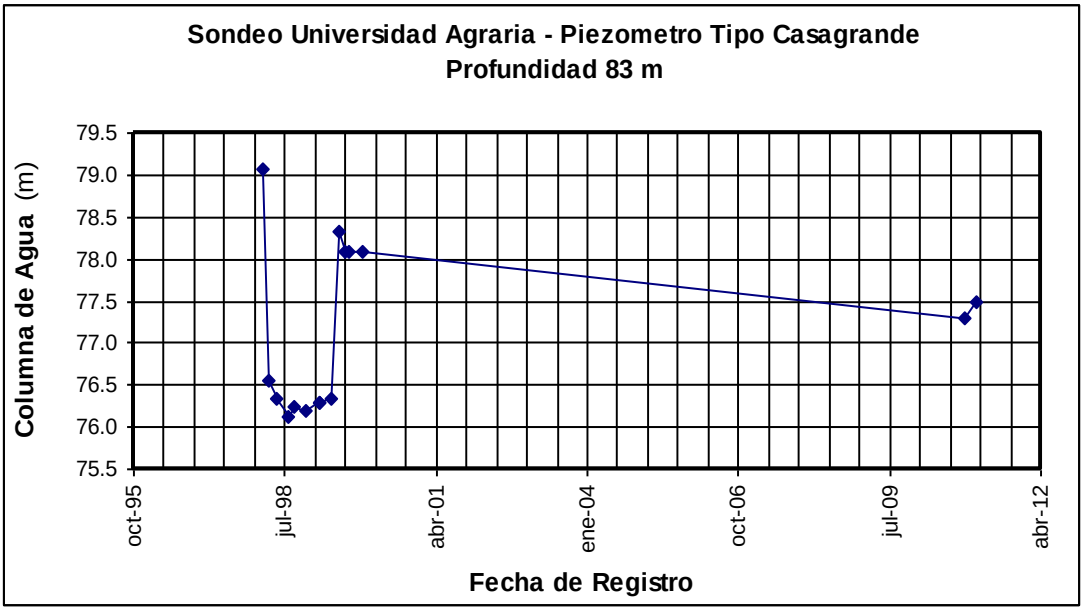


Figura 26. Lecturas Universidad Agraria – Piezómetro tipo Casagrande a -83 m.

El PzC a 83 m presenta una oscilación de las lecturas para el periodo inicial (entre los años 1998 a 1999) y reciente de registro (2011), con columnas de agua entre los 79.10 m a 76.30 m y 77.50 m, respectivamente. El nivel de agua presentó un salto de los -3.90 m a -6.70 m en promedio (entre marzo y abril del 1998) y entre -4.70 m y -5.50 m (para julio de 1999 y enero del 2011).

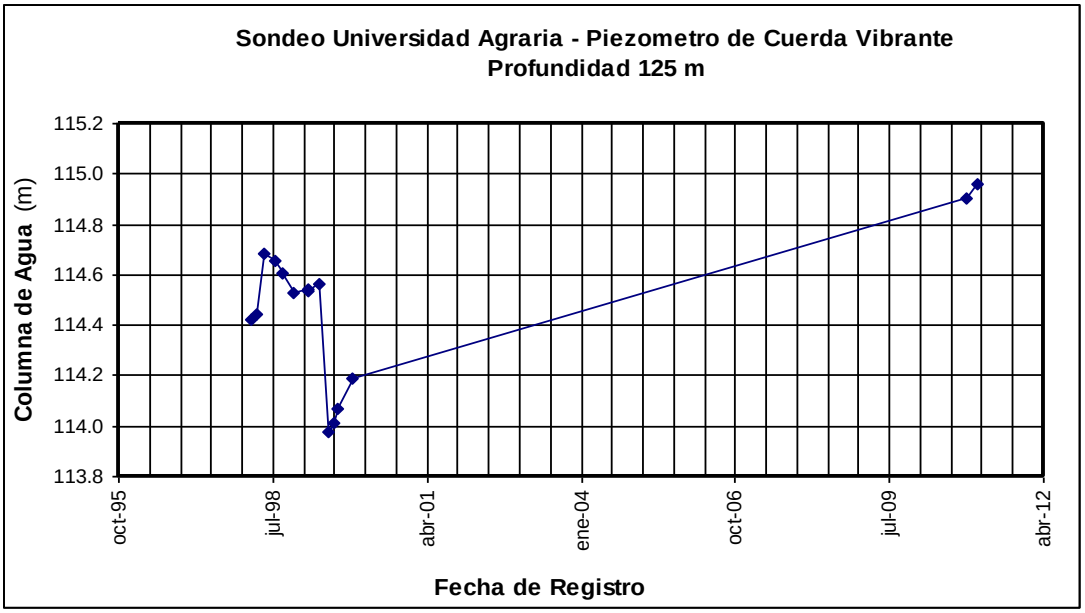


Figura 27. Lecturas Universidad Agraria – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -125 m.

La columna de agua obtenida de las lecturas del PzCV a 125 m indican una variación entre casi los 114.0 m y los 115.0 m en todo el período de lectura, con un valor inicial de 114.42 m en marzo de 1998, una tendencia posterior al aumento hasta los 114.55 m en promedio, un salto o caída hasta casi loa 114.0 m en julio de 1999 y un consecuente incremento hasta aproximadamente 115.0 m a inicios del 2011, correspondiente a un nivel de agua de casi -10.0 m.

- ✓ Aeropuerto El Dorado (CNA):

Del primer piezómetro instalado tipo Casagrande (PzC) a 7 m se obtienen columnas de agua cercanas a los 4.76 m durante el monitoreo realizado en el año 1996 y de casi los 4.92 m en promedio entre diciembre de 1999 y enero del 2011, con un descenso gradual bien marcado hasta los 3.67 m y posterior recuperación para el periodo intermedio (abril de 1998). Ver detalles del comportamiento en la gráfica de la Figura 28.

Por otro lado, los niveles de agua han variado en un intervalo entre los -2.20 m y -3.30 m aproximadamente, para las columnas de agua mínima y máxima (promedio del registro inicial y final) reportadas, respectivamente.

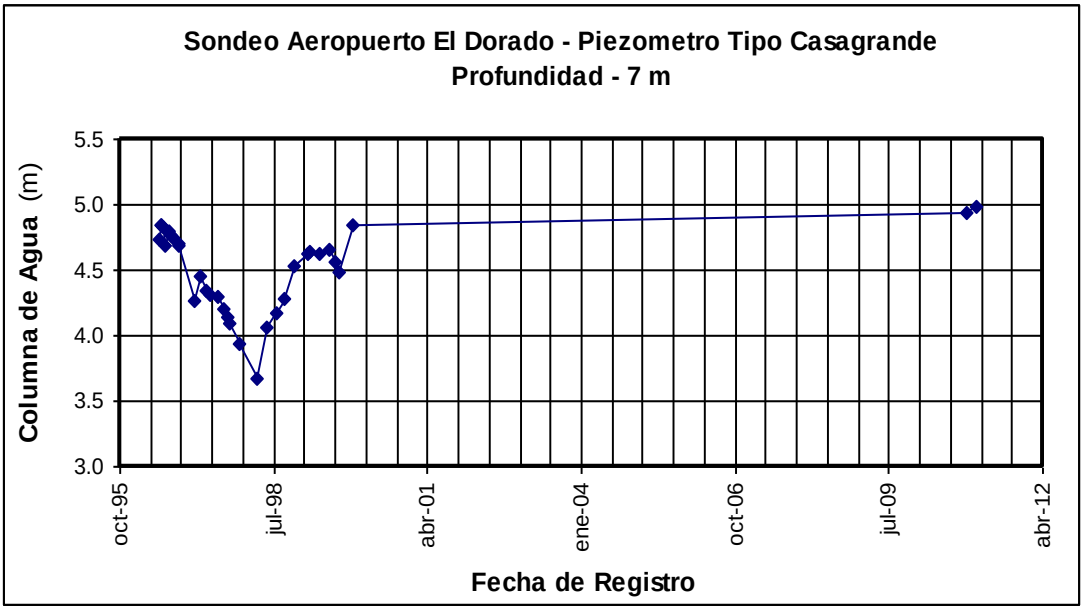


Figura 28. Lecturas Aeropuerto El Dorado – Piezómetro tipo Casagrande a -7 m.

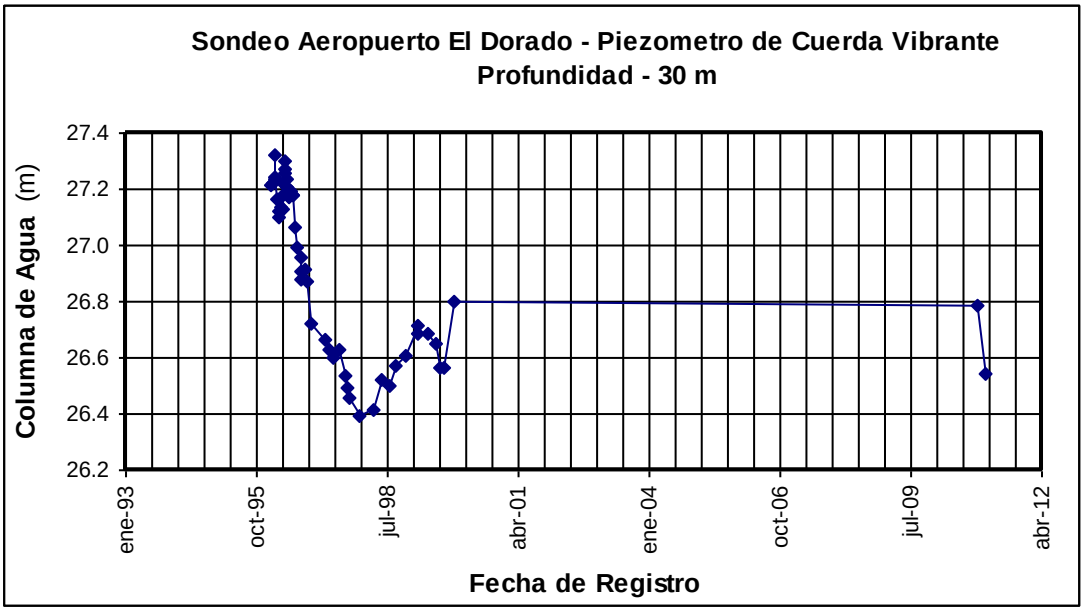


Figura 29. Lecturas Aeropuerto El Dorado – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -30 m.

Del comportamiento del piezómetro de tipo Cuerda Vibrante (PzCV) a 30 m, se aprecia en general un descenso de la columna de agua de los 27.22 m a 26.39 m entre febrero de 1996 y diciembre de 1997, con un aumento posterior hasta los 26.80 m (lecturas finales de 1999 y 2010) y caída a 25.54 m (2011), con un salto similar a 26.56 m en agosto y septiembre de 1999. El nivel de agua ha oscilado entre los -2.70 m y -3.60 m.

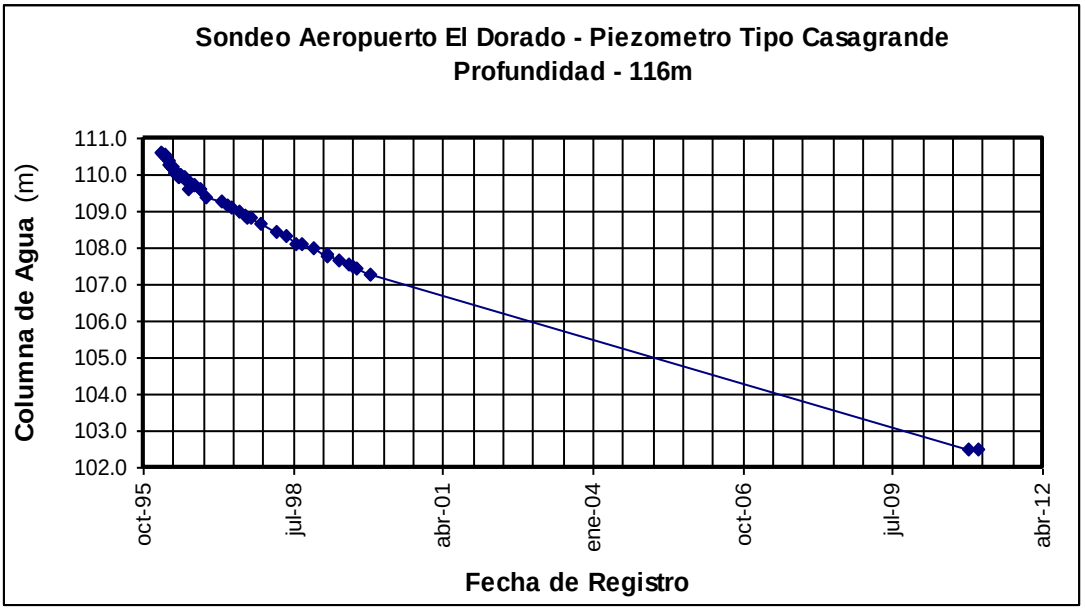


Figura 30. Lecturas Aeropuerto El Dorado – Piezómetro tipo Casagrande a -116 m.

En el PzC a 116 m se observa un descenso gradual de la columna de agua de 110.6 m a 102.50 m durante el período de monitoreo, con niveles de agua de -5.40 m a -13.50 m.

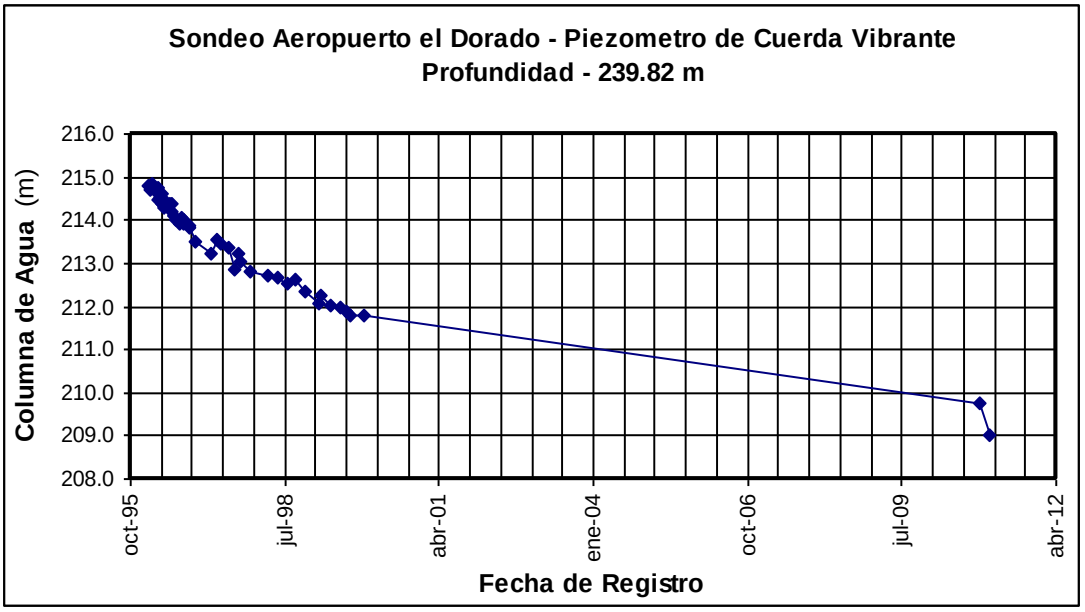


Figura 31. Lecturas Aeropuerto El Dorado – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -240 m.

Del PzCV a 240 m se aprecia también un comportamiento descendente del nivel de agua desde casi los -25.0 m a -30.80 m, por descenso gradual de la columna de agua.

✓ INGEOMINAS:

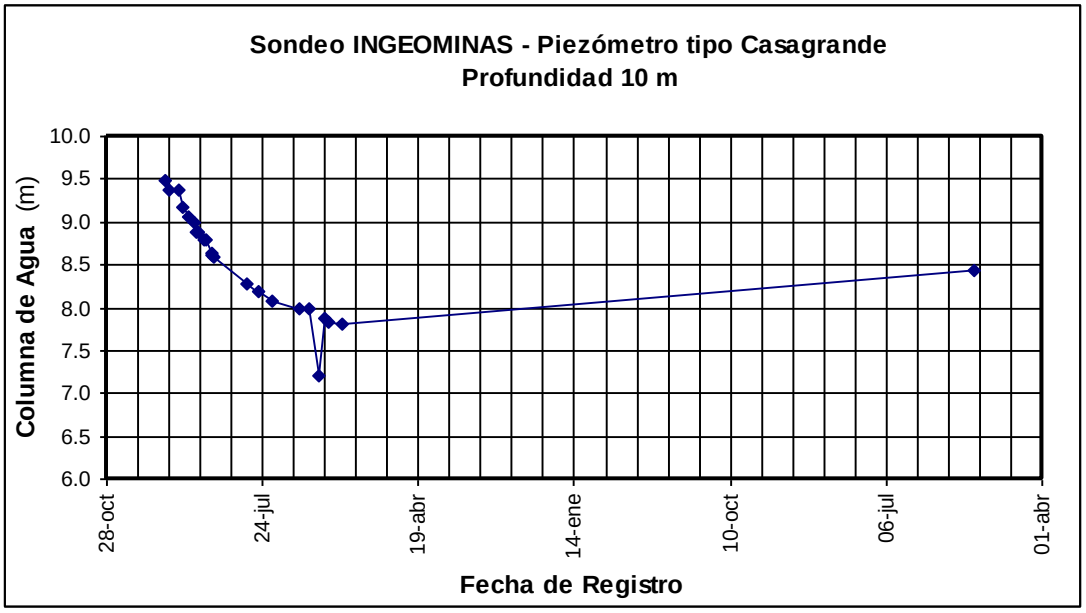


Figura 32. Lecturas INGEOMINAS – Piezómetro tipo Casagrande a -10 m.

Este PzC a 10 m presenta un descenso de la columna de agua de 9.50 m a 7.80 m para el periodo de monitoreo entre 1996 y 1999, un leve salto a 7.20 m (en julio de 1999) y un aumento a 8.43 m para el 2011. El nivel de agua varía entre -0.52 m y -2.19 m.

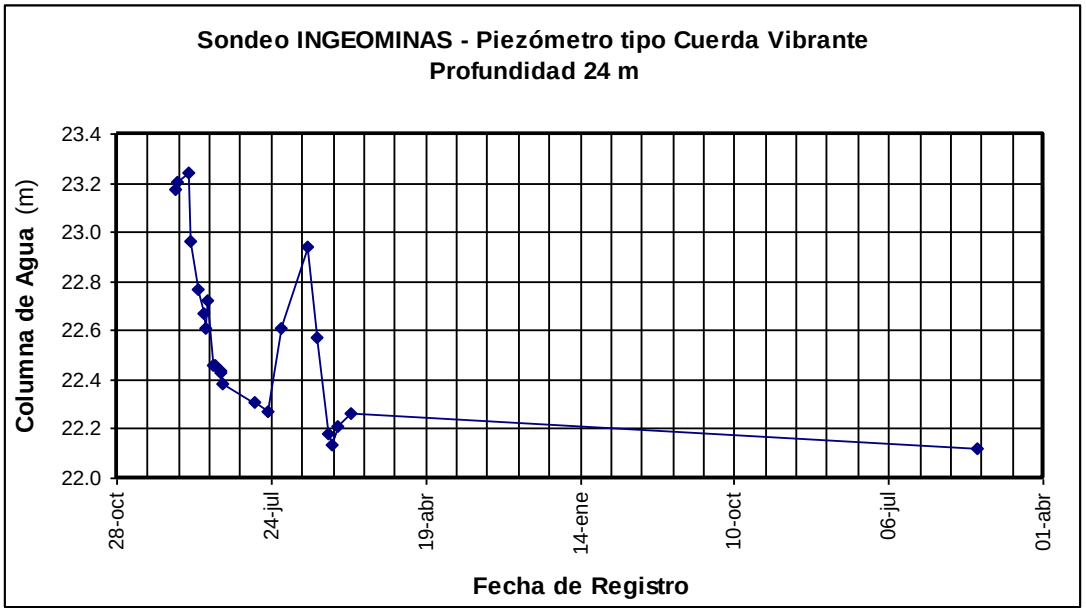


Figura 33. Lecturas INGEOMINAS – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -24 m.

Del PzCV a 24 m se observa una disminución de la columna de agua de 23.24 m a casi 22.30 m entre 1996 y 1999, un aumento a 22.94 m en marzo de 1999 y una tendencia al descenso a 22.12 m en la última lectura (enero de 2011), para un nivel final de -1.88 m.

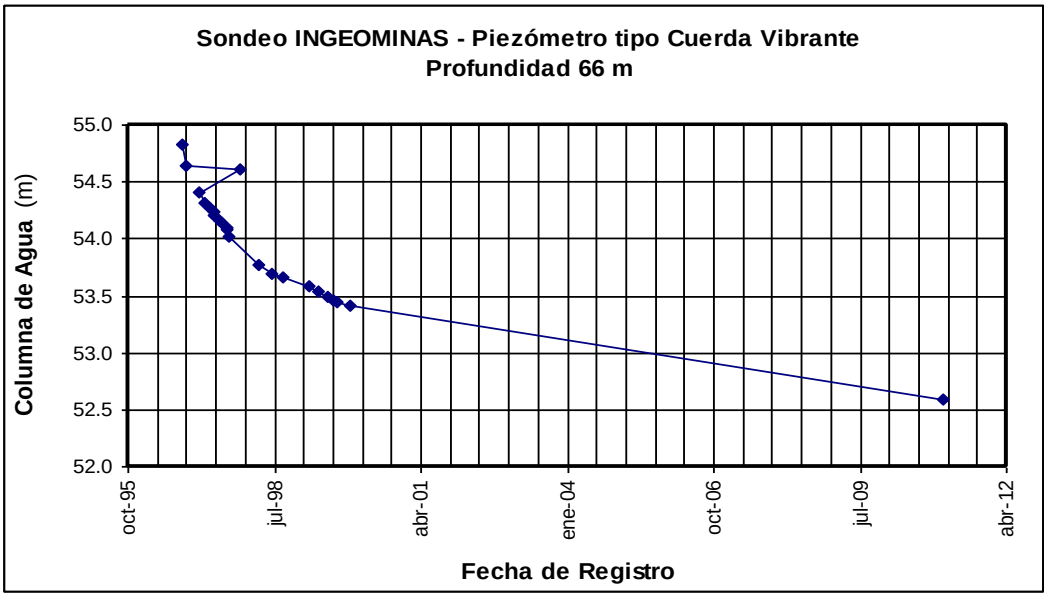


Figura 34. Lecturas INGEOMINAS – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -66 m.

En el PzCV a 66 m se observa un descenso gradual de la columna de agua de 54.84 m a 52.60 m, con niveles de agua de -11.16 m (1996) a -13.41 m (2011).

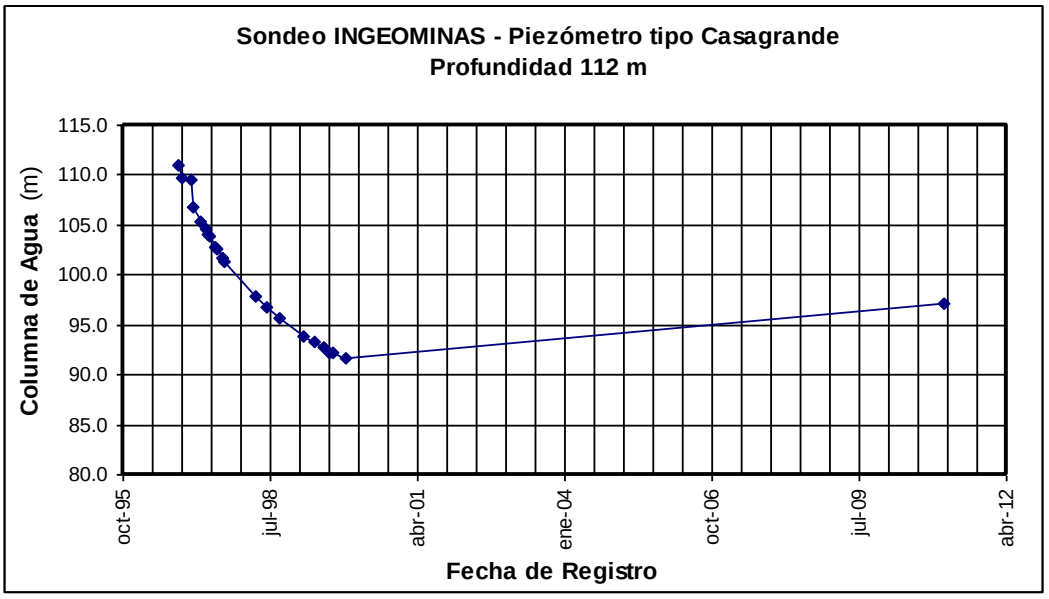


Figura 35. Lecturas INGEOMINAS – Piezómetro tipo Casagrande a -112 m.

Del PzC a 112 m se aprecia un comportamiento descendente gradual pero significativo del nivel de agua, desde casi -1.0 m a -20.40 m, entre noviembre de 1996 y diciembre de 1999, con un descenso aproximado de la columna de agua de 19.40 m en 37 meses o casi 3 años de monitoreo, sin embargo esta tendencia se invierte y se produce un aumento de 14.90 m entre 1999 y 2011. Esta "pérdida" de carga es importante resaltarla puesto que es la de mayor magnitud registrada en los equipos de instrumentación evaluados, pero se deben continua las lecturas para saber si la recarga observada se tiende a mantener en el tiempo.

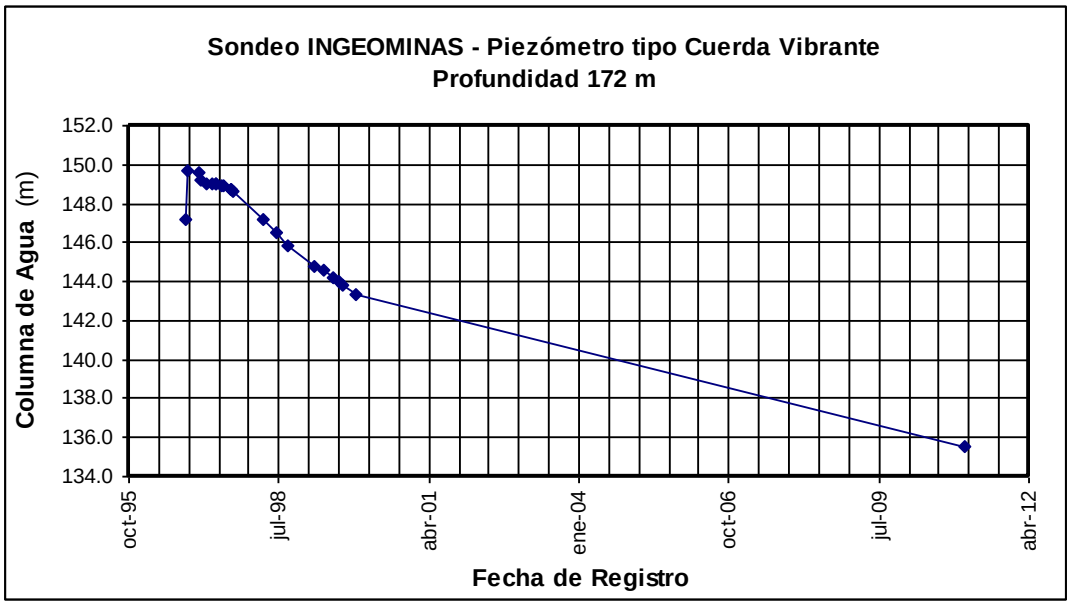


Figura 36. Lecturas INGEOMINAS – Piezómetro tipo Cuerda vibrante a -172 m.

En el PzCV a 172 m se destaca una tendencia en el descenso de la columna de agua pero en menor proporción que del anterior piezómetro, con un salto o incremento en la lectura inicial de 147.15 m a 149.65 m, en noviembre de 1996, y un posterior descenso hasta los 135.51 m en el 2011, con un descenso del nivel de agua de 14.10 m en 15 años.

La variación del nivel de agua más amplia para el intervalo de lecturas de este piezómetro se da entre los -22.40 m y -28.70 m, para una diferencia de nivel de aproximadamente 3.80 m en los casi 37 meses de monitoreo de la instrumentación, valor mucho menor a la registrada en piezómetro instalado a 112 m.

6.3 PERFILES DE PRESIÓN DE AGUA CON LA PROFUNDIDAD

A partir de las columnas de agua promedio calculadas para cada sitio y cada profundidad en la que se encuentran instalados los piezómetros, se procedió a determinar la presiones de agua promedio en ese nivel y a compararlas con la presión hidrostática teórica a esa profundidad por cada año independiente de monitoreo (en general entre 1996 y 2010). En

las siguientes Figuras se presentan los gráficas de variación de la presión (en columna de agua) con la profundidad para los datos medidos y teóricos.

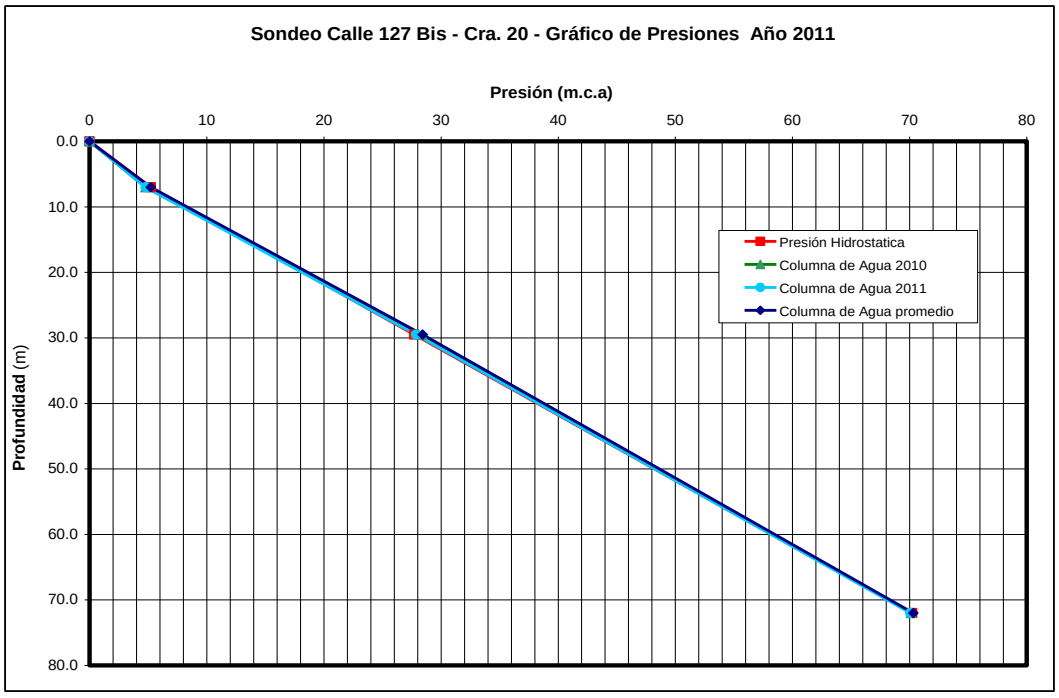


Figura 37. Piezómetros Calle 127Bis con Cra. 20 – Perfil de presiones al año 2011.

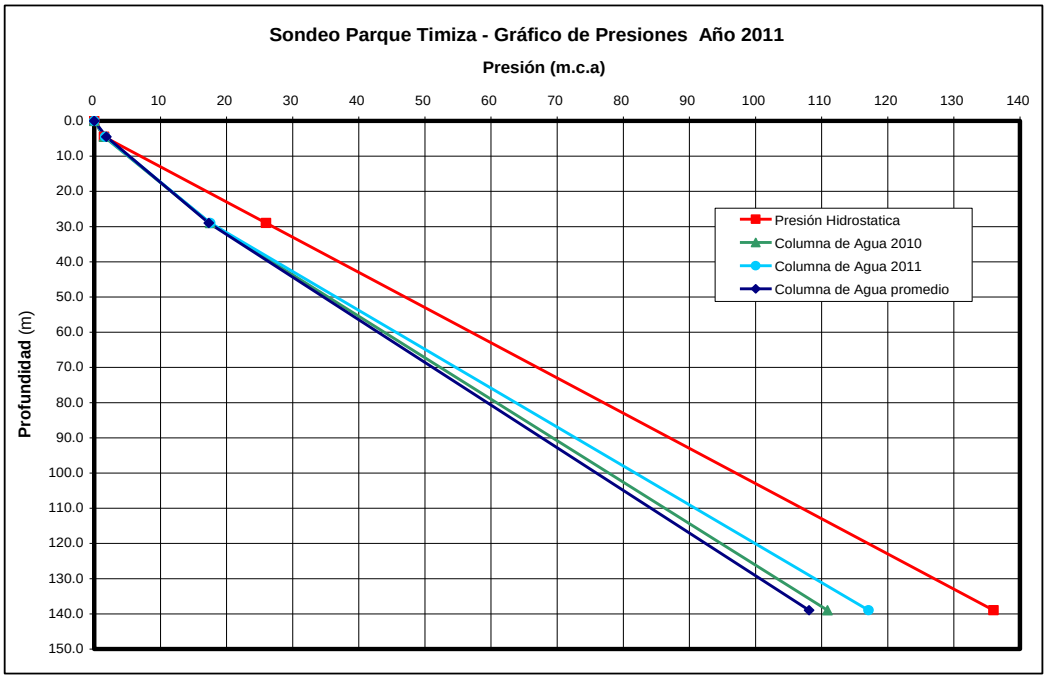


Figura 38. Piezómetros Parque Timiza – Perfil de presiones al año 2011.

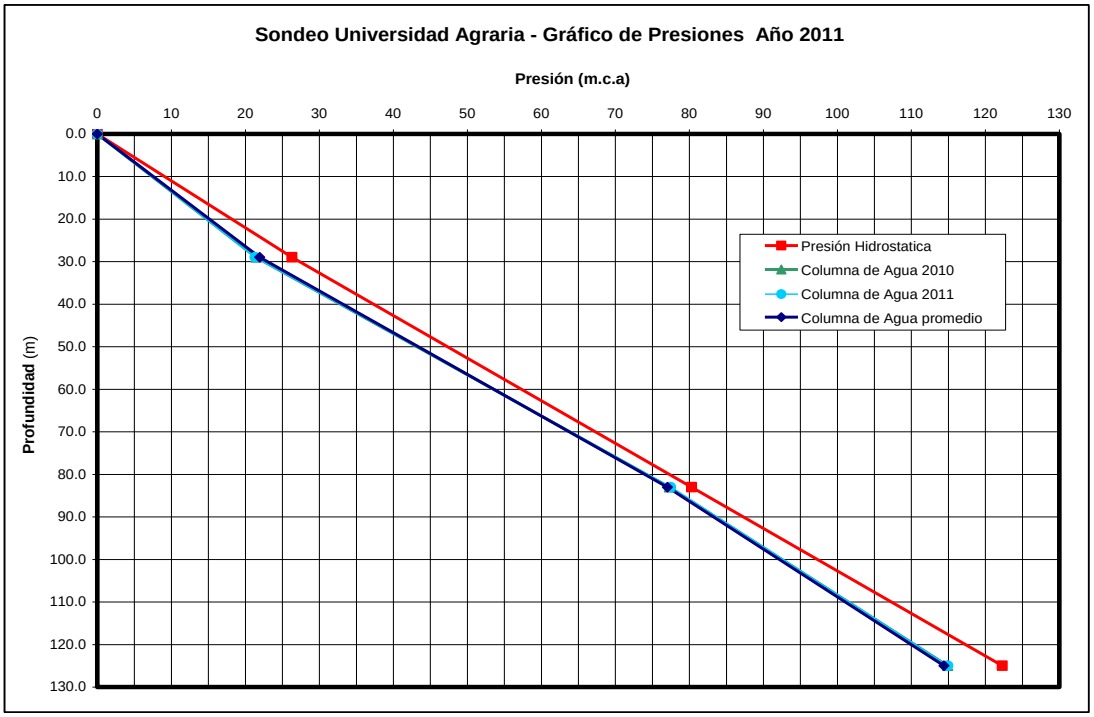


Figura 39. Piezómetros Universidad Agraria – Perfil de presiones al año 2011.

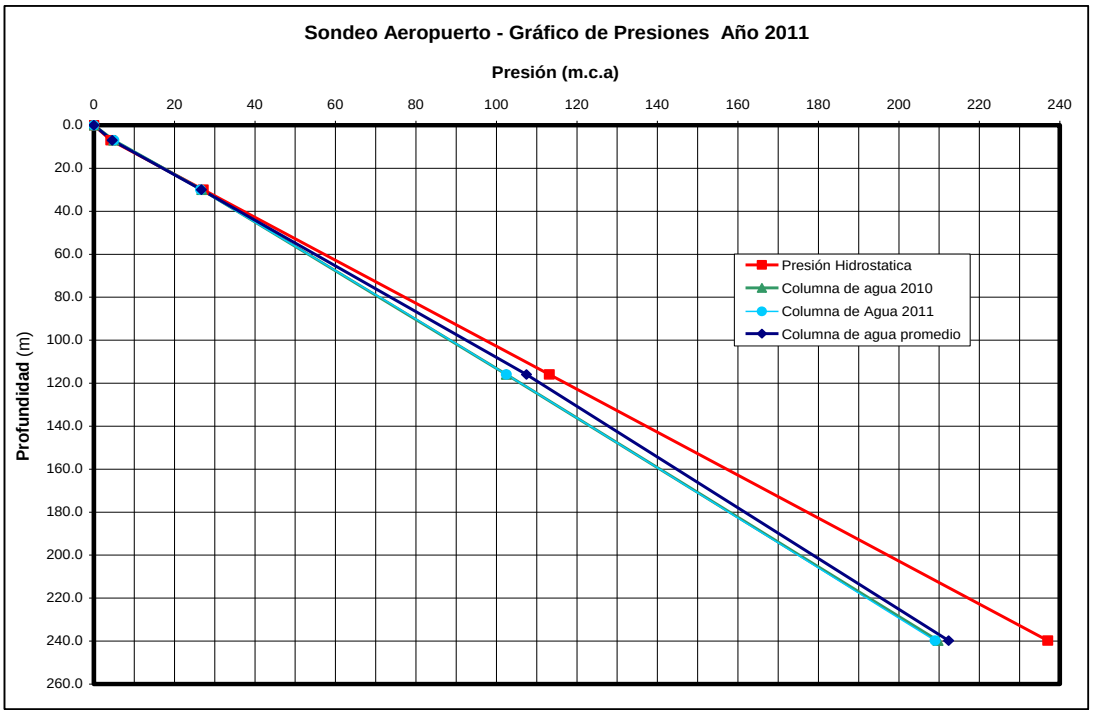


Figura 40. Piezómetros Aeropuerto El Dorado – Perfil de presiones al año 2011.

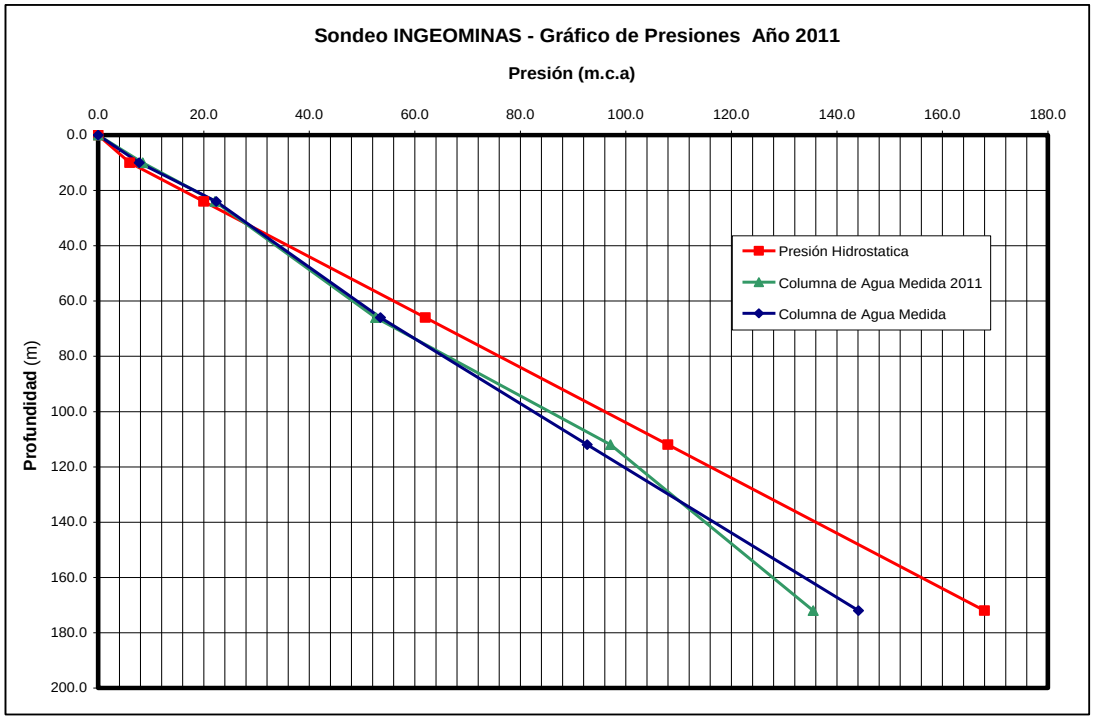


Figura 41. Piezómetros INGEOMINAS – Perfil de presiones al año 2011.

En las gráficas anteriores el perfil en línea azul corresponde al promedio de las presiones por columna de agua medida durante todo el periodo de monitoreo hasta 1999 en el sitio específico; la línea roja representa la presión hidrostática teórica, de variación uniforme con la profundidad, las líneas color verde y turquesa corresponden a las columnas de agua calculadas para la lecturas registradas en las campañas de monitoreo de noviembre del 2010 y enero del 2011, respectivamente.

En general se observa en todas las gráficas que el perfil de presión hidrostática o teórica es superior a los obtenidos de las columnas de agua promedio medidas in-situ, salvo en los perfiles de los piezómetros de la Calle 127Bis con Carrera 20, en donde se aprecia un comportamiento relativamente similar de todas las presiones con la profundidad.

Respecto del los perfiles promedio de las presiones por columna de agua medida durante el periodo de monitoreo a 1999, comparadas con los obtenidos para las campañas del 2010 y 2011, se percibe un comportamiento similar de las presiones en los piezómetros de la Calle 127Bis y la Universidad Agraria, mientras que en el Parque Timiza se obtuvo un leve aumento de las presiones para el 2010 y 2011, y para el del Aeropuerto una disminución con la profundidad. De los piezómetros de INGEOMINAS las presiones de la campaña del 2010 exhiben un comportamiento similar superficialmente en relación con la distribución inicial del 1999 pero variación en profundidad.

7 MODELO CONCEPTUAL DE SUBSIDENCIA

7.1 FACTORES QUE PUEDEN GENERAR SUBSIDENCIA EN BOGOTÁ

A continuación se indican los factores por los que se puede presentar el fenómeno de subsidencia:

i. Reducción de los niveles piezométricos del terreno en profundidad, lo cual genera procesos de consolidación primaria a largo plazo, para periodos de tiempo entre los 20 y 100 años aproximadamente, incluso más. Esta es sin duda la mayor causa de subsidencia en la mayoría de los casos reportados en la literatura, especialmente en depósitos de suelos blandos como el de la ciudad de Bogotá.

ii. Desecación superficial por descenso de los niveles freáticos, lo que favorece la consolidación y retracción superficial. Este es un proceso que puede tener tres causas principales; la primera correspondiente a cambios estacionales relacionados con los regímenes de lluvia y sequía los cuales generan deformaciones a corto plazo, la segunda por descensos generados por 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, es decir, un proceso de largo plazo relacionado con el factor de reducción de presión en profundidad indicado anteriormente y la tercera que en algunos casos puede ser muy importante se relaciona con bombeo para la construcción de edificaciones, especialmente de los sótanos, lo cual genera abatimientos muy rápidos del nivel freático que inducen asentamientos y cuya recuperación por expansión una vez se ha restablecido el nivel freático es muy baja.

iii. Efectos de la vegetación, particularmente árboles de gran tamaño que extraen del subsuelo importantes volúmenes de agua mediante succión ejercida por sus raíces. Estas son deformaciones localizadas en el radio de acción de cada árbol, por lo cual en términos estrictos no corresponden a un problema de subsidencia, sin embargo, si hay abundante número de árboles pueden generarse asentamientos en grandes áreas.

iv. Sobrecarga del terreno por el peso de las edificaciones y las cargas de trabajo como vehículos. Esta carga induce procesos de consolidación en tiempos relativamente cortos de aproximadamente 1 a 5 años.

v. Descensos de la superficie del terreno por efectos tectónicos, relacionados con el acomodo regional de las placas. Este proceso es de largo plazo y puede ser imperceptible debido al movimiento uniforme tanto de los estratos de roca como de los suelos blandos.

vi. Consolidación secundaria de los depósitos de arcilla por efectos viscosos sin que existan cambios en los niveles de carga. Estos asentamientos en general son de muy largo plazo pero sus magnitudes son relativamente bajas.

vii. Existe otras posibles causas del proceso de subsidencia pero que en este caso no se consideran porque no tienen mucha relación actualmente con el proceso que se viene presentando en la ciudad. Estas son: la subsidencia por explotaciones mineras en profundidad que pueden generar colapsos o deformaciones importantes en las galerías de explotación las cuales se reflejan en superficie como subsidencia o también la construcción de túneles u otras obras subterráneas que pueden producir descensos en los niveles superficiales del terreno cuando sufren ciertas deformaciones en profundidad o cuando generan abatimientos de las presiones de agua. Este es el caso de interés para la posible construcción del metro u otras obras subterráneas.

Lo más probable es que las deformaciones superficiales del terreno se generen por efectos combinados de múltiples factores de diferente incidencia relativa, por lo cual es necesario evaluar el posible efecto de cada una de ellas.

7.1.1 Evaluación de los factores de subsidencia

Para evaluar y deducir cuál o cuáles factores son los más significativos en el fenómeno de subsidencia se desarrollaron las siguientes actividades respecto de cada uno de los factores mencionados.

- Factor i: Reducción de los niveles piezométricos

Para este caso se efectuó la identificación del sitio y evaluación del estado actual de la instrumentación geotécnica consistente en piezómetros múltiples de cuerda vibrante (hilo vibrátil) y libres (o de Casagrande), instalada entre 1996 y 1997 por INGEOMINAS en seis puntos de la ciudad para el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá.

Se realizaron dos campañas para el registro o medición de los niveles piezométricos en los puntos de instrumentación disponible, datos con los cuales se realizó la respectiva comparación con las presiones hidrostáticas y las lecturas históricas disponibles desde hace aproximadamente 15 años.

En términos generales los resultados no han mostrado una variación significativa. Para los sitios y períodos en donde los niveles han descendido sería un indicador que el proceso en profundidad continúa y que puede resultar muy relevante en las deformaciones totales, sin embargo, esto se verificó y cuantificó con los cálculos numéricos de consolidación unidimensional y bidimensional efectuados. De esta forma se determinó el espesor del perfil del subsuelo afectado y cuánto se ha deformado. Con base en tales análisis, que son fruto de discusión posterior se puede decir que proceso de transferencia de esfuerzos entre los niveles profundos y la superficie es bastante lento, debido a la baja permeabilidad de los estratos de arcilla.

- Factor ii: Desecación superficial por descenso de los NF

Con la información disponible de estudios de suelos y las mediciones recientes de niveles freáticos, se pudo establecer de manera aproximada la variación del nivel freático en algunos sectores de la ciudad durante los últimos 10 a 15 años. Esto permite efectuar estimativos de la deformación superficial entre aproximadamente los 0.0 m y los 15 m de profundidad.

Para la zona no saturada se puede presentar retracción del terreno superficial, la cual es factible de ser evaluada a partir de la información disponible sobre cambios de humedad natural y curvas de retención del suelo. Estos análisis están por fuera de los alcances del presente estudio aunque al respecto se adelantan estudios complementarios de investigación en la Universidad Nacional.

- Factor iii: Desecación superficial por bombeo

Este factor es de gran influencia en magnitud pero se localiza en áreas pequeñas, los resultados de la modelación considerando un descenso rápido del nivel freático muestran magnitudes de asentamientos del orden de 20 cm en zonas blandas

Factor iv: Efectos de la vegetación

La vegetación, como ya se indicó produce efectos locales cuya magnitud está directamente relacionada con las especies vegetales, de tal manera que árboles como los eucaliptos o los pinos que son de gran tamaño, tienen alto consumo de agua y sus raíces se extienden a varios metros respecto al tronco, esta desecación producida por los árboles genera deformaciones en el terreno que de acuerdo con lo observado en varios sitios de la ciudad pueden oscilar entre 10 y 60 cm y afectan especialmente vías y edificaciones de poca altura.

- Factor v: Sobrecarga del terreno

La sobrecarga producida por las edificaciones y su efecto en la consolidación se puede estimar de varias maneras, una de ellas es revisando las consolidaciones evaluadas en los estudios de suelos de edificaciones, lo cual es un parámetro indicativo de gran valor pero sus datos son muy puntuales, otra alternativa menos precisa pero que puede servir para tener un indicativo de las deformaciones en distintos sitios con perfiles geotécnicos típicos o representativos es adoptando una carga promedio correspondiente a un valor de presión de contacto o de transmisión al terreno, por ejemplo de 100 kPa (10 t/m^2), aplicada en diferentes zonas. Con esta carga se calcula la consolidación a diferentes periodos de tiempo y para un perfil entre los 0.0 m y 20 m de profundidad.

- Factor vi: Efectos tectónicos

Los efectos por desplazamientos corticales o tectónicos por componente vertical aún no han sido estudiados para la Sabana de Bogotá. La única estación GPS que tiene un registro histórico apropiado de desplazamiento del terreno (desde octubre de 1994 con

algunas interrupciones) es la estación BOGT, instalada en la superficie del suelo por el INGEOMINAS en convenio con NASA, localizada en predios cercanos al edificio de Química del INGEOMINAS, en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

El proyecto GEORED de INGEOMINAS, encabezado por el Ing. Héctor Mora, estableció sobre afloramiento rocoso una estación permanente de referencia en la parte alta del municipio El Rosal, al occidente la ciudad de Bogotá, de la cual se espera que a finales del 2011 pueda dar algunas indicaciones sobre desplazamientos corticales en roca.

En la actualidad INGEOMINAS con el acompañamiento de entidades del Distrito (UAECD, SDA, etc.), está adelantando la implementación de una red geodésica de propósito múltiple. En la etapa inicial de exploración se visitaron más de 50 sitios potenciales y se seleccionaron alrededor de 36. Esta etapa contó con la participación de un grupo interdisciplinario con profesionales en geología, ingeniería topográfica y geodésica para integración de conceptos. De acuerdo con la información del ingeniero Mora, se espera iniciar el proceso de construcción de 20 estaciones en el mes de julio del 2011 y realizar la ocupación instrumental entre agosto-septiembre. Para el 2012 se espera construir otras 10 y en el 2012 otras 10 para tener en un término de 2-3 años 40 estaciones de campo, con lo cual se pueda mejorar la resolución vertical mediante líneas geodésicas de muy alta precisión, estableciendo tanto las velocidades verticales como horizontales de desplazamiento en suelo y roca.

- Factor vii: Consolidación secundaria

De acuerdo con Rodríguez, (2010), los asentamientos por compresión secundaria calculados para los depósitos de la Sabana de Bogotá son muy bajos y representan para un período de análisis de 10 años, valores inferiores a 1.0 mm, lo que indica que este efecto no parece estar afectando el desarrollo de asentamientos regionales en la actualidad. Este análisis se realizó en el presente estudio para diferentes sitios y los resultados son congruentes respecto al bajo impacto del factor de consolidación secundaria.

7.2 MODELO HIDROGEOLÓGICO PARA ANÁLISIS DE SUBSIDENCIA

7.2.1 Unidades hidrogeológicas y condición hidráulica

Los sistemas acuíferos de la Sabana de Bogotá se caracterizan por su gran complejidad, debida en gran parte a la tectónica propia de la Cordillera de Los Andes y en otra medida a la variedad de litologías presentes en ellos.

Como se explicó anteriormente, sobre la Sábana de Bogotá se han hecho varios estudios geológicos e hidrogeológicos para determinar su geometría subterránea y las características estratigráficas y lito-estructurales, pero desafortunadamente no se cuenta con una adecuada prospección de grandes profundidades y de suficiente detalle para tener claridad total del modelo en cuanto a volúmenes disponibles, zonas de recarga, volúmenes de explotación, etc., y es así como los estudios han plasmado diferentes

conjeturas, todas ellas válidas, pero no contundentes, de tal manera que en ciertos casos algunos de los planteamientos son opuestos a los otros.

Con base en los estudios de INGEOMINAS (Castrillón y Aravena, 2002), el antiguo DAMA e Hidrogeocol (2000) y la revisión de dichos estudios por parte de la Universidad Nacional de Colombia (2006), se estableció un modelo conceptual del comportamiento hidráulico de los sistemas hidrogeológicos de la Sabana de Bogotá. En la Figura 42 se presenta el esquema de las formaciones de interés hidrogeológico en un estado estacionario inicial y sin explotación ni drenaje de alguna de ellas. En este esquema se muestra que algunos niveles acuíferos podrían tener cargas piezométricas superiores a la hidrostática, es decir que serían niveles saltantes, lo cual hace más de 30 años parece que en realidad se observaba durante la exploración de acuíferos superficiales (aunque no se encontró documentación escrita al respecto), sin embargo, las mediciones de los piezómetros que instaló Ingeominas (Ávila, 1998) y las actualizaciones de lecturas de este estudio, muestran que las presiones de agua hasta la profundidad del basamento siempre son inferiores y por lo tanto para los sitios estudiados hoy en día no se trata de acuíferos confinados o saltantes sino por el contrario son acuíferos que por su menor presión carga total podrían permitir el drenaje de los niveles superiores y generar así descensos en los niveles freáticos superficiales. Para profundidades mayores donde se tienen acuíferos de mayor porosidad, sí es posible que las presiones sean mayores y que exista conectividad hidráulica con las partes altas de la zona de recarga como se explica más adelante.

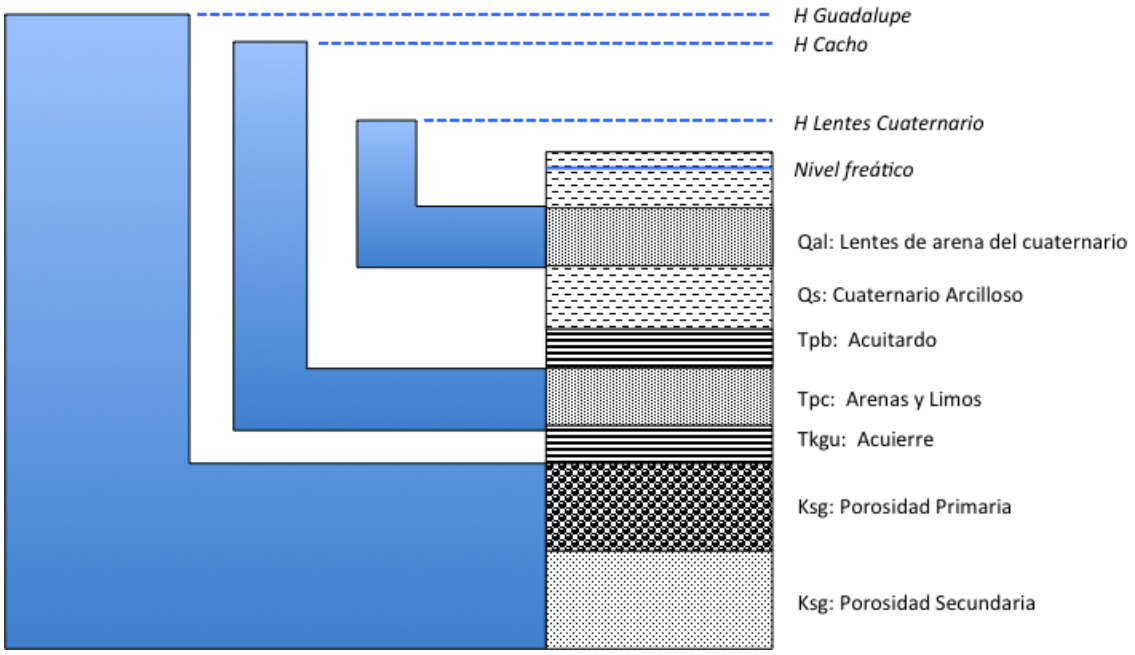


Figura 42. Esquema de unidades hidrogeológicas de interés en estado estacionario

A continuación se describen brevemente las unidades de interés hidrogeológico para la ciudad.

- **Formación Sabana** (Qsa): Depósitos arcillosos en su mayoría. Se comporta como una formación semipermeable y funciona como un acuitardo (este término indica que puede desplazarse el agua pero muy lentamente), con un nivel potenciométrico marcado por el nivel freático. Dentro de esta misma formación aparecen lentes arenosos (Qal) que son depósitos sedimentarios y se comportan como un acuífero semilibre en algunos casos, es decir, que están conectados hidráulicamente con el acuitardo superior pero su nivel potenciométrico es diferente al del acuitardo (ver Figura 43). Su conexión hidráulica se inicia en el momento en que la explotación para uso industrial (lavaderos de carro en su mayoría) abate el nivel potenciométrico marcado por la zona de recarga en los cerros ubicados en estribaciones de la Sabana, hasta alcanzar el mismo nivel freático de la Formación Qsa. En ese instante de conexión se producen descensos del nivel freático por flujos verticales hacia los lentes arenosos, e induciendo una recarga adicional a ellos (ver esquema de la Figura 44). En ese momento se propicia la consolidación por drenaje del acuitardo.

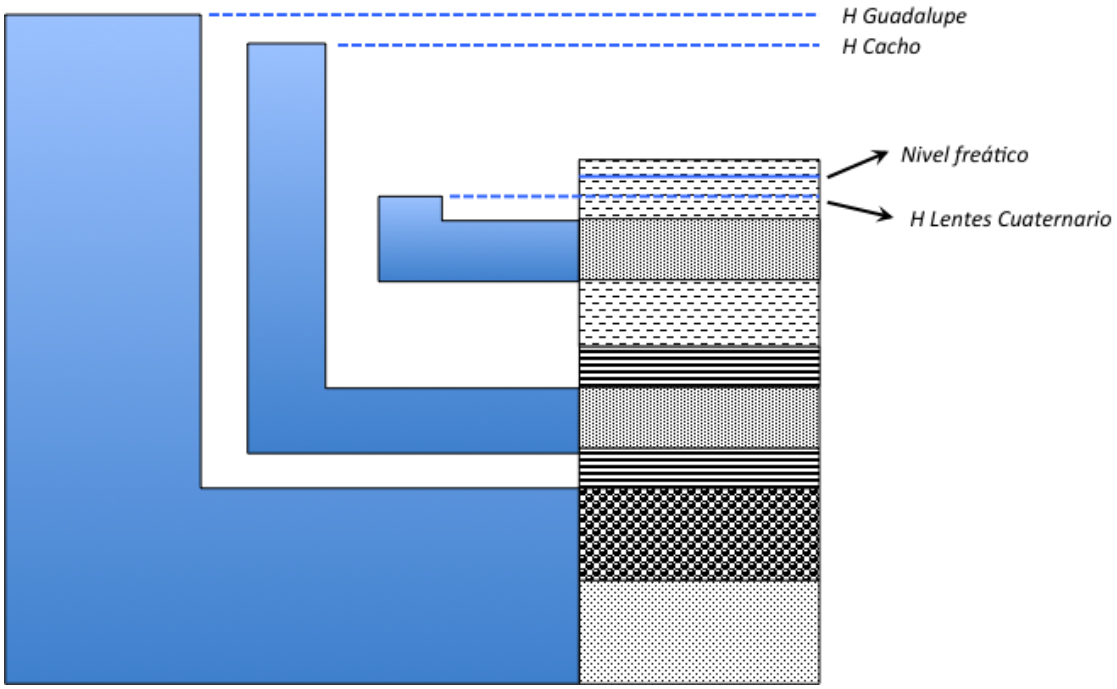


Figura 43. Esquema sobre el comportamiento hidráulico del acuífero semilibre estacionario.

Diferenciándose de la Formación Sabana, se distingue en profundidad una secuencia litología conformada por arcillas y arcillas limosas de consistencia media a dura con capas lenticulares esporádicas de turba y delgados cuerpos de arena intercalados. Esta litología se puede asociar a la **Formación Subachoque** (Qsu), identificada de dataciones palinológicas (Van der Hammen, 1973) a 143 m de profundidad en el sector de la Universidad Nacional y con un espesor variable.

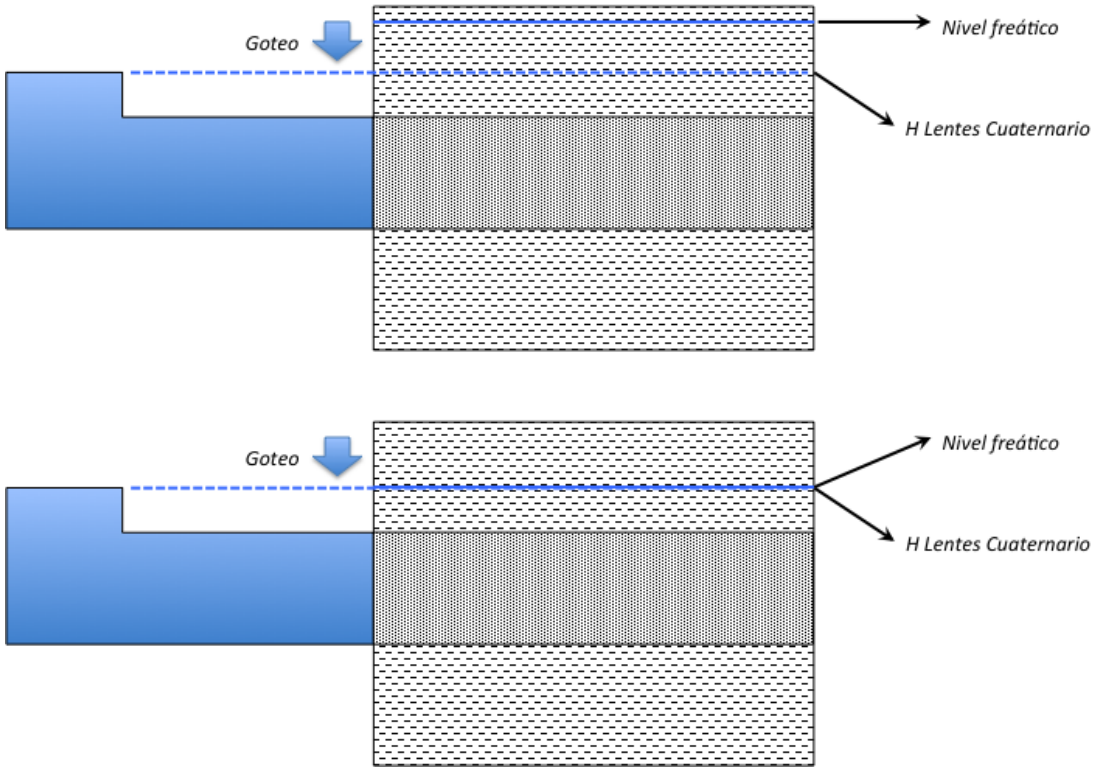


Figura 44. Esquema de comportamiento del goteo entre el acuitardo y el acuífero semilibre estacionario.

- **Formación Bogotá** (Tpb): Está conformada en general por rocas arcillosas blandas de baja permeabilidad y se comporta como un acuicierre (capa confinante que no deja fluir agua en ningún sentido). Su espesor total es del orden de 800 m aproximadamente, pero dado que está parcialmente erosionada donde quedó recubierta por el depósito cuaternario de la Formación Sabana, su espesor podría haberse reducido a casi unos 200 m.

- **Formación Cacho** (Tpc) Compuesta por areniscas primordialmente. Se comporta como un acuífero confinado, con su nivel potenciométrico en la zona de recarga y sin conexiones hidráulicas con otras unidades. Esta unidad no tiene registro de haber sido drenada parcialmente, pero sí ha reducido sustancialmente su potencial, y es la unidad de la que más se abastecen los pozos profundos en la Sabana. El hecho de que no tenga conexión hidráulica con las capas superiores retarda drásticamente los efectos de subsidencia de la capa superior, por lo tanto, con los análisis que se tienen hasta el momento para la modelación, no se considera este estrato como un nivel deformable por extracción de agua, aunque en un análisis posterior se hará la evaluación de su posible compresibilidad.

- **Formación Guaduas** (Tkgu): Compuesta primordialmente por materiales finos, lo que hace que se comporte como un acuicierre (capa confinante).

- **Grupo Guadalupe** (Ksg): Básicamente compuesta por areniscas. Este grupo posee dos unidades hidrogeológicas hidráulicamente conectadas. Una superior, compuesta por materiales porosos (Labor y Tierna) y otra por material fracturado que drena agua por porosidad secundaria (Plaeners y Arenisca Dura). Hidráulicamente el grupo se comporta como un acuífero confinado (cautivos, a presión o en carga), sin conexión hidráulica con otras formaciones. Al igual que el caso anterior, por ahora no se considera en el modelo numérico la compresibilidad de este nivel.

- **Formación Chipaque** (Ksch): Subyace al Grupo Guadalupe, conformada por material arcilloso (lutitas) y sin interés hidrogeológico.

7.2.2 Posibles zonas de recarga

Los estudios hidrogeológicos disponibles para los depósitos de la Sabana de Bogotá han considerado dos posibles zonas de recarga a evaluar, una interior y una exterior.

La zona de recarga interior se encuentra dentro de los límites de la cobertura de la cuenca artesiana, donde las aguas subterráneas en primer lugar se alimentan por la infiltración de las precipitaciones. Las condiciones más favorables para este tipo de alimentación se presentan en los bordes de la cuenca, donde afloran los depósitos más permeables.

Otra fuente de recarga que se puede considerar, es la infiltración desde las corrientes superficiales. El aporte del principal drenaje de la cuenca, el río Bogotá y el de sus tributarios se restringe a las partes cercanas al piedemonte por encima de 2600 m.s.n.m., ya que sus cauces son poco profundos (máximo de 5.0 m a 8.0 m) en la parte plana y generalmente se encuentran colgados y desconectados hidráulicamente de los principales horizontes acuíferos de la cuenca artesiana.

En el área estudiada de la Sabana de Bogotá existen varios embalses que podrían aportar agua al sistema subterráneo como zonas de recarga, sin embargo, este aporte debe ser mínimo, debido a que estos cuerpos de agua se encuentran sobre sedimentos de poca permeabilidad.

Las cadenas montañosas donde afloran las rocas del Complejo acuífero Guadalupe, se consideran como la posible zona de recarga exterior con una extensión total aproximada de hasta 1.000 km^2. En esta zona la recarga ocurre por la infiltración directa de las precipitaciones, corrientes superficiales y probablemente por la condensación del vapor de agua contenido en los poros y fisuras de las diferentes rocas.

7.2.3 Perfil hidrogeológico general

De acuerdo con los análisis efectuados se han planteado un primer modelo o perfil como acercamiento a la condición hidrogeológica de la ciudad de Bogotá, el cual se presenta en la siguiente Figura.

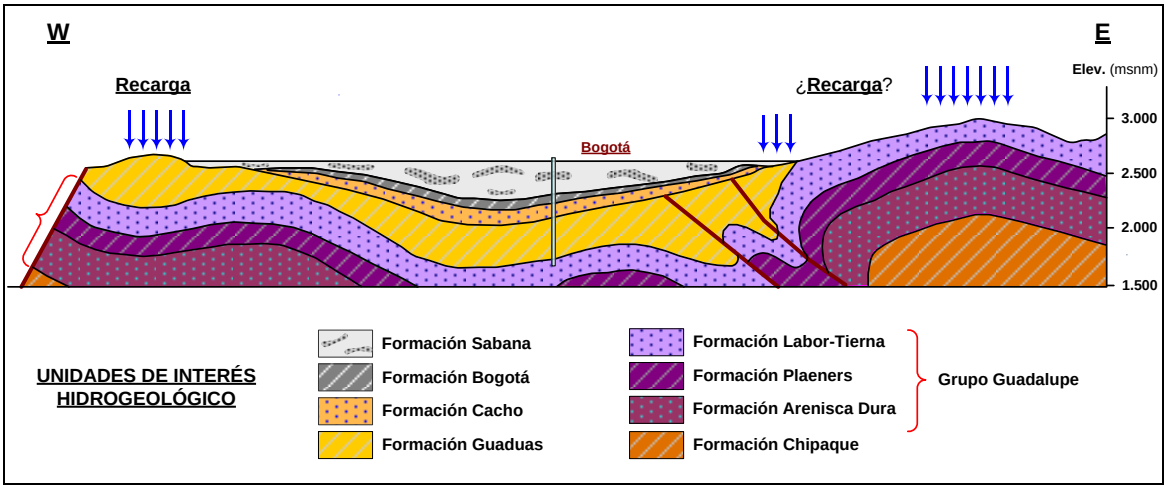


Figura 45. Perfil hidrogeológico inicial definido para análisis de la subsidencia.

En este perfil evaluado preliminarmente, las zonas de explotación de agua se pueden asociar a la Formación Sabana superficial y a sus lentes de arena, a la Formación Cacho (arenas y gravas, para perforaciones con longitud superior a 400 m) o a las Formaciones permeables del Grupo Guadalupe (areniscas).

7.2.4 Consideraciones para el modelo hidrogeológico de subsidencia

Una de las posibles causas del fenómeno de subsidencia del terreno es la reducción de los volúmenes de agua subterránea, bien sea por procesos naturales o por procesos antrópicos.

Cuando se hacen extracciones de grandes volúmenes de agua y los acuíferos no logran compensar en forma relativamente rápida tales extracciones, dependiendo de las condiciones de continuidad y conductividad hidráulica, se pueden presentar flujos descendentes o reducciones en las cargas piezométricas en profundidad, lo cual en el mediano y largo plazo tiende a generar descensos en los niveles freáticos y fundamentalmente compresión de los suelos por aumento en los esfuerzos efectivos, es decir, se presenta un proceso de consolidación.

Resulta de la mayor importancia para el análisis de la posible subsidencia por extracción de agua del subsuelo, conocer las particularidades del sistema hidrogeológico que se está evaluando y en especial, identificar las condiciones de contorno, las fuentes de recarga y descarga, las características y valores de las explotaciones de agua subterráneas que se adelantan, etc.

Como se indicó anteriormente, para el caso de la ciudad de Bogotá existen diferentes modelos hidrogeológicos que se han adelantado desde hace varios años y a pesar de que hay consenso sobre ciertos aspectos (como las características litológicas generales en superficie) aún se presentan importantes discrepancias entre unos y otros, relacionadas

con temas como el balance hídrico, las zonas de recarga y descarga, la continuidad de los niveles acuíferos, la porosidad, etc.

En este estudio se está analizando la subsidencia en el área urbana de Bogotá y especialmente en la que se define en la Microzonificación Sísmica de Bogotá (MZSB) como zona de suelos blandos, pues es allí donde se han detectado las mayores deformaciones según los trabajos previos (ICC 2009, IGAC 2008). La cuenca es cerrada y en estos sectores el depósito predominante de arcillas es grueso y los niveles acuíferos corresponden a lentes de arena localizados a diferentes profundidades, donde se destaca que anteriormente existían numerosos aljibes de menos de 20 m de profundidad, los cuales en su mayor parte hoy están secos. A profundidades mayores actualmente se hace una mínima extracción pues los volúmenes son relativamente bajos y en algunos casos ya se han secado totalmente, puesto que no cuentan con zonas de recarga. No obstante existen todavía niveles acuíferos que no se han agotado o que cuentan con zonas de recarga puesto que al 31 de diciembre del 2009 un total de 89 de los 104 pozos concesionados en Bogotá captaban agua del Cuaternario, equivalente al 85%, sólo 5 del Cretácico, correspondiente al 5% y 7 de ambas unidades hidrogeológicas, es decir el 7%.

En las zonas próximas a los Cerros Orientales de la ciudad y en general a las laderas, en donde la topografía es de baja pendiente, existen abundantes depósitos acuíferos (formados por deltas de ríos y quebradas) que además de ser menos compresibles que las arcillas, posiblemente cuentan con recargas y por tal razón allí se presentan menores deformaciones superficiales.

Las zonas de extracción de grandes volúmenes de agua, que se utilizan en los sectores industriales de la ciudad, corresponden a niveles acuíferos más profundos asociados a la Formación Cacho, los cuales se encuentran a profundidades máximas de unos 400 m en la parte central. Estos niveles subyacen a las arcillas de la Formación Bogotá (roca blanda que podría tener un espesor superior a los 200 m y con una deformación muy pequeña), que como se indicó previamente es un acuicierre, es decir, una capa confinante que no deja fluir agua en ningún sentido. También pueden existir extracciones de niveles aún más profundos a la Formación Guaduas. En estos dos últimos casos los efectos de la extracción de agua sobre los procesos de subsidencia pueden considerarse menores, puesto que son muy profundos, presentan una alta rigidez, tienen poca continuidad con los niveles superiores compresibles y cuentan con abundantes zonas de recarga, lo cual minimiza su posible impacto negativo.

8 PERFILES GEOLÓGICOS DE ANÁLISIS Y MODELO 3D

Con el propósito de identificar las litologías arenosas que pueden facilitar la circulación y el almacenamiento del agua subterránea dentro del depósito de suelos superficiales de la Sabana de Bogotá, y específicamente para la zona de estudio, se procedió a definir varios perfiles geológicos transversales y longitudinales a la ciudad de Bogotá para con ello lograr una mejor visualización de las características hidrogeológicas del terreno y facilitar así el ajuste del modelo conceptual de subsidencia. A continuación se describen los principales aspectos considerados para estos perfiles de análisis.

8.1 LOCALIZACIÓN DE LOS PERFILES GEOTÉCNICOS

A partir de la información estratigráfica general contenida en la base de datos geotécnica actualizada (FOPAE-UNAL 2011), el modelo hidrogeológico disponible para la Sabana de Bogotá (INGEOMINAS, 2000) y en ocho secciones geológicas de la ciudad (Hernández & Uscategui, 1976) consultadas y ajustadas, se procedió a la definición de varios perfiles transversales y longitudinales para la evaluación y refinamiento de las litologías existentes en el depósito de suelo superficial o relleno de la Sabana de Bogotá.

En la Figura 46 (ver Mapa 2, Vol. 2 de este informe) se aprecian detalles de la localización aproximada de los perfiles de análisis definidos, en donde se relacionan las exploraciones realizadas para el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá (MZSB, 1997).

8.2 SECCIONES DEFINIDAS DE ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO

En la Tabla 13 se resumen los perfiles elaborados para evaluación hidrogeológica de las secuencias litologías que facilitan la circulación y almacenamiento del agua subterránea. En el Anexo # 6 y en los Planos 1 al 4 de este informe (Vol. 2), se presentan los perfiles geológicos correspondientes a estas secciones.

Tabla 13. Relación de los perfiles definidos para análisis hidrogeológico.

Perfil	Tipo	Orientación	Lineamiento aproximado
L 1-1'	Longitudinal	Norte-Sur	Autopista Norte – Av. Caracas
L 2-2'	Longitudinal	Norte-Sur	Tramo Av. Suba – Olaya
T 1-1'	Transversal	Oeste-Este	Calle 170
T 2-2'	Transversal	Oeste-Este	Calle 127
T 3-3'	Transversal	Oeste-Este	Tramo Aeropuerto – Héroes
T 4-4'	Transversal	Oeste-Este	Tramo Bosa – Calle 45
T 5-5'	Transversal	N-W S-E	Calle 26 (Av. El Dorado)
T 6-6'	Transversal	Oeste-Este	Tramo Timiza – Olaya

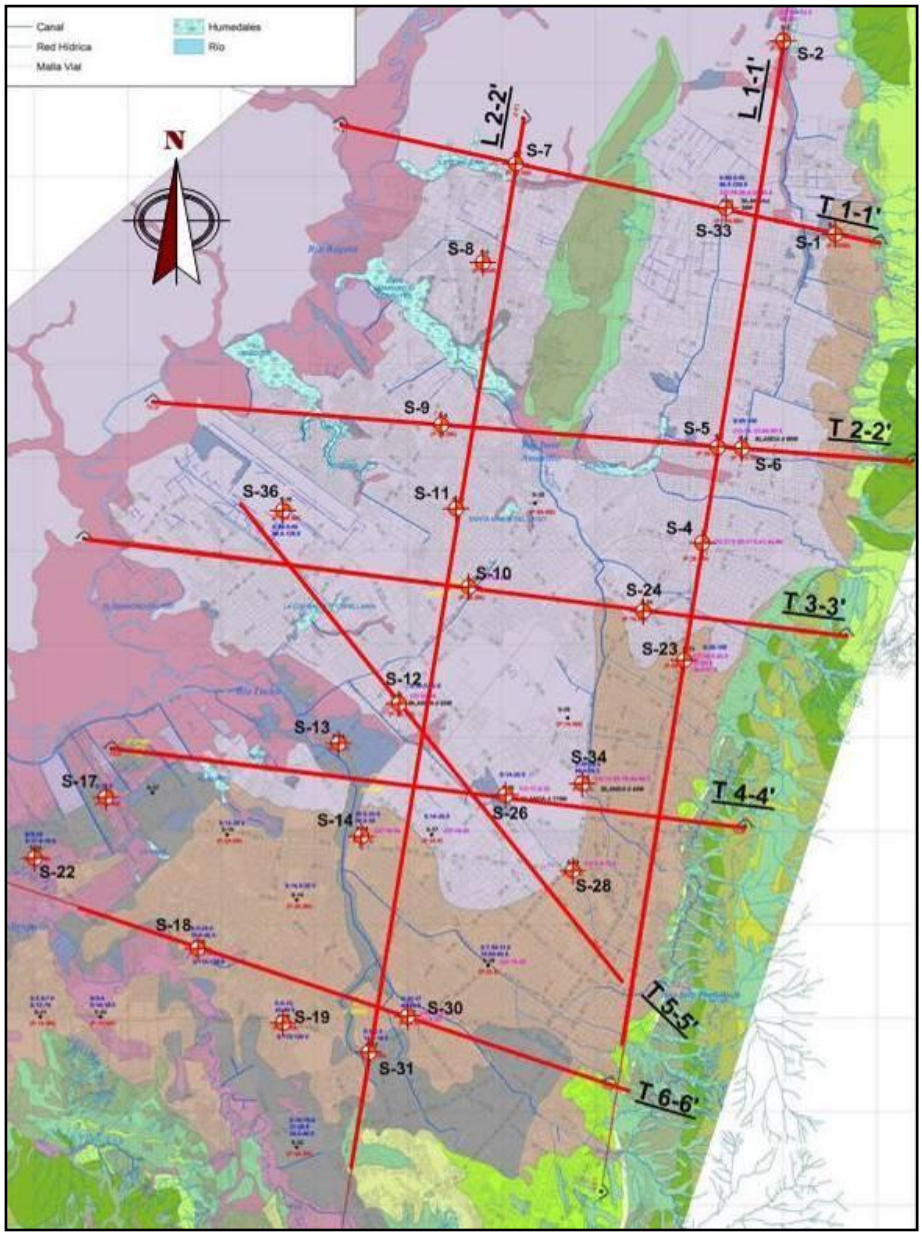


Figura 46. Localización aproximada de los perfiles de análisis hidrogeológico.

En las siguientes figuras se aprecian algunos de los perfiles geológicos definidos para el análisis de las secuencias litológicas transversales a la ciudad de Bogotá en el área de estudio, específicamente en los tramos de la Calle 127 (perfil T 2-2'), en proximidad a la Avenida El Dorado o Calle 26 (T 5-5') y más hacia el sur en un tramo aproximado entre el parque Timiza y el Olaya (perfil T 6-6').

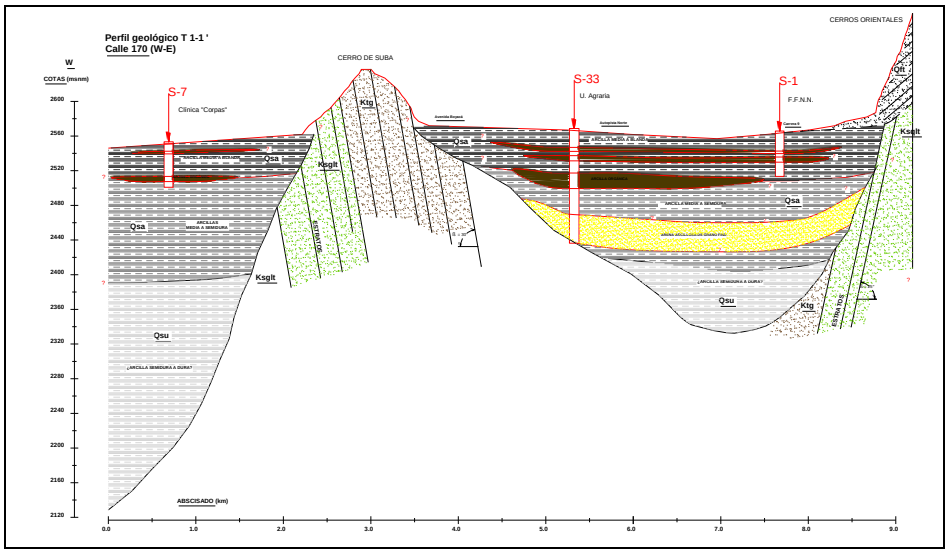


Figura 47. Perfil geológico Transversal T 1-1' – Análisis de litologías Calle 170 (Norte).

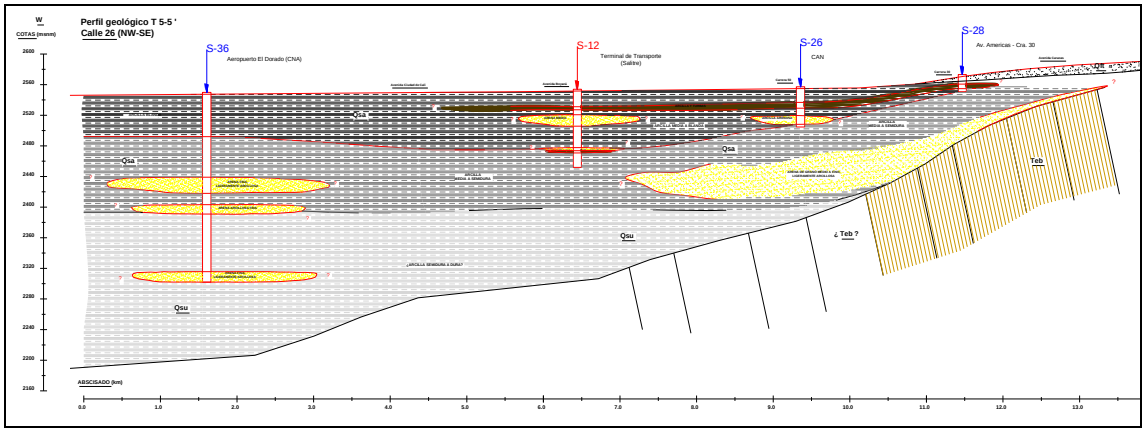


Figura 48. Perfil geológico transversal T 5-5' – Análisis de litologías Av. El Dorado (Calle 26).

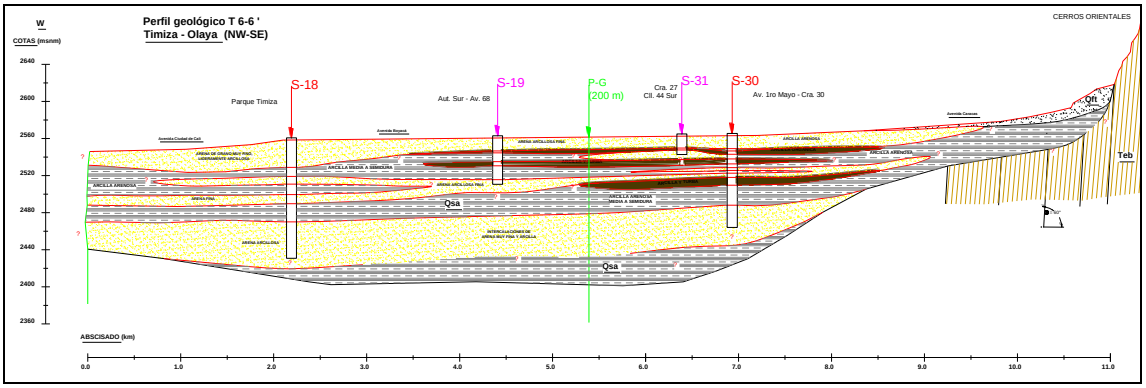


Figura 49. Perfil geológico transversal T 6-6' – Análisis de litologías sector Timiza-Olaya (Sur).

8.3 MODELO 3D DEL TERRENO Y DEL CONTACTO DEPÓSITO-ROCA

A partir de la integración de la información correspondiente a las coberturas geográficas SIG de la topografía del terreno (curvas de nivel) e iso-espesores del depósito cuaternario (profundidad del contacto del depósito de suelo y la roca, o paleorelieve), se logró definir mediante un software de diseño asistido por computador CAD el modelo tridimensional (3D) de la zona de estudio con los limites superficial y de base.

En las siguientes figuras se aprecian características del modelo 3D del área de estudio, con superficies traslúcidas para la topografía del terreno y con la ubicación esquemática de los sondeos geotécnicos de MZSB. En el Plano 5 (Vol. 2 del informe) se presentan las ilustraciones del modelo 3D del terreno y de las secciones geológicas de análisis.

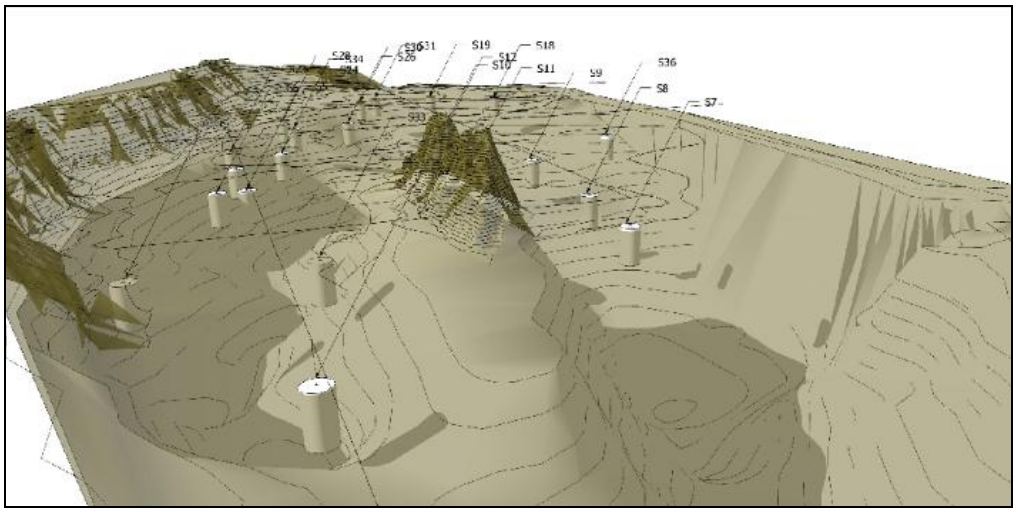


Figura 50. Vista 3D del paleorelieve y topografía superficial hacia el sur de ciudad.

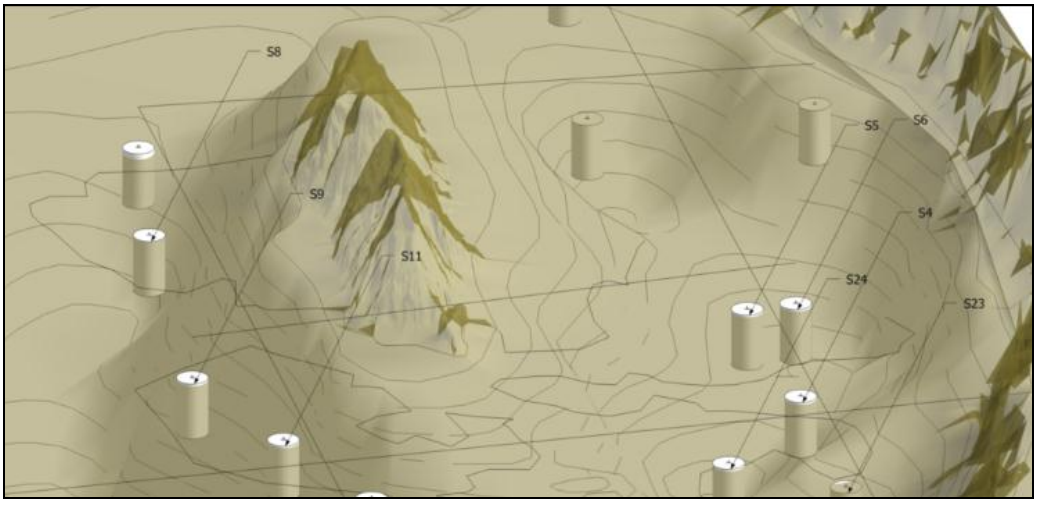


Figura 51. Vista 3D hacia el norte de la ciudad de las superficies del terreno y la roca.

8.4 ANÁLISIS DE LA SECUENCIA LITOLÓGICA DEL RELLENO LACUSTRE

8.4.1 Formaciones y secuencia estratigráfica

El potente relleno de edad cuaternaria que conforma la Sabana de Bogotá en del área de estudio, tiene espesor variable por la forma del paleorelieve de la depresión topográfica que está controlada por dos pliegues sinclinales con dirección de la superficie axial noreste-suroeste, separados por un anticlinal fallado y los procesos de erosión que afectaron a las rocas antes de que quedaran recubiertas por el relleno cuaternario. El espesor del relleno varía desde unos pocos metros hasta un máximo de 320 m en el sector del Aeropuerto El Dorado. Este relleno recubrió las rocas sedimentarias de edad Terciaría y Cretácica; sobre el borde oriental recubre de manera preferencial secuencias de la Formación Bogotá conformada por arcillolitas con algunas capas intercaladas de areniscas, mientras que en el costado noroeste, Cerro de Suba, recubre secuencias de areniscas y arcillolitas pertenecientes a las formaciones Guaduas y Arenisca Labor y Tierna.

Las formaciones geológicas de edad cuaternaria que conforman el relleno, objeto de este estudio, según Van der Hammen (1973) y Van der Hammen y Helmens (1995), de la más antigua a más reciente, son las formaciones Subachoque (Qsu) y Sabana (Qsa).

8.4.2 Información base para elaborar los perfiles del Relleno Cuaternario

De la revisión de la información contenida en la base de datos geotécnica, se presentan a continuación los resultados de la evaluación de los registros litológicos de los sondeos o perforaciones realizadas en el depósito de suelo superficial o relleno de la Sabana de Bogotá, con profundidad mayor o igual a 100 m, análisis orientado fundamentalmente a la identificación en extensión y profundidad de materiales gruesos (cuerpos de arenas) y de suelos finos de tendencia orgánica (capas de arcillas orgánicas y turbas), sin ignorar la existencia de suelos sin contenido orgánico.

Se resalta que las litologías arenosas y de arcilla orgánica y turba presentes dentro del relleno de la Sabana de Bogotá y sus características hidrogeológicas es uno de los elementos que puede ser de gran importancia dentro de la modelación geotécnica del proceso de subsidencia. El detalle de las litologías de las formaciones Subachoque y Sabana se ha obtenido de las diferentes perforaciones que para fines hidrogeológicos y de microzonificación sísmica de la Sabana se pudieron consultar. En total se tuvo acceso al registro de 37 perforaciones de adecuada calidad y detalle y diferentes profundidades, efectuadas para el estudio de Microzonificación sísmica de Bogotá MZSB (1997), distribuidas apropiadamente en toda la ciudad.

Para determinar la extensión y espesores de las litologías y determinar continuidad lateral se elaboraron seis perfiles geológicos transversales con tendencia en su orientación noreste-suroeste (T 1-1' a T 6-6') y dos perfiles geológicos longitudinales (L 1-1' y L 2-2').

En la Tabla 14 se presenta un resumen de la información empleada para el análisis de las secuencias estratigráficas, en donde se han identificado cuerpos de arcilla orgánica.

Tabla 14. Resumen de perforaciones profundas con cuerpos de arcilla orgánica.

Sondeo (MZSB)	**Ubicación**	**Prof.** (m)	**N.F.** (m)	**Nivel de arcillas orgánicas** (m)
6	Calle 127Bis – Carrera 20	188.5	2.0	19.0 a 23.5
8	Av. Cundinamarca (ALO) – Cll. 139	245.0	3.5	Fuera de área de estudio
12	Terminal de Transporte	100.0	7.5	20.0 a 24.0
18	Parque Timiza	130.0	11.8	No reporta
23	Monumento a los Héroes	100.0	3.0	1) 19.5 a 24.5 2) 32.0 a 34.5 3) 49.5 a 57.0
26	Calle 26 – Carrera 50	49.5		17.5 a 25.0
30	Av. Primero de Mayo – Cra. 30	99.0	4.0	16.0 a 30.0
33	Cll. 170 – Cra 54 UNIAGRARIA	130.0	9.5	1) 19.0 a 23.5 2) 56.0 a 65.5
34	Cll. 53 – Cra. 30 INGEOMINAS	177.0	6.0	1) 18.5 a 29.0 2) 44.0 a 56.5
36	CNA – Aeropuerto El Dorado	250.0	5.0	No reporta

En cuanto a la presencia de cuerpos o capas de arena, se evidencia que estos materiales son más frecuentes del río San Francisco hacia el sur de manera creciente, en donde se identifican dos cuerpos arenosos. En el norte hay capas de arena a partir de los 65 m de profundidad en los sectores de Uniagraria (S-33), Calle 127 (S-6) y Los Héroes (S-23), en donde se identifica un cuerpo de arena importante según lo reportado en la Tabla 15. Contrario a lo hasta ahora planteado, estos cuerpos podrían no ser lenticulares, pero se requiere de la ejecución de algunas perforaciones exploratorias profundas para su confirmación.

8.4.3 Descripción de los perfiles geológicos del relleno Cuaternario

Como parte de este estudio se elaboraron ocho perfiles geológicos del relleno del antiguo lago de la Sabana de Bogotá; el grado de detalle corresponde al que poseen los registros de las perforaciones efectuadas para la Microzonificación sísmica de Bogotá. La base cartográfica usada fue obtenida de la cobertura geográfica suministrada de las curvas de nivel secundarias en la zona urbana de Bogotá (FOPAE, 2009). La topografía del paleo-relieve, es decir, de la frontera entre la roca y el relleno en profundidad, fue obtenida de la cobertura del espesor de sedimentos (FOPAE, 2009).

Los perfiles geológicos comprenden seis secciones transversales a la ciudad de Bogotá, de los cuales el T 1-1' corresponde a la Calle 170 y el T 6-6' al sector Timiza-Olaya, aproximadamente. De los dos perfiles de secciones longitudinales, el L 1-1' se localiza a lo largo del Autopista Norte-Avenida Caracas y el L 2-2' corresponde al sector Suba-Olaya, aproximadamente.

Tabla 15. Resumen de las perforaciones con cuerpos de arena identificados.

Sondeo (MZSB)	**Ubicación**	**Prof.** (m)	**N.F.** (m)	**Nivel de arenas** (m)	**Litología**
6	Cll 127Bis – Cra 20	188.5	2.0	85 a 100	Arenas y arenas limo arcillosa
8	Av. Cundinamarca (ALO) – Cll. 139	245	3.5	125 a 135.5	Arena muy fina, limosa a arcillosa
12	Terminal Transporte (Ciudad Salitre)	100	7.5	74 a 78	Arena fina a media, arcillosa
14	Av. Boyacá – Av. de las Américas	49.5	--	1) 20.5 a 25.5 2) 35.5 a 39.0	Arena fina a media
15	C.C. Plaza de las Américas	20.5	--	14.5 a 20.5	Arena fina a media
16	Plazoleta Banderas Av. Las Américas	20.5	--	13 a 20.5	Arena de grano fino a media
18	Parque Timiza	130	11.8	1) 00 a 30 2) 65 a 70	Arena de grano fino
23	Monumento a los Héroes	100	3.0	80 a 100	Arena fina a media, arcillosa
27	Cll. 53 – Cra. 13	20.5	--	14.0 a 20.5	Arenas
29	Cra. 30 – Av. 6a	20.5	--	1) 7.5 a 11.5 2) 15.5 a 20.5	Arenas
30	Av. Primero de Mayo – Cra. 30	99	4.0	65 a 99	Intercalaciones de arcilla y arena fina
33	Cll. 170 – Cra 54 UNIAGRARIA	130	9.5	97 a 130	Arena gris y arena arcillosa
34	Cll. 53 – Cra. 30 INGEOMINAS	177	6.0	67 a 153	Intercalación de arenas arcillosas y arcillas limosas
36	Centro Nacional de Aeronavegación CNA – Aeropuerto El Dorado	250	5.0	1) 111 a 125 2) 236 a 250	1) Arenas finas algo arcillosas 2) Arenas muy finas algo arcillosas

En estos perfiles geológicos, el relleno cuaternario está dividido, de la más antigua a la más reciente, en las formaciones Subachoque (Qsu) y Sabana (Qsa). El límite entre el techo de la Formación Subachoque y el piso de la Formación Sabana sea ha definido a una profundidad aproximada de 150 m con base en las evaluaciones palinológicas de Van der Hammen (1973).

A continuación se hace una descripción litológica de cada una de estas formaciones.

Formación Subachoque (Qsu)

La secuencia litológica de esta formación, en el área de estudio fue cortada por las perforaciones MZSB 6 (Calle 127 Bis – Carrera 20) y 34 (INGEOMINAS). De acuerdo con las dataciones palinológicas de Van der Hammen (1973), en el sector de la Universidad Nacional el techo de esta formación estaría a 143 m de profundidad y el espesor varía de un lugar a otro, como lo ilustran los perfiles geológicos transversales, de manera que en el sector del Perfil T 1-1', en el sinclinal del costado oriental al Cerro de Suba el espesor es del orden de 70 m, en tanto que en el sinclinal del occidente es mayor a 140 m y en el sector de los Perfiles T 2-2' y T 3-3', en este mismo sinclinal, el espesor es de 230 m y 280 m, puesto que esta depresión topográfica es mucho más profunda que la del costado oriental. Hacia el suroeste del área de estudio la depresión pierde profundidad y en el sector del Perfil T 4-4' el espesor varía entre los 30 m y 50 m y en el sector del Perfil T 6-6' no se identifica acumulación de sedimentos de esta formación. Los perfiles geológicos longitudinales L 1-1' y L 2-2' ilustran la variación de espesor que en sentido noreste-suroeste tiene esta formación y el trabajo de erosión que en su momento hizo la red de drenaje de los Cerros Orientales de Bogotá para generar las variaciones en la profundidad de la depresión y por ende en el espesor de esta formación.

La secuencia litología determinada en los perfiles geológicos está conformada por arcillas limosas y arcillas medias a duras y algunas esporádicas capas lenticulares de turba, además, existen delgados cuerpos de arena intercalados. En el sector del Aeropuerto El Dorado CNA (perforación 36), a los 146 m de profundidad se reporta un cuerpo de arena arcillosa de color marrón quemado con un espesor de 13 m.

En resumen, la litología de esta formación requiere de un mayor conocimiento, el cual se puede obtener por exploración mediante perforaciones con recuperación continua de muestras. De la información disponible se puede afirmar que esta formación, en el área de estudio, se caracteriza por materiales finos arcillosos y arcillo-limosos de consistencia ligeramente blanda a dura, con esporádicas capas lenticulares de arena y arcillas orgánicas y turba.

Los sedimentos de esta formación están recubriendo rocas sedimentarias pertenecientes a las formaciones Bogotá, Cacho, Guaduas y Guadalupe, en el borde oriental; Guaduas y Guadalupe en el costado oeste y noroeste (Cerro de Suba).

Formación Sabana (Qsa)

La secuencia que se describe a continuación corresponde a la sucesión litológica del intervalo entre la superficie y piso de la Formación Sabana que fluctúa entre los 143 m y 150 m de profundidad, donde se identifica el techo de la Formación Subachoque (Qsu). Una mejor ilustración de estas variaciones de espesor se puede apreciar en los perfiles geológicos L 1-1' y L 2-2'.

Las litologías reportadas en los perfiles geológicos muestran que del río Fucha hacia el noreste, perfiles T 5-5' a T 1-1 y L 1-1' y L 2-2', desde la superficie del terreno hasta 70 m de profundidad predominan arcillas limosas de consistencia blanda y blanda a media, con intercalación de tres horizontes de arcilla orgánica con turba, de espesor variable entre

4.0 m, 10.5 m y 14 m con buena continuidad lateral, excepto en el sector del Aeropuerto El Dorado. El techo del horizonte está entre los 16 m y 19 m de profundidad; el piso de esta arcilla orgánica varía entre 23 m y 30 m en el sector de la Av. Boyacá con Carrera 30 (MZSB 30). Este nivel de arcilla orgánica hacia el occidente es reportado hasta el sector del Terminal de Transporte (MZSB 12, Salitre); de allí hacia el occidente aparentemente no tiene continuidad y el relleno predominante es de arcillas limosas blandas. Existen otros niveles de arcilla orgánica a mayor profundidad pero podrían ser de extensión local. El detalle de la ubicación de estos niveles se muestra y en los perfiles transversales antes citados y en la Tabla 14.

En este mismo sector, es decir, del río Fucha hacia el noreste, los perfiles T 1-1' a T 5-5' muestran la presencia de cuerpos de arena de espesor importante a partir de los 80 m de profundidad. Se destaca un cuerpo de arena de grano fino a medio y ligeramente arcillosa que en el sector de INGEOMINAS (perforación 34 y perfil T 4-4') presenta un espesor cercano a 100 m y que, en el sector del perfil T 3-3' (Los Héroes-Aeropuerto), induce a pensar que podría existir una conexión o correlación entre este cuerpo arenoso y los dos reportados en el sector del Aeropuerto, por lo tanto, para la definición del modelo hidrogeológico del relleno de la Sabana de Bogotá y para el refinamiento el modelo de subsidencia de la ciudad, es importante precisar esta correlación, y para lo cual se recomienda la ejecución de cuatro (4) perforaciones profundas entre los 200 m y 350 m, que permitirían además la instalación de instrumentación geotécnica.

En el sector del rió Fucha hacia el sur, el perfil geológico T 6-6' muestra una mayor presencia de cuerpos de arena intercalados con arcillas y arcillas orgánicas con turba. Se identificaron cuatro cuerpos de arena con buena continuidad lateral y el contacto rocas-relleno cuaternario está a una profundidad menor a los 160 m.

Con el nivel de información que existe, se puede concluir que existen varios niveles de arcilla orgánica con lentes de turba; el de mayor continuidad lateral se encuentra desde los 16 m de profundidad hacia abajo.

Igualmente se identifican varios cuerpos de arena cuya geometría podría ser extensa y no lenticular, lo cual se debe corroborar. Las del sector del río Fucha hacia el noreste están inferiores a los 65 m de profundidad, en tanto que hacia el sur y suroeste del río Fucha se encuentran a diferentes profundidades desde los 7.50 m de profundidad. Se recomienda la exploración mediante perforaciones profundas, con recuperación continua de muestras y el registro geofísico en cada pozo.

Una buena porción del agua subterránea que se extrae en el área de estudio proviene de los cuerpos de arena que hacen parte de la Formación Sabana; estas capas de arena, de la Calle 68 hacia el noreste de la ciudad, están a profundidad mayor a los 65 m; de la Calle 53 hacia el sur hay varios cuerpos de arena de extensión restringida a partir de los 7.0 m de profundidad con espesores variables, como se ilustra en la Tabla 15.

9 MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA SUBSIDENCIA

9.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS GEOMECÁNICOS

Una vez seleccionadas la metodología y herramientas de análisis a partir de los alcances definidos para la modelación geotécnica de subsidencia, se determinaron las variables a evaluar y los parámetros geomecánicos del suelo de especial interés a considerar en los modelos geotécnicos o perfiles de evaluación del terreno. Estos parámetros corresponden a las propiedades que identifican el comportamiento geomecánico de los estratos de suelo, como lo son: densidad, resistencia, rigidez (compresibilidad) y permeabilidad.

9.1.1 Parámetros geotécnicos definidos para análisis

La determinación de los parámetros del suelo para cada uno de los sitios de modelación se realizó a partir de la información recopilada de diferentes entidades e integrada en la base de datos geotécnica (BDG), suministrada en un formato magnético (archivo Excel) por el FOPAE en una versión inicial al 2007 y la cual se actualizó como parte del alcance de este estudio (BDG, FOPAE-UNAL 2011).

A partir de la integración y evaluación de la información de la BDG se han definido los parámetros para el análisis y la modelación numérica según las variables de entrada y de acuerdo con los factores o hipótesis a considerar y el software a emplear. En la Tabla 16 se relacionan los parámetros considerados preliminarmente para los modelos, la correspondiente propiedad y símbolo usual.

Tabla 16. Relación de parámetros geomecánicos determinados para modelación.

Propiedad geomecánica	Parámetro geotécnico	Símbolo
DENSIDAD	Peso unitario total (húmedo)	PUH
	Peso unitario seco	PUS
RESISTENCIA	Ángulo de fricción efectivo	ϕ'
	Cohesión efectiva (drenada)	C'
RIGIDEZ Y DEFORMABILIDAD	Modulo de elasticidad	E_S
	Relación de vacíos inicial	e_o
	Coeficiente de compresibilidad	C_c
PERMEABILIDAD	Permeabilidad horizontal	k_x
	Permeabilidad vertical	k_y

Es de resaltar de acuerdo con los análisis hidráulicos efectuados, hay incertidumbre respecto a los valores de permeabilidad horizontal, puesto que las magnitudes de la permeabilidad in-situ pueden diferir de manera importante con lo que se determina en laboratorio a partir de los ensayos de consolidación. Por esta razón se trató de adelantar

una prueba de bombeo en dos pozos localizados en predios de la Universidad Nacional y de Ingeominas para estimar de mejor forma tales parámetros pero no fue posible obtener los permisos por parte de la Secretaría Distrital de Ambiente.

9.1.2 BDG e información a integrar

Como se mencionó anteriormente, en la actualización de la base de datos se concentró un esfuerzo importante en lograr la recopilación de información de estudios geotécnicos detallados (sondeos geotécnicos, ensayos de laboratorio, geofísica, etc.) realizados en los últimos años o que no fueron considerados o incluidos en la DBG inicial. La información geotécnica recopilada correspondió en términos generales a datos de perforaciones mecánicas y resultados ensayos de laboratorio de mecánica de suelos correspondientes a clasificación, resistencia estática al corte no-drenada (compresión inconfinada) y compresibilidad (relación de vacíos), pero no se logró recopilar mayor información en cuanto a resultados de ensayos dinámicos, resistencia al corte efectiva por fricción y cohesión, ni permeabilidad.

9.1.3 Parámetros considerados en los análisis numéricos

Para la modelación numérica inicial del sondeo de MZSB en el Aeropuerto El Dorado – CNA, adicionalmente a los parámetros básicos reportados e integrados en la BDG, se aproximaron los restantes indicados en la Tabla 16 que no se incluyen en el sondeo, y se procedió a agrupar y simplificar el perfil en algunos estratos con el fin de ajustar los modelos de manera más rápida. A manera de ejemplo, en la Tabla 17 se reportan los parámetros geotécnicos definidos para el modelo de análisis en el sector del Aeropuerto.

Tabla 17. Parámetros para modelación geotécnica en el Aeropuerto El Dorado (CNA).

Capas	Estrato	PUH (kN/m^3)	PUS (kN/m^3)	ϕ' (º)	C' (kPa)	Es (kPa)	k (m/día)
1	1	15	14	--	21	4,528	3.83E-09
2 – 3	2	13	12	--	22	9,707	8.50E-06
4 – 6	3	13	12	--	19	11,666	2.73E-06
7 – 10	4	14	13	--	23	31,901	7.51E-07
11 – 13	5	14	13	--	30	53,291	7.43E-07
14 – 16	6	17	16	--	38	86,040	1.65E-07
17 – 18	7	16	15	28	50	100,000	1.00E-04
19	8	17	16	--	107	229,777	2.04E-07
20	9	20	19	28	32	317,828	1.00E-04
21 – 25	10	20	19	--	40	403,364	6.23E-08
26 – 29	11	17	16	--	85	580,626	1.28E-07

En el Anexo #·7, al final del documento, se presentan los parámetros a partir de los cuales se obtuvieron estos valores.

A partir de las aproximaciones al modelo hidrogeológico, las litologías existentes y las hipótesis planteadas al efecto de la subsidencia en la ciudad de Bogotá, se realizaron las evaluaciones numéricas 1D y 2D de los asentamientos considerando reducciones de la presión de poros (nivel freático o piezométrico) respecto de la presión hidrostática teórica para un nivel freático inicial y la conectividad hidráulica de los acuíferos con base en los perfiles estratigráficos de las exploraciones efectuadas para la Microzonificación Sísmica (1996-1997). A continuación se presentan la metodología desarrollada y los resultados obtenidos de la modelación numérica mediante elementos finitos (PLAXIS).

9.2 MODELACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Para determinar la incidencia de las variaciones en las condiciones de presión de poros y esfuerzo efectivo de los estratos de cada perfil, se procedió al cálculo de asentamientos por consolidación mediante el programa PLAXIS®, el cual permite obtener las deformaciones verticales del terreno debidas a la variación de esfuerzos por cambios del nivel freático o de las de presión al interior de la masa de suelo.

El software trabaja mediante el método de elementos finitos (MEF), a partir del cual se realizan las aproximaciones numéricas para la solución de los problemas de deformación para cada uno de los casos evaluados.

9.2.1 Sitios de modelación geotécnica 1D y 2D

Con el propósito de realizar la modelación numérica del proceso de subsidencia y predecir su evolución a tiempo de 5, 10, 20 y 50 años, se definieron diez (10) sitios con información geotécnica apropiada para los análisis numéricos unidimensionales (1D) y un sección de interés para la modelación bidimensional (2D) de la subsidencia. En la siguiente Tabla se relacionan los sitios considerados para el análisis 1D coincidentes con los sondeos realizados para la Microzonificación Sísmica de Bogotá (MZSB).

Tabla 18. Sitios seleccionados para la modelación numérica 1D de la subsidencia.

Sitio	Sondeo MZSB	Ubicación	N.F. (m)	Prof. (m)
1	**03**	Club de Suboficiales de las Fuerzas Militares	5.0	50.0
2	**06**	Calle 127Bis con Carrera 20	2.0	188.5
3	**08**	Av. Cundinamarca – Cll. 139 (Suba Tibabuyes)	3.5	245.0
4	**09**	Barrio "Bochica" Norte (Av. Cundinamarca)	3.0	50.0
5	**10**	Barrio "El Luján"	3.0	50.0
6	**12**	Terminal de Transportes (Sector Salitre)	7.5	100.0
7	**23**	Monumento a los Héroes	3.0	100.0
8	**33**	Universidad Agraria (Calle 170 – Carrera 54)	4.0	130.0
9	**34**	INGEOMINAS (Calle 53 con Carrera 30)	6.0	177.0
10	**36**	Aeropuerto El Dorado – CNA	5.0	250.0

Para la modelación 2D se definió un tramo de aproximadamente 1.50 km de longitud correspondiente al costado oriental del Perfil geológico transversal **T 2-2'** (**Calle 127**, en sentido W-E), intermedio entre la Carrera 55 –equidistante entre la Avenida Suba y la Autopista Norte– y la Carrera 15 –sector Unicentro–. La estratigrafía y los parámetros geotécnicos de análisis considerados para este modelo fueron los correspondientes al sondeo MZSB-06 (Calle 127Bis con Carrera 20, en proximidad con la Autopista Norte), teniendo en cuenta especialmente la variación del espesor del perfil de suelo acorde con la profundidad del contacto depósito-roca.

En la siguiente figura se aprecia la ubicación aproximada de los sitios de modelación geotécnica 1D y el tramo de análisis 2D.

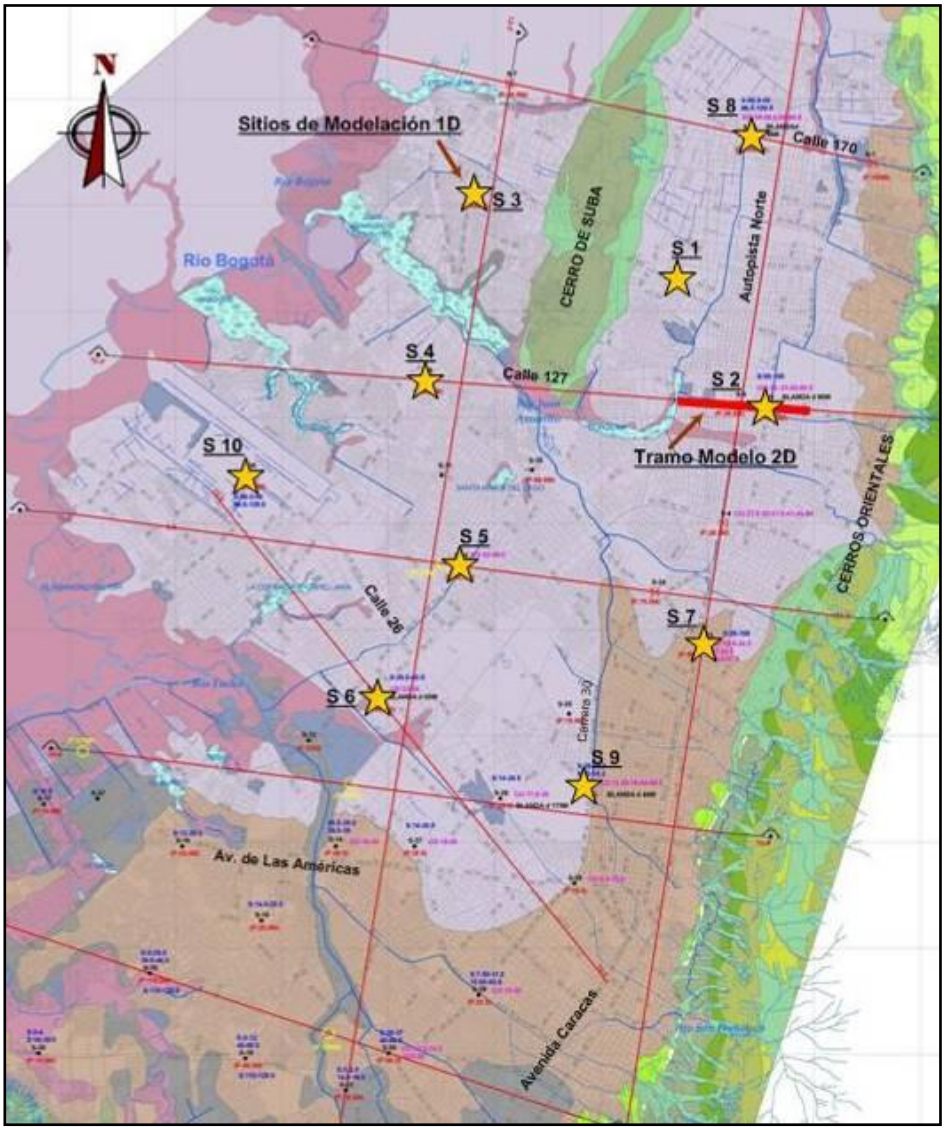


Figura 52. Esquema de localización de los sitios de modelación geotécnica (1D y 2D).

9.2.2 Hipótesis y consideraciones de análisis

Para realizar la modelación se hicieron previamente muchas discusiones respecto a las posibilidades de análisis. Una primera aproximación podría ser considerar la discrepancia en los niveles piezométricos actuales, medidos con la instrumentación y los niveles hidrostáticos considerando continuidad hidráulica a partir de la posición conocida del nivel freático. Este tipo de análisis tiene el inconveniente de que no se conoce el tiempo transcurrido entre una posición piezométrica inicial y la posición actual, con lo cual se puede especular mucho respecto a los tiempos reales de descensos piezométricos, sin embargo, teniendo en cuenta que se tienen registros medidos durante aproximadamente 15 años, esta información sirve de base para la modelación, pero es necesario previamente estimar cómo se reflejan los cambios piezométricos en profundidad en la variación de los niveles freáticos superficiales para tener así una aproximación de análisis que involucre el tiempo.

En una tesis de maestría en geotecnia de la Universidad Nacional desarrollada por Garzón (2011) se presenta un procedimiento para efectuar este tipo de análisis a partir de la cantidad de agua que fluye a través de un sistema de suelos en serie (columna de suelo estratificado), se establece allí una ecuación no lineal en la cual, el abatimiento del nivel freático está en función de la permeabilidad equivalente de la columna de suelo, la condición de frontera (posición del nivel piezométrico que controla el nivel freático al interior de la columna de suelo), de la relación de vacíos del suelo en la que se produce el abatimiento y del tiempo. Esta ecuación se resuelve por medio de una instrucción (Macro) implementada en una hoja electrónica (Excel) para determinar, en cada incremento de tiempo, la nueva posición del nivel freático abatido, las propiedades (permeabilidad y compresibilidad) de cada uno de los elementos de suelo y el acortamiento en la longitud de la columna de suelo, por efecto del incremento en los esfuerzos efectivos y de los esfuerzos de infiltración que ejerce el flujo descendente de agua.

Los análisis iniciales efectuados permitieron estimar tasas de descenso que varían entre pocos milímetros hasta 0.10 m/año, dependiendo de la profundidad considerada de los estratos compresibles y de los estratos drenantes. Los registros de variación de niveles freáticos no son muy extensos pero de acuerdo con la información analizada puede considerarse que una tasa de descenso del nivel freático de 0.10 m/año representa una condición razonable para un periodo de observación de 15 a 20 años. Tomando este valor como hipótesis de la modelación y suponiendo la conectividad hidráulica de todos los estratos del perfil, se obtienen descensos del NF de 0.50 m, 1.0 m, 2.0 m y 5.0 m para los periodos de análisis de 5, 10, 20 y 50 años, respectivamente. Esta hipótesis es además compatible por lo reportado por Rodríguez (2009).

A continuación se relacionan los aspectos que se tuvieron en cuenta para la definición del modelo de análisis numérico de los sitios evaluados.

- Modelo de elementos finitos: Axisimétrico (1D), deformación plana
- Elementos triangulares de la malla: 15 Nodos
- Modelo esfuerzo-deformación del material: Soft Soil

- Modelo de comportamiento del suelo: No-drenado y Drenado
- Fronteras de la geometría: Estándar (lateral y base)
- Generación de presiones de agua por: Nivel freático general
- Fronteras para las condiciones de agua: Consolidación cerrada (lateral)
- Tipos de cálculos en fases de análisis: Plástico y Consolidación

Para el procedimiento del cálculo numérico de la consolidación en los análisis 1D y 2D se establecieron las siguientes etapas en PLAXIS:

- ✓ Fase inicial: Lectura de datos de entrada, en la cual el modelo toma los valores de presión (N.F.) ingresados y los valores de esfuerzos.
- ✓ Etapa 1: Etapa de deformación inicial por peso propio del elemento, en la cual se acoplan los esfuerzos y las presiones ingresados.
- ✓ Etapa 2: En esta etapa se reinicia el modelo para que en las etapas posteriores no se tomen en cuenta los desplazamientos generados en la Etapa 1.
- ✓ Etapa 3: Primera fase de la consolidación asociada a los periodos de análisis de 5, 10, 20 y 50 años, con una variación súbita o rápida del nivel freático N.F. desde la condición inicial reportada en cada sitio hasta un descenso de 0.50 m, 1.0 m, 2.0 m y 5.0 m, con el fin de calcular los asentamientos asociados a dicha variación.
- ✓ Etapa 4: Segunda fase de la consolidación hasta alcanzar un mínimo exceso de presión de poros (entre 0.10 kPa y 1.0 kPa), partiendo del descenso del nivel freático (DNF) súbito definido en la etapa anterior para cada período de análisis.

Al final del cálculo se obtienen los resultados del asentamiento vertical en superficie para cada condición de análisis.

9.2.3 Perfiles estratigráficos y parámetros de análisis

Los perfiles estratigráficos simplificados de cada sitio de análisis de definieron conforme a la información correspondiente al estudio MZSB y contenida en la BDG, FOPAE-UNAL 2011. La estratigrafía fue refinada teniendo en cuenta las características de los suelos y la tendencia predominante según el tipo de material, propiedades índices, parámetros de compresibilidad, resistencia cortante drenada y no-drenada. Los parámetros de análisis se definieron a partir de los datos básicos reportados e integrados en la BDG y mediante correlaciones.

Los parámetros de análisis para la modelación geotécnica considerados para cada uno de los perfiles evaluados fueron:

- ✓ **PUH**: Peso unitario húmedo (tomado directamente de la BDG).
- ✓ **PUSat**: Peso unitario saturado (obtenido mediante relaciones de fase con G_S y e_o). En los estratos sin datos para cálculo se asumió igual al PUH o mayor.
- ✓ k_V: Permeabilidad vertical $\mathbf{k_y}$ (obtenida mediante expresión con C_v y m_v). La permeabilidad horizontal (o radial) $\mathbf{k_x}$ se asume como 2 veces el valor de la vertical para los suelos finos arcillosos, y hasta de 10 veces para suelos gruesos (arenas limo arcillosas).

- ✓ **ϕ'**: Ángulo de fricción interna (asumido y según reporte en la BDG).
- ✓ **C'**: Cohesión efectiva (estimado).
- ✓ **E**$_S$: Modulo de elasticidad (mediante el inverso de m_v o expresión con e_o y a_v).
- ✓ **ν**: Relación de Poisson (estimada por el tipo de suelo y valores de PLAXIS).
- ✓ **C**$_c$, **C**$_s$: Índices de compresión y recompresión.

Los módulos de rigidez y permeabilidad se determinaron a partir del índice de compresión **C**$_c$ y coeficiente de compresibilidad **a**$_v$ suponiendo una condición de variación lineal en las etapas de consolidación. Los parámetros c' y ϕ' se asumieron de datos de sondeos diferentes reportados en la MZSB. El ángulo de dilatancia (**ψ**) se consideró nulo (0.0).

En el Anexo # 7 se incluyen los perfiles estratigráficos simplificados y los parámetros geotécnicos para la modelación numérica de cada sitio de interés.

9.2.4 Cálculo de asentamientos en el tiempo por variación del nivel freático

9.2.4.1 Resumen de resultados

En las siguientes Tablas se resumen los resultados de los cálculos de asentamientos totales en superficie (inmediatos y por consolidación), para cada uno de los sitios de análisis de la modelación 1D y 2D para los períodos de evaluación.

Sitio 1 Sondeo 3

Descenso NF	Asentamiento (cm)			
(m)	5 años	10 años	20 años	50 años
0,5	3,2	6,5	8	15
1	3,5	9,8	17,5	29
2	3,1	9,3	26,8	55,2
5	2,8	8,6	25,3	99,8

Sitio	Sondeo	Asentamiento total (m)			
		5 años	10 años	20 años	50 años
1	**03**	0.20	0.40	0.79	1.81
2	**06**	0.42	0.83	1.64	4.18
3	**08**	0.46	0.98	2.09	5.03
4	**09**	0.24	0.52	1.14	2.89
5	**10**	0.19	0.48	1.16	2.96
6	**12**	0.16	0.34	0.69	1.75
7	**23**	0.26	0.57	1.29	3.42
8	**33**	0.23	0.49	1.28	4.10
9	**34**	0.23	0.48	0.99	2.41
10	**36**	0.26	0.97	2.23	6.68

Tabla 19. Resumen de los resultados de la modelación 2D de subsidencia.

Tramo Calle 127	Asentamiento total (cm)			
	5 años	10 años	20 años	50 años
Extremo Occidental	0.44	0.92	1.72	4.31
Parte Media	0.41	0.87	1.64	4.10
Extremo Oriental	0.37	0.80	1.52	3.80

En la Figura 53 se aprecia la geometría del modelo 2D en elementos finitos establecido para el análisis de la subsidencia.

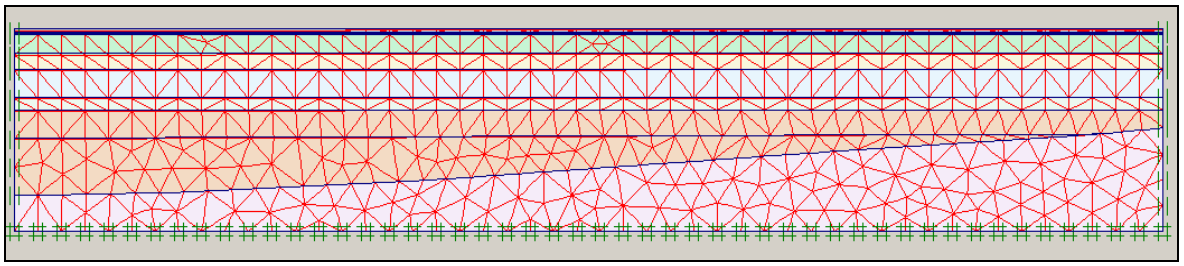


Figura 53. Geometría y elementos definidos para la modelación numérica 2D.

9.2.4.2 Gráficas de variación del asentamiento con el tiempo y la profundidad

En las siguientes figuras se aprecian las gráficas de variación de los asentamientos con el tiempo de algunos de los sitios de modelación 1D y 2D para una tasa de descenso regional del nivel freático de 0.10 cm/año y periodos de análisis de 5, 10, 20 y 50 años. Este tipo de gráficas son útiles particularmente porque los niveles freáticos son relativamente sencillos de monitorear en el tiempo y por lo tanto puede tenerse esta información como guía de la posible evolución de la subsidencia en un determinado sitio. En general los valores representan la compresibilidad del depósito en cada sitio, es decir constituyen una variable puramente geotécnica, la otra variable, relacionada con la tasa del descenso del nivel freático está fundamentalmente relacionada con las tasas de extracción de aguas subterráneas y en menor medida con los períodos estacionales.

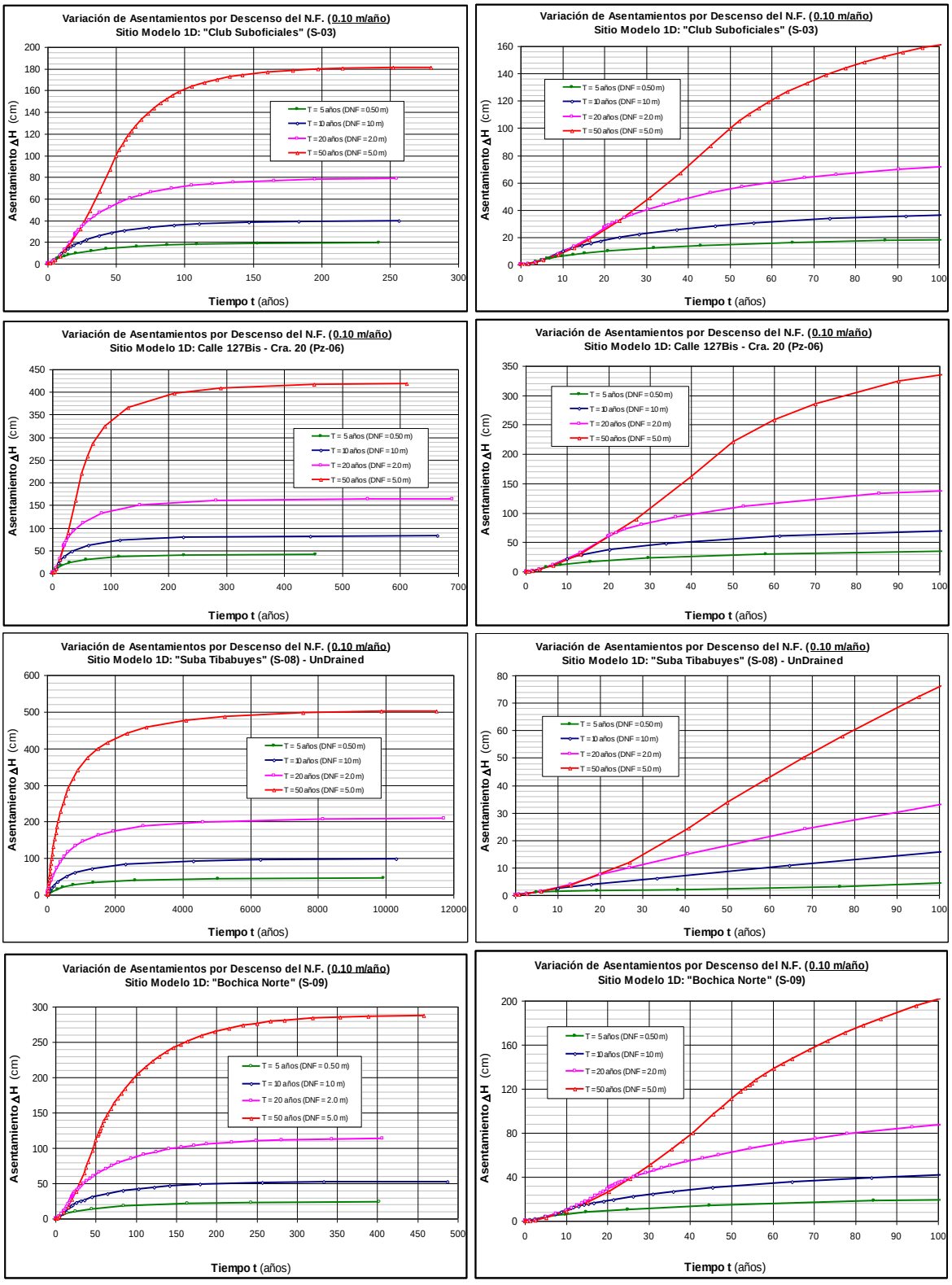


Figura 54. Variación del asentamiento con el tiempo Sondeos 03 A 09 – Análisis 1D.

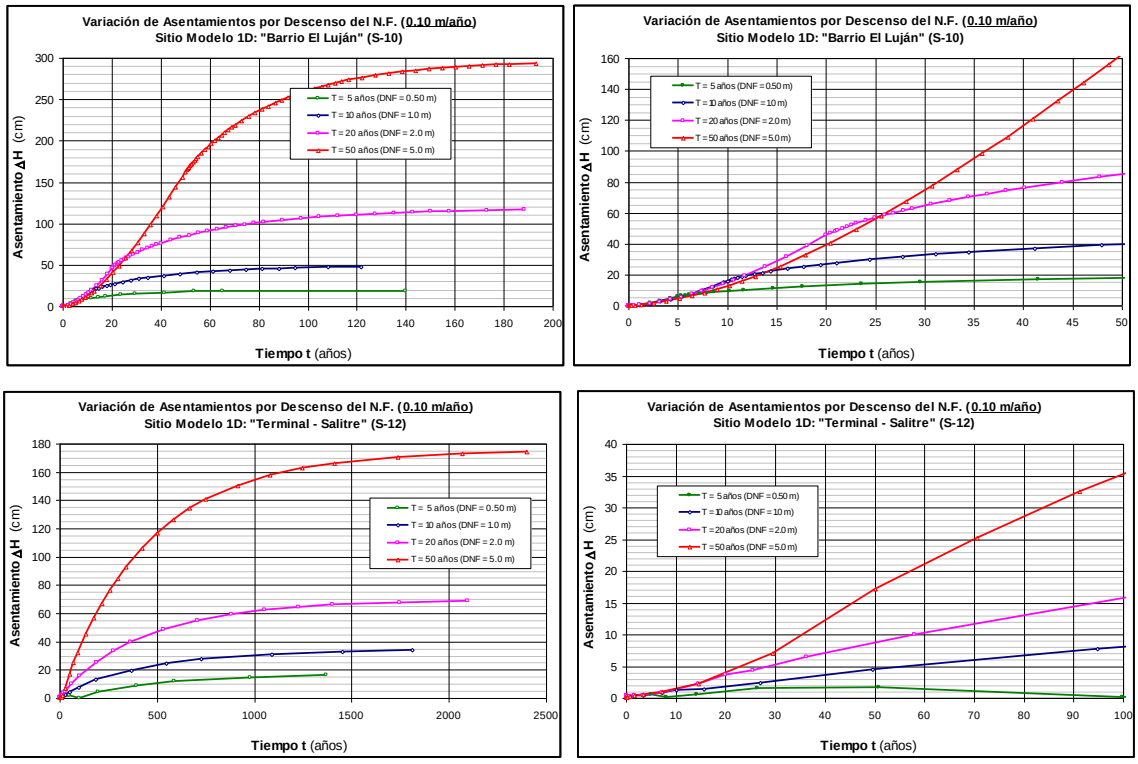


Figura 55. Variación del asentamiento con el tiempo Sondeos 10 y 12 – Análisis 1D.

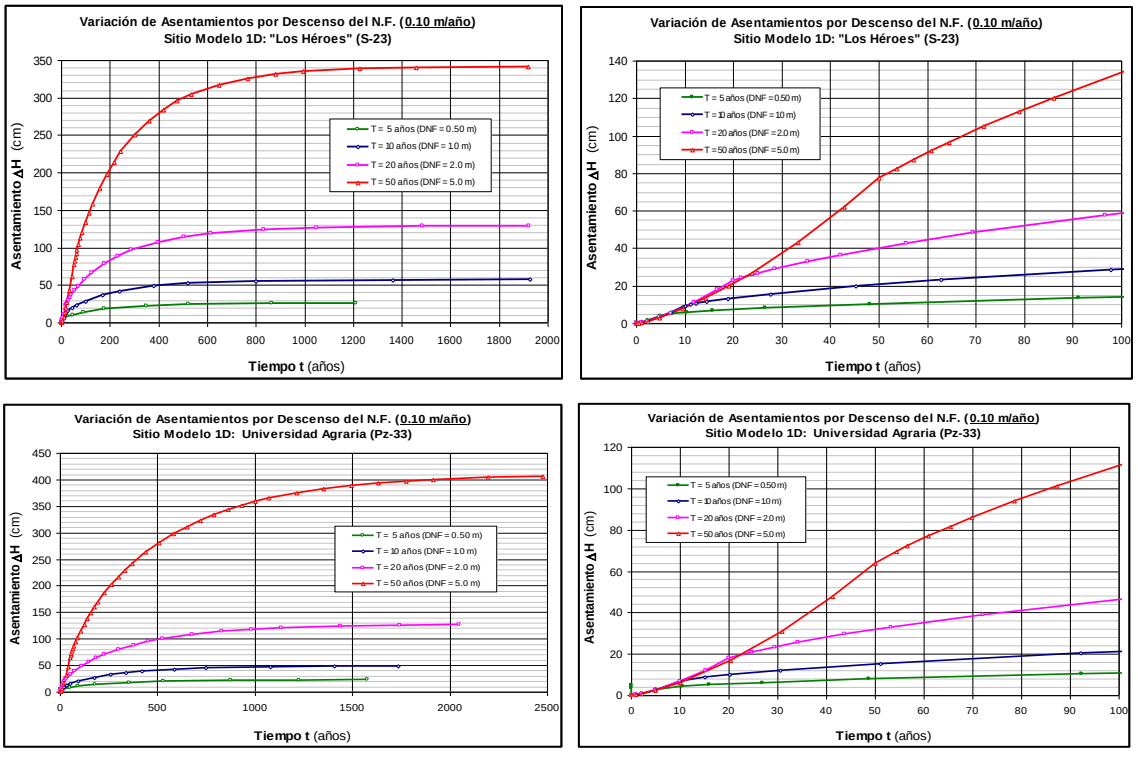


Figura 56. Variación del asentamiento con el tiempo Sondeos 23 y 33 – Análisis 1D.

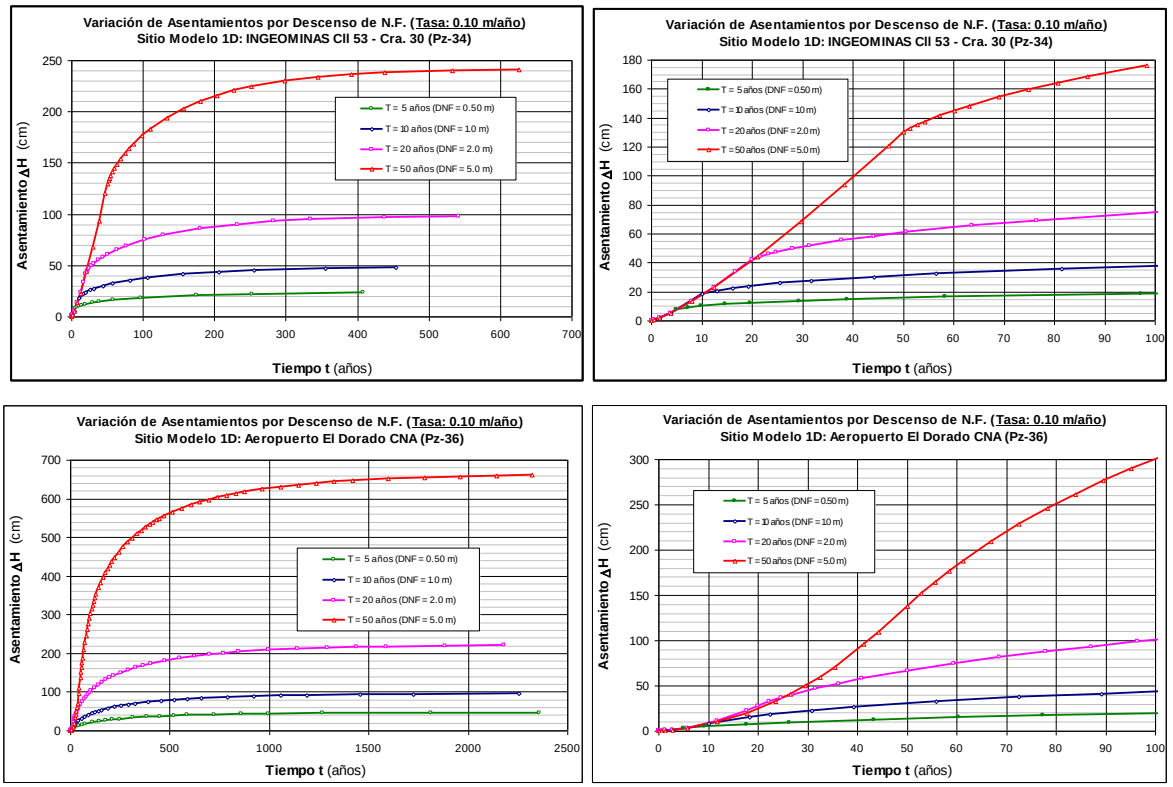


Figura 57. Variación del asentamiento con el tiempo Sondeos 34 y 36 – Análisis 1D

Tabla 20. Valores de asentamiento calculado para diferentes tiempos, considerando posibles variaciones totales de nivel freático a una tasa de 10 cm/año.

Sitio 1 Sondeo 3 Club Suboficiales				
Descenso NF	Asentamiento (cm)			
(m)	5 años	10 años	20 años	50 años
0,5	3,2	6,5	8	15
1		9,8	17,5	29
2			26,8	55,2
5				99,8

Sitio 2 sondeo 6 Calle 127 Bis				
Descenso NF	Asentamiento (cm)			
(m)	5 años	10 años	20 años	50 años
0,5	8	12,7	18,4	27,9
1		22	36,8	55,6
2			60,2	108,6
5				220,8

Sitio 3 sondeo 8 Suba				
Descenso NF	Asentamiento (cm)			
(m)	5 años	10 años	20 años	50 años
0,5	1,2	1,4	1,6	2,2
1		2,5	4,1	8,6
2			7,4	18,1
5				33,8

Sitio 4 sondeo 9 Bochica Norte				
Descenso NF	Asentamiento (cm)			
(m)	5 años	10 años	20 años	50 años
0,5	3,6	6,2	9,3	14,7
1		10,1	18,7	31,4
2			29,2	62,6
5				111,3

Sitio 5 sondeo 10 El Luján				
Descenso NF	Asentamiento (cm)			
(m)	5 años	10 años	20 años	50 años
0,5	5,7	9,5	12,9	17,6
1		16	26,8	39,6
2			45,5	84,8
5				162,6

Sitio 6 sondeo 12 Terminal Salitre				
Descenso NF	Asentamiento (cm)}			
(m)	5 años	10 años	20 años	50 años
0,5	0,56	0,3	1	1,6
1		1,2	1,8	4,4
2			3,6	8,7
5				17,2

Sitio 7 sondeo 23 Los Héroes				
Descenso NF	Asentamiento (cm)}			
(m)	5 años	10 años	20 años	50 años
0,5	3,9	5,6	7,2	10,6
1		9,3	13,5	20,7
2			22,9	40
5				77,2

Sitio 8 sondeo 33 Uniagraria				
Descenso NF	Asentamiento (cm)			
(m)	5 años	10 años	20 años	50 años
0,5	2,9	4,3	5,5	7,9
1		6,8	10	15
2			17,9	31,9
5				64

Sitio 9 sondeo 34 Ingeominas				
Descenso NF	Asentamiento (cm)			
(m)	5 años	10 años	20 años	50 años
0,5	7,8	10	12,3	15,6
1		18,5	23,8	31,2
2			42	61
5				130

Sitio 10 sondeo 36 Aeropuerto				
Descenso NF	Asentamiento (cm)			
(m)	5 años	10 años	20 años	50 años
0,5	2,8	5	7,8	13,4
1		8,6	16,6	30,4
2			27,9	66,6
5				138,2

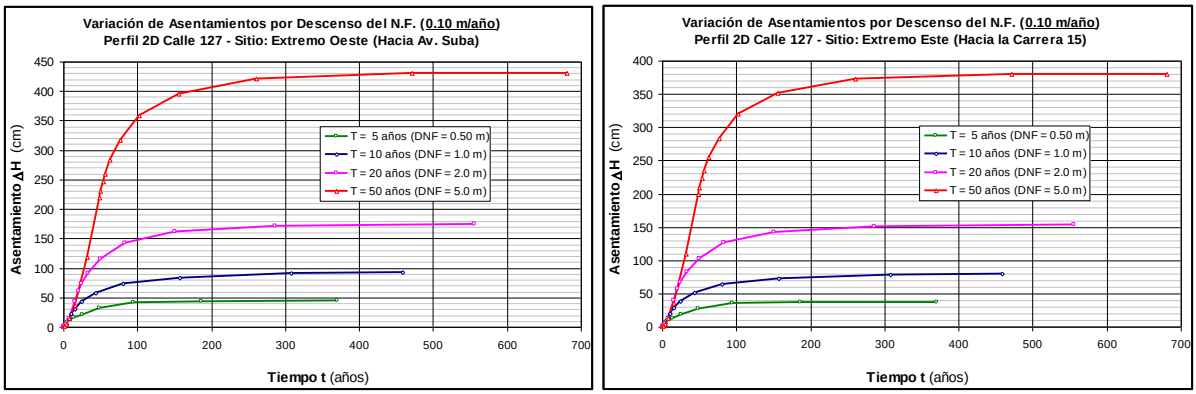


Figura 58. Variación del asentamiento con el tiempo Perfil Calle 127 – Análisis 2D.

Los asentamientos totales son obtenidos por la modelación de descensos del nivel de agua (DNF) de 0.50 m, 1.0 m, 2.0 m y 5.0 m, y las respectivas deformaciones por disipación del exceso de presión de poros en el tiempo hasta un valor mínimo (≤ 1.0 kPa).

A continuación se presentan algunos perfiles de variación del asentamiento total (final) con la profundidad de acuerdo con las consideraciones de análisis y sitios de interés.

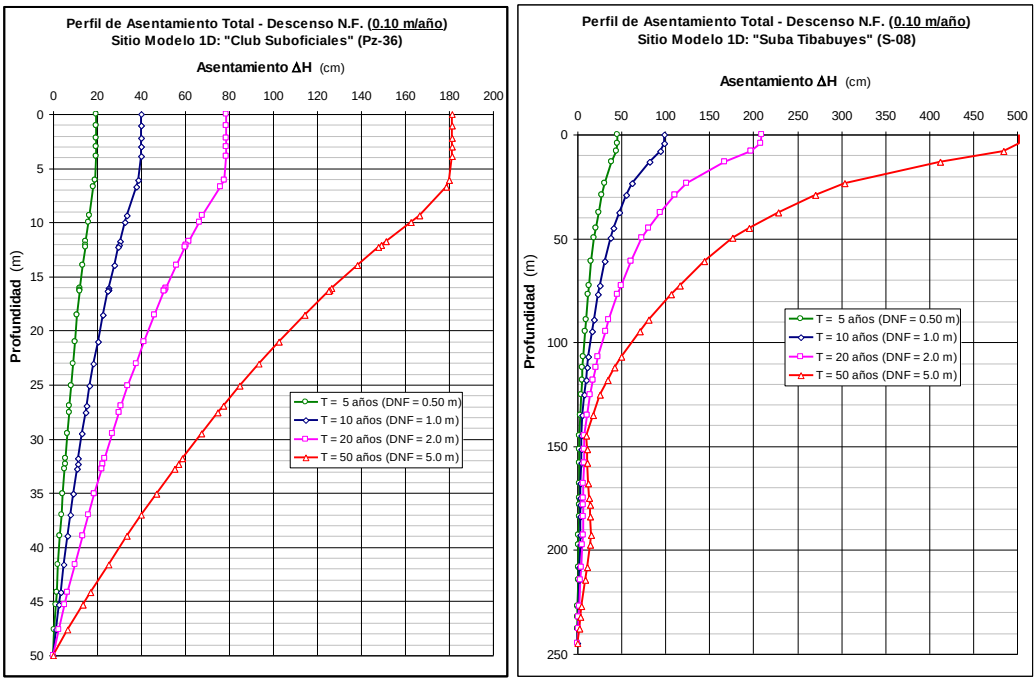


Figura 59. Perfil de asentamiento con la profundidad Sondeos 03 y 08 – Análisis 1D.

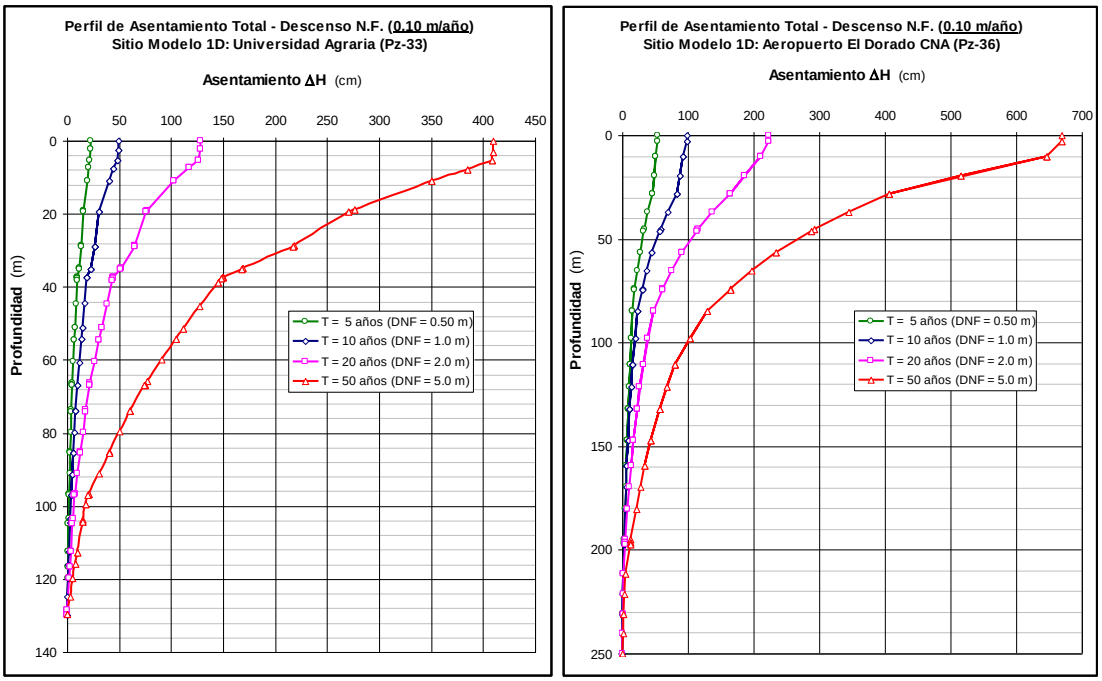


Figura 60. Perfil de asentamiento con la profundidad Sondeos 33 y 36 – Análisis 1D.

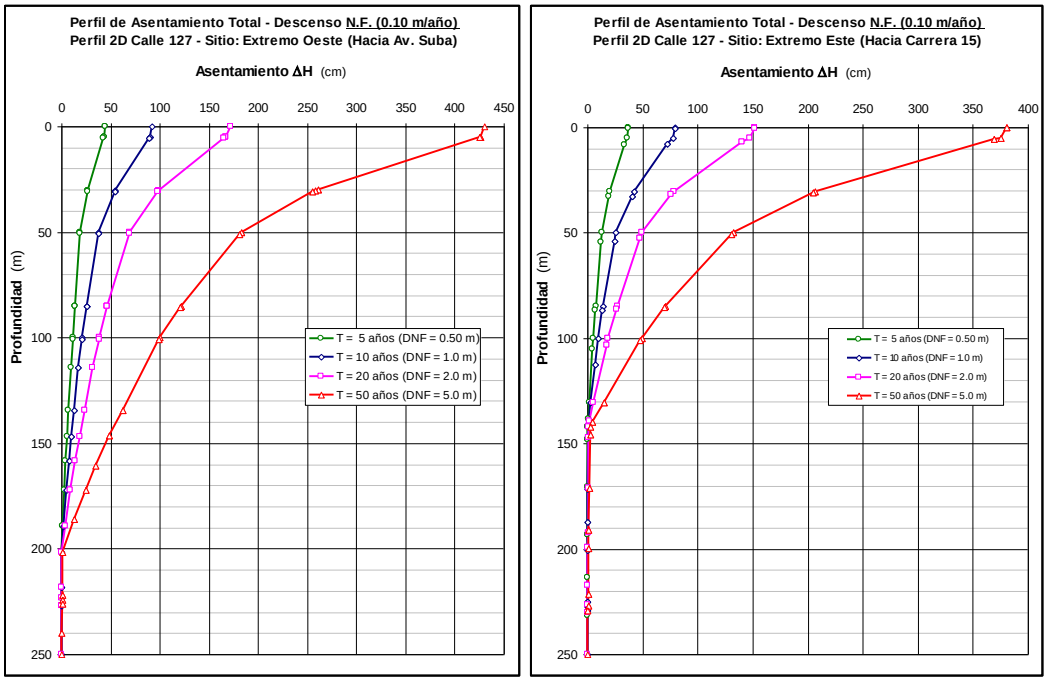


Figura 61. Perfil de asentamiento con la profundidad Perfil Calle 127 – Análisis 2D.

9.2.5 Análisis de los resultados de la modelación

Para las hipótesis, tipo y tiempos de análisis considerados, se observan asentamientos de mayor magnitud para los sitios modelados de los sondeos de la Calle 127bis (S-06), Suba Tibabuyes (S-08), Los Héroes (S-23), Universidad Agraria (S-33) y el Aeropuerto El Dorado (S-36), con asentamientos totales críticos superiores a 3.0 m (3.42 m a 6.68 m) para un tiempo de 50 años y un descenso del nivel freático de 5.0 m, consecuente esto en parte por las características de los suelos identificados en cada zona y evidencias reportadas del proceso de subsidencia.

Los análisis muestran que las deformaciones que se generan por subsidencia en los suelos blandos de la ciudad de Bogotá solo se estabilizan para unos tiempos muy largos, esto es así porque las permeabilidades de los depósitos de arcilla son muy bajas y los espesores son muy grandes, particularmente hacia la zona occidental donde el nivel de roca se va profundizando. Estos tiempos de retraso entre los cambios de presión y las deformaciones observadas deben tenerse muy en cuenta para la gestión de la extracción de agua subterránea puesto que sus efectos no son inmediatos sino que se pueden notar varios años después e incluso el hecho de suspender la extracción no genera recuperaciones inmediatas en las tasas de subsidencia que se estén presentando. Esto se pudo verificar con los análisis iniciales en los que se evaluaron los descenso de niveles freáticos en función de los descensos en los niveles piezométricos.

La profundidad de mayor deformación depende de la longitud del perfil de análisis, pero en general para los modelos 1D inferiores a los 100 m de profundidad, los asentamientos mayores se presentan en los primeros 20 m; para los perfiles de análisis profundos estos asentamientos se concentran en los 50 m más superficiales. Esto es muy coincidente con las características de deformación observadas en otras ciudades del mundo que han experimentado subsidencia.

Se puede observar en las gráficas que un descenso máximo de niveles freáticos de 2 m en 20 años puede generar subsidencia entre 20 y 60 cm, valores que pueden generar daños en las obras superficiales y que por lo tanto deberían controlarse mediante un monitoreo periódico. Obviamente los piezómetros son la herramienta más apropiada para esta evaluación pero con el desarrollo de estudios de suelos en distintos sitios de la ciudad, sería conveniente llevar un registro cuidadoso de la ubicación de los niveles freáticos encontrados.

Como estos cálculos corresponden a modelación bajo un número importante de hipótesis, resulta indispensable que además de la instalación de piezómetros se continúe con la medición de las deformaciones superficiales, por medio de nivelación directa y mediante nuevas imágenes para elaborar interferogramas actualizados y que instalen extensómetros o sistemas para medir la magnitud de las deformaciones a diferentes profundidades, pues esta es realmente la forma de controlar la evolución del proceso.

De la modelación 2D se obtienen los mayores asentamientos para el sector de mayor espesor de depósito de suelo, disminuyendo la magnitud a medida que asciende el nivel de la roca hacia el costado oriental de la ciudad correspondiente a la zona de cerros.

10 IDENTIFICACIÓN DE POSIBLES EFECTOS EN ZONAS CRÍTICAS

Identificación de posibles efectos en zonas críticas y evaluar aspectos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo asociados al fenómeno y estudios adicionales requeridos

Con las magnitudes de las deformaciones totales y diferenciales que actualmente se tienen no es evidente que existan amenazas severas sobre la infraestructura como son redes de servicios públicos, vías y edificaciones, no obstante si las tasas de subsidencia que se han registrado continúan con la misma tendencia, particularmente en las zonas de mayor subsidencia registrada, pueden presentarse manifestaciones de daños superficiales en períodos de 10 a 15 años pues aquí comenzarían a hacerse evidentes las deformaciones diferenciales con efectos como agrietamientos en vías, en edificaciones superficiales y en sistemas de redes.

Es necesario tener claro que la subsidencia es un proceso dinámico que puede incrementarse por efectos de aumentos en la explotación de los niveles acuíferos y por desarrollos constructivos en zonas donde se impida la recarga de tales acuíferos, particularmente las zonas de piedemote, por esta razón es muy importante que se adelanten estudios de vulnerabilidad por deformaciones para cada uno de los sistemas de redes de la ciudad. Estas deformaciones máximas permisibles se constituyen en un factor crítico para evaluar la amenaza y posteriormente el riesgo de cada sistema.

Aunque no se cuenta con datos de deformaciones relativas entre las zonas aluviales muy próximas al río Bogotá y las zonas de arcillas blandas, por las características litológicas y de compresibilidad, es muy probable que se hayan presentado mayores tasas de subsidencia en los suelos arcillosos que en las arenas aluviales y esto puede contribuir a aumentar la vulnerabilidad de muchos sectores a inundaciones como las que se registraron durante la pasada temporada invernal agudizada por el “Fenómeno de La Niña”. Este es un fenómeno que se ha presentado en otros sitios que han sufrido subsidencia en el mundo y por tal razón se debe considerar en los análisis de inundación.

Otro fenómeno importante asociado a la subsidencia es el da la fricción negativa o sobrecarga que sufren los pilotes cuando están apoyados por punta sobre estratos de mayor resistencia, puesto que al presentarse la consolidación de los niveles blandos se presenta un arrastre hacia debajo de la arcilla sobre las paredes del pilote este arrastre induce in incremento de los esfuerzos a compresión pero fundamentalmente generan problemas de tipo arquitectónico porque ese desplazamiento relativo entre el suelo blando que sufre subsidencia y la edificación que permanece fija gracias a los pilotes se refleja en superficie como si la edificación se levantara o emergiera por lo cual se producen desniveles importantes que requieren de la construcción de escalones, rampas o rellenos especiales. Este tipo de problemas se presenta en la ciudad de Bogotá en sectores del nororiente como el Centro Andino y el World Trade Center.

Las obras subterráneas como el metro de Bogotá o túneles pueden sufrir problemas de deformaciones importantes por efectos de subsidencia, los cuales deben ser evaluados en cada caso particular. Los datos que se presentan en este estudio respecto a la distribución de materiales en profundidad y las propiedades de tales materiales constituyen un insumo muy valioso que debe tenerse en cuenta para los diseños de tales obras de alto impacto.

Las mismas obras subterráneas a su vez pueden generar problemas adicionales de subsidencia bien sea por colapso de los niveles superiores de suelo o por sobrecargas que inducen consolidaciones significativas. Es importante involucrar en los estudios de estas obras los análisis de amenaza, vulnerabilidad y el riesgo tanto para ellas como para las edificaciones vecinas que pudieren resultar afectadas.

11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

11.1 CONCLUSIONES

- ✓ Las mediciones que se tienen de descensos de niveles del terreno en la ciudad, determinados tanto por métodos directos de nivelación topográfica como por métodos indirectos como sistemas de posicionamiento global GPS e interferometría diferencial, muestran que se viene presentando una subsidencia del terreno en la ciudad de Bogotá, con tasas que varían entre aproximadamente 1.0 cm y 7.5 cm al año, con lo cual para el caso más extremo, las deformaciones en 10 años llegarían a tener valores de 75 cm. Sin embargo, las observaciones de campo no muestran evidencias de deformaciones tan altas en ese período pues deberían apreciarse cambios muy notorios en las edificaciones e infraestructura debido a que las deformaciones no son uniformes en toda la ciudad.

- ✓ Un análisis crítico y detallado de las deformaciones medidas indica que el problema es más complejo de lo que inicialmente se puede suponer, puesto que son múltiples los factores que tienen incidencia y todos ellos contribuyen en mayor o menor medida en los valores registrados de deformación. Entre los factores que se pudieron identificar se tienen los procesos locales de consolidación generados por dinámicas urbanísticas intensivas sobre suelos de alta compresibilidad, la extracción de aguas subterráneas a diferentes profundidades que con frecuencia son difíciles de identificar tanto en profundidad como en caudales de explotación, la desecación superficial por procesos naturales de sequía o por procesos antrópicos particularmente relacionados con los descensos inducidos de niveles freáticos mediante bombeo para la construcción de sótanos y otras obras subterráneas. Es posible también que se presenten deformaciones relacionadas con el movimiento de placas tectónicas pero esta variable no pudo evaluarse porque el INGEOMINAS, que es la entidad encargada de su monitoreo, aún no cuenta con datos que permitan conocer las magnitudes de deformación vertical. Finalmente, la consolidación secundaria de las arcillas es otro posible efecto pero al evaluarse sus magnitudes resultan muy poco significativas en el proceso de subsidencia.

- ✓ Al analizarse los asentamientos que pueden producirse por descensos rápidos del nivel freático por efectos de bombeo se encuentran valores de asentamientos que pueden variar entre 10 y 30 cm, si adicionalmente se consideran cargas, de acuerdo con los estudios de suelos, los asentamientos totales esperados son de 10 a 20 cm, de tal forma que en conjunto, los edificios nuevos en zonas de intensiva expansión como Ciudad Salitre fácilmente pueden generar asentamientos totales que varían entre 20 y 50 cm, lo cual podría explicar en parte las grandes tasas de deformación registradas en zonas cercanas a este sector.

- ✓ La mayoría de los fenómenos generalizados de subsidencia en el mundo están claramente relacionados con la explotación intensiva de agua subterránea y se observa correlación directa entre los volúmenes de consumo y tasa de subsidencia. En

el caso de la zona urbana de Bogotá se puede establecer una posible correlación similar si se tienen en cuenta que en los registros piezométricos de INGEOMINAS y del Aeropuerto El Dorado es donde se presentan caídas piezométricas considerables a profundidades entre 172 y 116 m, pues es justamente en tales sectores donde se han registrado las mayores tasas de subsidencia, sin embargo, al superponer los registros de explotación de acuíferos con las zonas de subsidencia esta correlación ya no resulta evidente probablemente porque la extracción no es tan intensiva en tales pozos, puesto que los niveles de extracción más significativos son muy profundos y tienen poco efecto sobre la subsidencia o también porque es posible que los registros oficiales no representan la realidad de la explotación de los acuíferos y que existan pozos clandestinos que hagan extracciones de grandes volúmenes de agua que no se pueden identificar como contribuyentes a las deformaciones del terreno.

- ✓ Como el proceso de subsidencia es complejo y las variables son múltiples y no siempre se pueden determinar con precisión, para predecir posibles comportamientos a distintos tiempos, es necesario establecer unos escenarios probables de análisis y unas variables de control. Con base en lo que se ha analizado del proceso, se consideró que una situación probable corresponde a una tasa de descenso del nivel freático (NF) de 10 cm/año (controlar la variación de la posición del NF resulta bastante práctico y económico). Si esto es así, se encuentra que para un período de 20 años, la deformación media del terreno en superficie es del orden de 20 cm, mientras que para 50 años sería del orden de 30 cm, con variaciones puntuales mayores o menores según el caso pero que en general muestran que se trata de magnitudes relativamente manejables, por lo cual esta tasa de descenso del NF podría considerarse como un valor de referencia que no debería sobrepasarse y en lo posible sería conveniente considerar un margen de seguridad que permita establecer alertas por sus posibles efectos.

- ✓ Los controles piezométricos en profundidad son indispensables teniendo en cuenta el gran tiempo de retraso entre la extracción de agua en profundidad y el reflejo de su efecto en superficie. Los piezómetros actualmente instalados por INGEOMINAS ofrecen una guía importante del comportamiento de las presiones de agua en el subsuelo, pero a todas luces son insuficientes y en particular no se cuenta con registros piezométricos detallados en la zona donde se ha medido la mayor tasa de subsidencia, con lo cual no es posible establecer una correlación entre los efectos hidrogeológicos y subsidencia medida.

11.2 RECOMENDACIONES

Con las magnitudes de las deformaciones totales y diferenciales que actualmente se tienen no es evidente que existan amenazas severas sobre la infraestructura como son redes de servicios públicos, vías y edificaciones, no obstante este es un proceso dinámico que puede incrementarse por efectos como el aumento en la explotación de los niveles acuíferos o por desarrollos constructivos en zonas donde se impida la recarga de tales acuíferos, particularmente las zonas de piedemote. De cualquier forma es recomendable

que las entidades encargadas de las redes de servicios públicos adelanten sus propios análisis de vulnerabilidad por deformaciones e identifiquen los aspectos que para ellas serían los más críticos.

Aunque no se cuenta con datos de deformaciones relativas entre las zonas aluviales muy próximas al río Bogotá y las zonas de arcillas blandas, por las características litológicas y de compresibilidad, es muy probable que se hayan presentado mayores tasas de subsidencia en los suelos arcillosos que en las arenas aluviales y esto puede contribuir a aumentar la vulnerabilidad de muchos sectores a inundaciones como las que se registraron durante la pasada temporada invernal agudizada por el “Fenómeno de La Niña”.

Es de gran importancia para el análisis de la posible subsidencia por extracción de agua del subsuelo, conocer las particularidades del sistema hidrogeológico en evaluación y en especial, identificar las condiciones de contorno (las fuentes de recarga y descarga, las características y valores de explotaciones de agua subterráneas, etc.), por lo cual se hace necesario implementar estudios detallados de los aspectos hidrogeológicos y geotécnicos de la ciudad de Bogotá.

La ejecución de perforaciones mecánicas profundas (entre los 200 m y 350 m) y ensayos de geofísica que permitan confirmar y ajustar la continuidad de las secuencias litológicas evidenciadas y estimadas en sitios de poca información, representan uno de los posibles insumos de gran valor para el enriquecimiento del modelo conceptual para el análisis del proceso de subsidencia en la ciudad de Bogotá.

Por lo anterior se recomienda realizar, por lo menos, cuatro perforaciones profundas en los sitios sugeridos en la Figura 62 (Plano 6, Vol. 2) y en los perfiles geológicos L 2-2', T 3-3', T 4-4' y T 6-6', con una profundidad total acumulada de 1,100 m. Con estos sondeos se buscaría: 1) Definir un modelo hidrogeológico del depósito Cuaternario más cercano a la realidad y poder así determinar las posibles áreas de recarga de los cuerpos de arena; 2) Obtener muestras representativas de las diferentes litologías del relleno Cuaternario para efectuar todas las caracterizaciones geotécnicas necesarias; 3) Establecer puntos de control y muestras del contacto relleno cuaternario-roca, y 4) Instalar diferentes instrumentos para monitoreo de fines sísmicos, geotécnicos e hidrogeológicos. En particular se recomienda instalar extensómetros que vallan desde la superficie del terreno hasta la roca, con lo cual se podrían medir las deformaciones que presenta el subsuelo a diferentes profundidades y de esta manera se podría afinar mucho más el conocimiento del fenómeno de subsidencia.

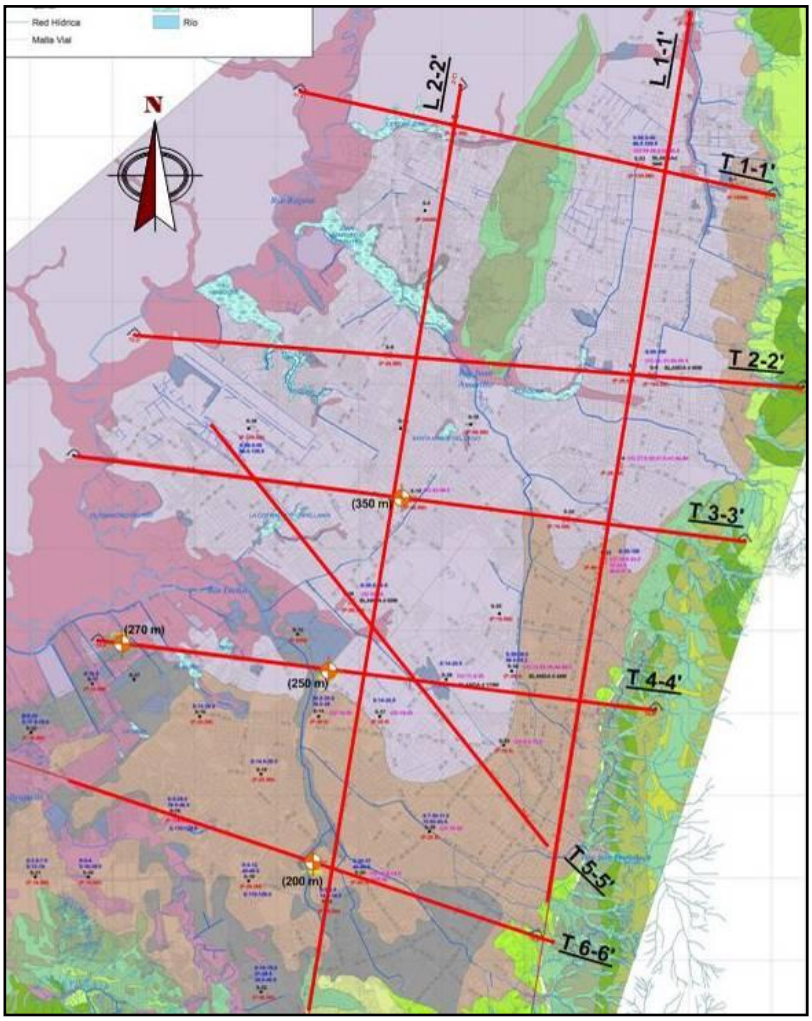


Figura 62. Esquema de localización de las perforaciones adicionales recomendadas.

Las obras subterráneas como son el Metro (PMB), estaciones profundas o túneles en general deben considerar el posible efecto de la subsidencia del terreno y aunque la información que en este estudio se presenta puede constituir un insumo, se deben efectuar estudios puntuales y detallados en cada caso particular.

Es conveniente aprovechar la información aquí levantada para realizar nuevos análisis y modelaciones considerando distintas hipótesis y verificando resultados, para esto además de la continuidad de los trabajos de monitoreo del IGAC e INGEOMINAS se recomienda actualizar el estudio de interferometría diferencial con imágenes que tengan poca diferencia temporal.

12 BIBLIOGRAFÍA

- Ávila Álvarez, G. (1998). *Instrumentación piezométrica para análisis de subsidencia en Santafé de Bogotá*. VII Congreso Colombiano de Geotecnia. Sociedad Colombiana de Geotecnia, Bogotá.

- Castrillón, F. y Aravena R. (2002). *Algunas evidencias de explotación intensiva de los acuíferos en la cuenca alta del río Bogotá, Colombia*. Boletín Geológico y Minero, 113(3): 283-291.

- Corapcioglu, M.Y. (1984). *Land subsidence a state of the art review. Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*. En: Bear and M. Y. Corapcioglu (Ed.), NATO ASI Series E.82, Martinus Nijhott Publishers, 369-444 pp.

- Dassargues, A y Li, X.L. (1991). Computing the land subsidence of Shangai by finite element method. Proc. Fouth Int. Symposium on land subsidence, May, 1991. LAHS no 200.

- FOPAE. (2008) Base de datos geotécnica. Información en archivos digitales.

- Galloway, D. and Riley, F. S. (2001). *Mining Ground Water*. U.S. Geological Survey (USGS), Menlo Park, California.

- Garzón R., J.C. (2011) *"Análisis de Asentamientos inducidos por Descensos del Nivel Freático".* Tesis de Maestría en Ingeniería – Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia; facultad de ingeniería. Bogotá.

- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Ed. Prentice Hall, Madrid, 715 pp.

- Hernández B., P. y Uscategui P., J. (1976). *Geología de un sector del área urbana de Bogotá y sus implicaciones geotécnicas*. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias. Bogotá.

- Herrera I.; Martínez W. y Téllez L. (2008). *Spirit leveling and geodetic networks to monitor ground subsidence in Bogotá-Colombia*. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. UD y la Geomática, Vol. 1, No. 2, Bogotá, 81-86 pp.

- IDEAM- FOPAE. (2007). Estudui de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo. 118 p.

- Ingeominas y Universidad de Los Andes (1997). Estudio de Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá.

- Ingeominas (2002). Aplicación de técnicas isotópicas en los estudios de aguas subterráneas. Grupo de Aguas Subterráneas de Ingeominas.

- Ingeominas (1987). Balances hídricos en la zona suroccidental de la Sabana de Bogotá, con énfasis en la hidrología subterránea.

- IGAC (2007). Nivelaciones de la red Geodésica de Bogotá.

- Instituto Cartográfico de Catalunya ICC- FOPAE. (2006). Estudio interferométrico diferencial SAR que permitirá determinar la evolución de las subsidencias del terreno en la ciudad de Bogotá en un peíodo de tiempo comprendido entre el año 1992 y 2005.

- Instituto Cartográfico de Catalunya ICC- FOPAE. (2008). Estudio interferométrico diferencial SAR que permitirá determinar la evolución de las subsidencias del terreno en la ciudad de Bogotá en un peíodo de tiempo comprendido entre el año 2006 y 2008 y evaluar el potencial de la herramientoa de evaluación DinSAR en el monitoreo de fenómenos de remoción de masa.

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

- Lobo Guerrero U., A. (1992). *Geología e hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana.* I Foro sobre Geotecnia de la Sabana.

- Mora P., H. y Ordóñez V., M.I. (2001). Mapa de Desplazamientos relativos de Placas Tectónicas a partir de Información GPS – Informe. INGEOMINAS, Manizales.

- Nguyen, T.Q.; Helm, D.C. (1995). *Land subsidence due to groundwater withdrawal in Hanoi, Vietnam*. Land Subsidence – Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence, The Hague. IAHS Publ. No. 234.

- Pérez Preciado, A. (2000). *La estructura geológica principal de la Sabana de Bogotá*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

- Pietro Teatrini, G.G. and Tosi, L. (1995). *A new three-dimensional nonlinear model of the subsidence at Venice*. Land Subsidence – Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence, The Hague. IAHS Publ. No. 234.

- Prokopovich, N.P. (1979). *Genetic classification on land subsidence*. En: Saxena, S.K. (ed.). *Evaluation and prediction of subsidence*. Proc. of the Int. Conf., Pensacola Beach, Florida, January 1978, Am. Soc. Civil Eng., New York, 389-399 pp.

- Rivera, A; Ledoux, E; Marsily, G. de (1991). *Nonlinear Modeling of Groundwater Flow and Total Subsidence of the Mexico City Aquifer-Aquitard System*. Land Subsidence – Proceedings of the Fourth International Symposium on Land Subsidence. IAHS Publ. No. 200.

- Rodríguez, C. (1992). *Subsidencia en la Sabana de Bogotá debido a la explotación de aguas subterráneas*. VII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería en Colombia.

- Rodríguez O., J.A. (2010). *Contribución al análisis de asentamientos regionales en Bogotá*. XIII Congreso Colombiano de Geotecnia - VII Seminario Colombiano de Geotecnia, Manizales.

- Rodríguez C., R.; Rodríguez V., I. (2006). *Consecuencias sociales de un desastre inducido, Subsidencia*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Número Especial de Geología Urbana. Tomo LVII, No. 2, 265-269 pp.

- Scott, R.F. (1979). Subsidence – A review. En: Saxena, S.K. (ed.). *Evaluation and prediction of subsidence*. Proc. of the Int. Conf., Pensacola Beach, Florida, January 1978, Am. Soc. Civil Eng., New York, 1-25 pp.

- Secretaría Distrital de Ambiente (2009). Informe estadístico del recurso hídrico subterráneo dentro del perímetro urbano de Bogotá, D.C.

- Tabares O., L.M.; Mora P., H. y Salcedo H., E.J. (1999). *Actividad Sísmica y Tasa de Deformación Sismo-tectónica en la zona del Viejo Caldas, Colombia*. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Vol. 23, No. 088. Bogotá, 359-373 pp.

- Teatini, p. Gambolati, G. y Tosi, L. (1995). A new three –dimensional nonlinear model of the subsidence at Venice. Proc. Of thr Fifth international Sympoium on land subsidence, The Hage, October, 1995. IAHS Pub. no 243.

- Téllez Pedroza, L.L. (2009). *Análisis de Deformación en la Zona Andina con base en velocidades corticales derivadas de Sistemas Globales de Navegación Satelital*. Trabajo de grado en Geología. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

- Tomás, R.; López S., J.M.; Delgado, J.; Mallorquí, J.J.; Herrera, G.; (2008). *Dinsar monitoring of aquifer compaction due to water withdrawal: Vegas Baja and Media of the Segura River (SE, Spain). Case Study*. In: Droughts: Causes, Effects and Predictions. Chapter 9. Nova Science Publishers, Inc. Editor: Javier M. Sánchez.

- Tomás, R.; Herrera, G.; Delgado, J.; Peña, F. (2009). *Enseñanzas de las ciencias de la Tierra*. Subsidencia del terreno. España. 295-302 pp.

- Tomás, R. (2009). *Estudio de la ciudad de Murcia mediante Interferometría SAR diferencial avanzada*. Tesis doctoral. Universidad de Alicante. 480 pp.

- Universidad Nacional de Colombia (2006). *Brindar apoyo técnico y actualizar herramientas para la regulación del aprovechamiento de las aguas subterráneas en Bogotá*. Informe Final.

- USGS. http://pubs.usgs.gov/circ/circ1182/pdf/06SanJoaquinValley.pdf

- Van der Hammen, T. (1957). *Sabana de Bogotá. Estratigrafía Palinológica*. Informe No. 1220. Servicio Geológico Nacional. Bogotá.

- Van der Hammen, T.; Werner, J.H. y Van Dommelen, H. (1973). *Palynological record of the upheaval of the Northern Andes: a study of the Pliocene and Lower Quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the early evolution of its High-Andean biota.* Review Palaeobotany and Palynology, 16:1-122. (También en: El Cuaternario de Colombia, Vol. 2).

- Van der Hammen, T. y Helmens, K.F. (1995). *Memoria explicativa para los mapas del Neogeno-Cuaternario de la Sabana de Bogotá – Cuenca alta del río Bogotá (Cordillera Oriental, Colombia)*. Análisis geográficos No. 24. IGAC.

/

13 ANEXOS

ANEXO 1: MAPA HIDROGEOLÓGICO DE BOGOTÁ (INGEOMINAS, 1997)

ANEXO 2: CARACTERÍSTICAS DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE LA SABANA DE BOGOTÁ (INGEOMINAS, 2002)

ANEXO 3: UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS (CAR, 2006)

ANEXO 4: INVENTARIO DE LA RED GEODÉSICA DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ – ESTACIONES IGAC

ANEXO 5: INFORME DE LA VISITA DE INSPECCIÓN A LA ZONA CRÍTICA DE MAYOR SUBSIDENCIA – SECTOR PUENTE ARANDA

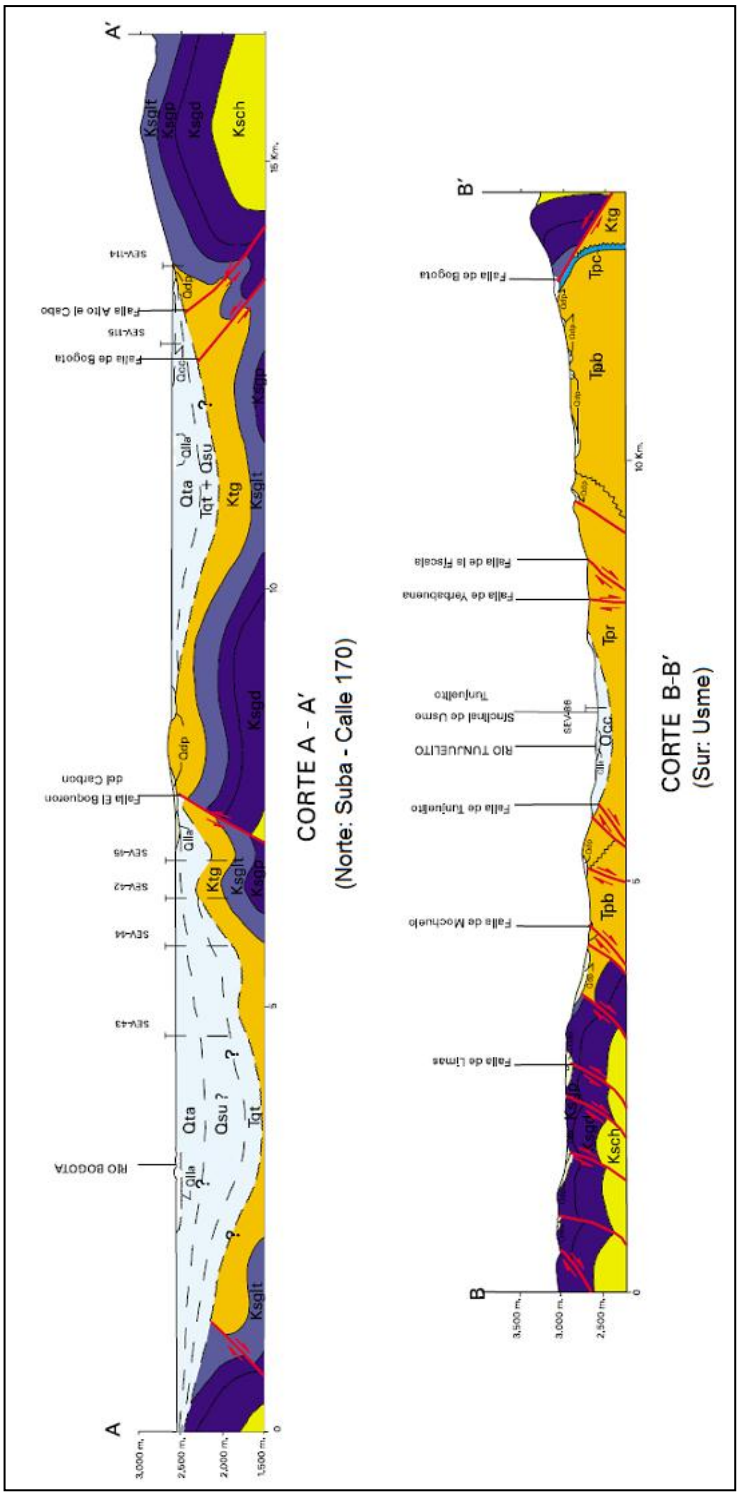
ANEXO 6: PERFILES GEOLÓGICOS PARA ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS DE LA SUBSIDENCIA EN BOGOTÁ

ANEXO 7: PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DETERMINADOS PARA LOS PERFILES DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA

ANEXO No. 1:

MAPA HIDROGEOLÓGICO DE BOGOTÁ (INGEOMINAS, 1997)

CORTES HIDROGEOLÓGICOS

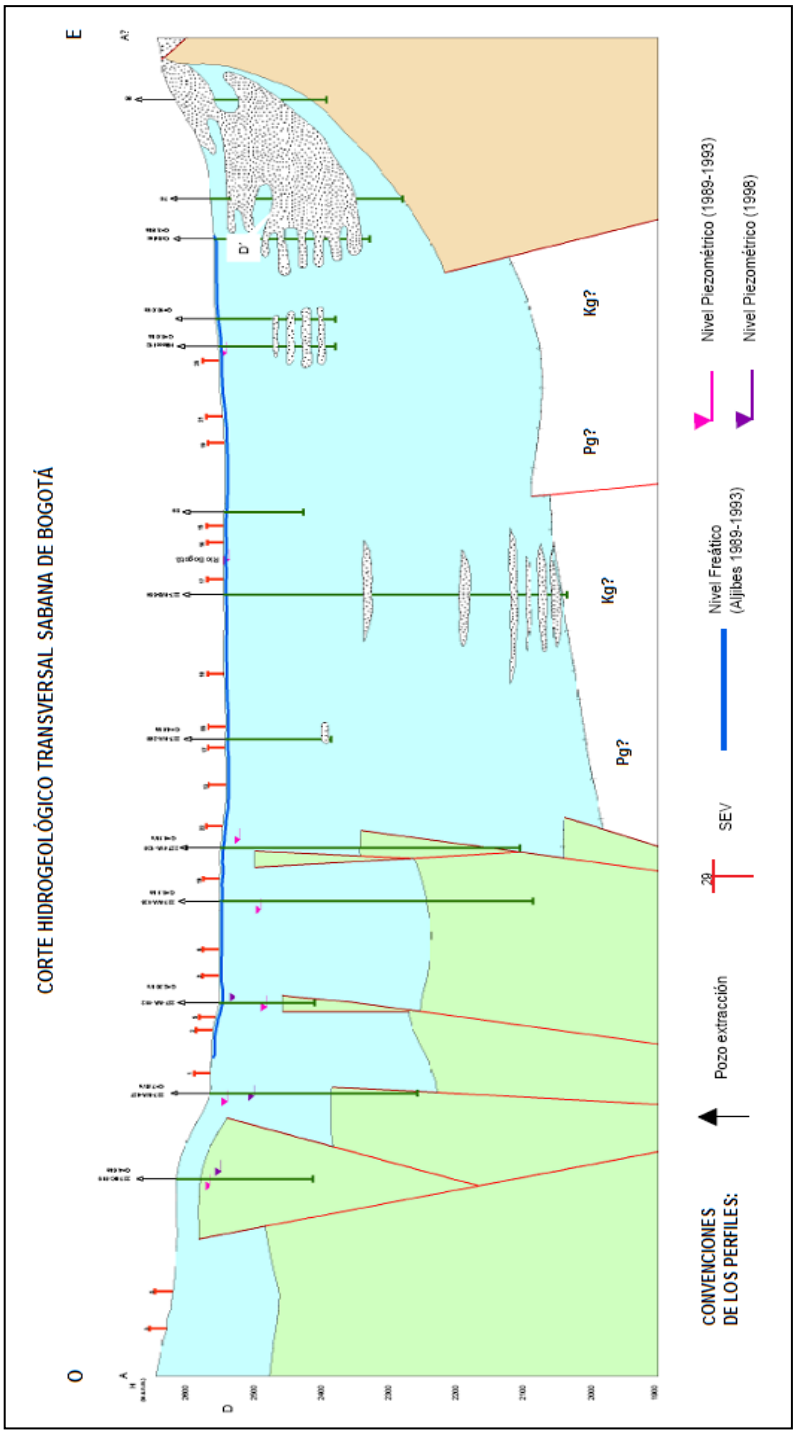

CORTE A - A'
(Norte: Suba - Calle 170)
CORTE B-B'
(Sur: Usme)
A
A'
B
B'
RIO BOGOTA
Falla de Bogota
Falla Alto el Cabo
Falla El Boqueron del Carbon
Falla de Limas
Falla de Mochuelo
Falla de Tunjuelito
RIO TUNJUELITO
Sinclinal de Usme
Tunjuelito
Falla de Yerbabuena
Falla de la Fiscala
Qta
Qsu ?
Tqt
Tqt + Qsu
Ktg
Ksgl
Ksgp
Ksgd
Ksch
Tpb
Tpc
Tpr
Qdp
Qcc
Qlla
SEV-14
SEV-15
SEV-42
SEV-44
SEV-43
SEV-45
SEV-36
3,000 m.
2,500 m.
2,000 m.
1,500 m.
3,500 m.
3,000 m.
2,500 m.
0
5
10
15 Km.
10 Km.

ANEXO No. 2:

CARACTERÍSTICAS DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS (INGEOMINAS, 2002)

CORTE HIDROGEOLÓGICO TRANSVERSAL DE LA SABANA DE BOGOTÁ

CARACTERÍSTICAS, PARÁMETROS Y FORMACIONES


CORTE HIDROGEOLÓGICO TRANSVERSAL SABANA DE BOGOTÁ
E
O
Kg?
Pg?
Kg?
Pg?
CONVENCIONES
DE LOS PERFILES:
Pozo extracción
SEV
Nivel Freático
(Aljibes 1989-1993)
Nivel Piezométrico (1989-1993)
Nivel Piezométrico (1998)

CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

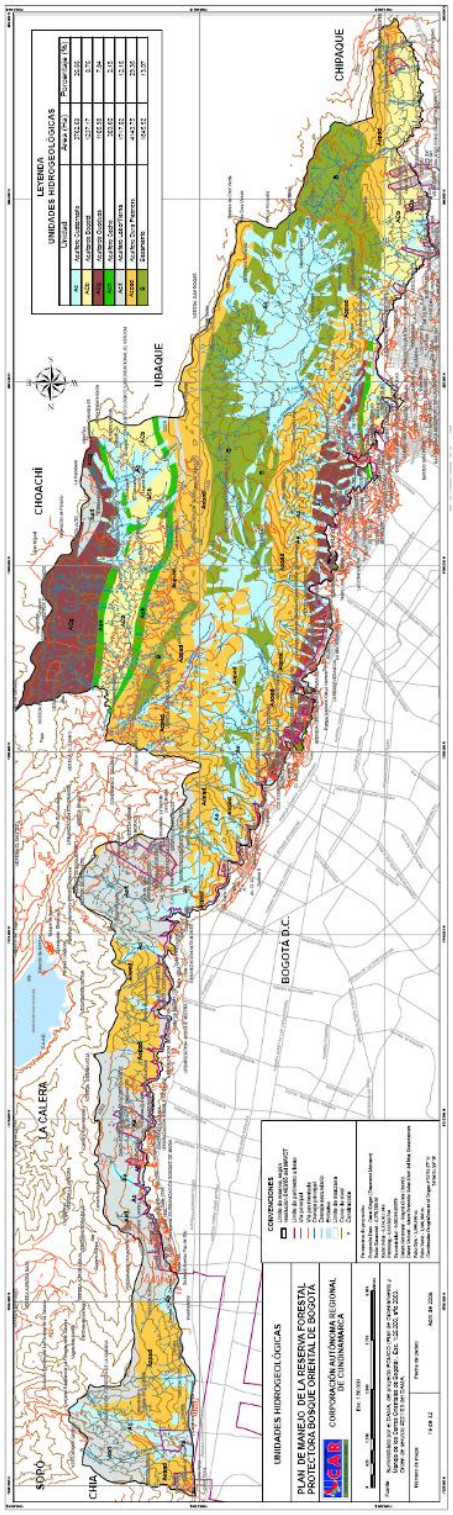
	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	CARACTERISTICAS DE LAS UNIDADES HIDROGEOLOGICAS	PARAMETROS HIDRAULICOS (caracteristicos)	FORMACIONES GEOLOGICAS
				Q: Depósitos sin diferenciar
				Qal: Depósitos Aluviales
NgQ	Complejo Acuífero de los Depósitos no consolidados Neógeno-Cuaternario	Acuíferos discontinuos de extensión regional y local conformados por sedimentos no consolidados, principalmente de origen lacustre y fluvial. Son de carácter libre, semiconfinado y confinado, su productividad varia de alta a baja.	**T**: 3- 900 **K**: 0,01 – 3 **S**: $1*10^{-3}$ –$1*10^{-7}$ **CE**: <0.1 - 3	Qc: Depósitos Coluviales Qlg: Depósitos Fluvioglaciares Qaa: Depósitos de Abanico Aluvial Qta: Depósitos Terraza Alta NgQt: Formación Tilatá
Pgc	Unidad Acuífera de la Formación Cacho	Acuíferos de extensión local conformados por rocas sedimentarias del Paleógeno de ambiente fluvial, generalmente son de carácter confinado y de baja productividad.	**T**: 200 **K**: 0.3 **S**: $1*10^{-4}$ **CE**: 0.1-0.5	Pgc: Formación Areniscas del Cacho
Kg	Complejo Acuífero Guadalupe	Acuíferos continuos de extensión regional conformados por rocas sedimentarias consolidadas de ambiente marino con porosidad primaria y secundaria. Generalmente son de tipo confinado, de alta a baja productividad.	**T**: 3 - 600 **K**: 0,02 – 2 **S**: $1*10^{-4}$ –$1*10^{-7}$ **CE**: 0.05 – 5	KgltFormación Areniscas Labor y Tierna Kgpl: Formación Plaeners Kgd: Formación Arenisca Dura Pgu: Formación Usme
Pg	Complejo Acuitardo del Paleógeno	Complejo regional de rocas consolidadas con composición predominantemente arcillosa de origen conti nental, en general con muy baja productividad.	**T**: <5 **K**: **S**: **CE**: <0.05	Pgr: Formación Areniscas de la Regadera Pgb: Formación Bogotá KPgg: Formación Guaduas
Kch	Unidad Confinante de la Formación Chipaque	Unidad de rocas marinas muy compactas y fracturadas con muy baja a ninguna productividad.	**T**: 5 **K**: **S**: **CE**: < 0. 05	Kch: Formación Chipaque

T: Transmisividad (m^2/dia) **S**: Coeficiente de Almacenamiento
CE: Capacidad especifica (l/s/m) **K**: Conductividad hidráulica (m/dia)

ANEXO No. 3:

UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS (CAR, 2006)

PLAN DE MANEJO DE LA RESERVA FORESTAL PROTECTORA DEL BOSQUE ORIENTAL DE BOGOTÁ


LEYENDA
UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS
CHIPAQUE
UBAQUE
CHOACHÍ
LA CALERA
BOGOTÁ D.C.
SOPÓ
CHIA
CONVENCIONES
UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS
PLAN DE MANEJO DE LA RESERVA FORESTAL PROTECTORA BOSQUE ORIENTAL DE BOGOTÁ
CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA

ANEXO No. 4:

INVENTARIO DE LA RED GEODÉSICA DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ – ESTACIONES IGAC

CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE INFLUENCIA DE LOS PUNTOS DE LAS ESTACIONES DE LA RED

REGISTRO FOTOGRÁFICO COMPLEMENTARIO DE LA INSPECCIÓN A LAS ESTACIONES DE LA RED GEODÉSICA

CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE INFLUENCIA DE LOS PUNTOS DE LA RED

Estación No. 1: Autopista Norte con Calle 188

La estación IGAC No. 1 se localiza en la Autopista Norte con Calle 201, en un área adyacente al Cementerio Jardines de Paz, ubicado en la localidad de Usaquén. La condición topográfica del área de influencia directa es plana.

Edificaciones existentes: En el costado oriental se encuentra el cementerio Jardines de Paz y una estructura de drenaje tipo canal trapezoidal revestido en concreto para la recolección de aguas lluvias. En el costado occidental se encuentra un área de lotes y el campus de Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito".

Vías existentes: En la zona de estudio se encuentran las siguientes vías principales: La Autopista Norte. Esta vía se compone de dos calzadas y dos carriles por sentido en pavimento flexible, y se encuentra en buen estado. No hay presencia de cunetas en la vía.

Vegetación: En el separador central de la Autopista Norte se aprecia abundante vegetación tipo árboles y arbustiva entre los 3 y 10 m de altura. En las instalaciones del cementerio Jardines de Paz se presenta vegetación de diferentes especies con alturas entre los 6 y 10 m.

Redes de Servicios Públicos: En la zona de estudio existen redes subterráneas (energía eléctrica y alcantarillado) y elevadas en sentido transversal a la Autopista Norte (Líneas de alta tensión y conducción de energía eléctrica).

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden a Servicios (Cementerio Jardines de Paz, Costado Oriental) y Educativa-Comercial (Costado Occidental).

Estación No. 2: Cerro de la Conejera

No se encontró.

Estación No. 3: Calle 145 con Carrera 115

Esta estación se localiza en el interior de un parque existente en la parte posterior de la Parroquia Madre del Redentor, ubicada en la Diagonal 146 No. 118 – 42, y perteneciente al Barrio Compartir (Localidad de Suba). La condición topográfica del área de influencia directa es plana.

Edificaciones existentes: En los alrededores del parque existente se encuentran algunas edificaciones entre 2 y 7 pisos, en donde predominan los conjuntos residenciales.

Vías existentes: En la zona de estudio se encuentra una vía de acceso vehicular en pavimento flexible y en buen estado.

Vegetación: En el área cercana al mojón predominan zonas verdes tipo pastos. En áreas más lejanas se aprecian árboles entre 6 m y 8 m de altura.

Redes de Servicios Públicos: En la zona de estudio existen redes elevadas de alumbrado público, energía eléctrica y telefonía.

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden a Residencial (conjuntos residenciales), Comercial y Recreación (zona de parques).

Estación No. 4: Parque Mirador de los Nevados

La estación IGAC No. 4 se localiza en el interior del Parque Mirador de los Nevados, ubicado en la Calle 147 con Carrera 90, y adjunto al Barrio Miraflores (Localidad de Suba). La condición topográfica del área de influencia directa es ligeramente inclinada a escarpada.

Edificaciones existentes: En la parte superior del parque se encuentran algunas edificaciones (viviendas y torres residenciales) entre 1 y 4 pisos. En la zona aledaña al parque se encuentra el centro de Suba, en donde se aprecian viviendas no mayores a 3 pisos y conjuntos residenciales con edificios entre 4 y 6 pisos.

Vías existentes: En el interior del parque se encuentra un sendero peatonal en adoquín y en buen estado. Las vías aledañas al parque se componen de pavimento flexible y se encuentran en buen estado.

Vegetación: En el interior del parque se aprecia una cobertura de aproximadamente un 70% de vegetación arbustiva y árboles de diferentes especies con alturas variables entre los 3 m y 6 m.

Redes de Servicios Públicos: En la zona de estudio existen redes de alumbrado público, y en la parte superior del parque se encuentra una red de energía eléctrica.

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden a Recreación (Parque Mirador de los Nevados) y residencial (Conjuntos residenciales).

Estación No. 5: Avenida Bolivia con Calle 88

No se encontró.

Estación No. 6: Avenida Boyacá con Calle 128

No se encontró.

Estación No. 7: Avenida 19 con Calle 137

La estación IGAC No. 7 se localiza en la Avenida Carrera 19 con Calle 137, en el interior de un parque ubicado en el Barrio El Chico (Localidad de Chapinero). La condición topográfica del área de influencia directa es plana.

Edificaciones existentes: En el costado oriental de la Avenida 19 se encuentran algunas viviendas entre 2 y 3 pisos. En el costado occidental se encuentran edificios entre 3 y 6 pisos. En la zona de estudio predominan los sistemas aporticados.

Vías existentes: En la zona de estudio se encuentran las siguientes vías principales: La Avenida 19. Esta vía se compone de dos calzadas y dos carriles por sentido en pavimento flexibles, y se encuentra en buen estado. Presencia de parqueaderos y ciclorutas en pavimento flexible.

Vegetación: En el costado occidental de la Avenida 19 se aprecian árboles con alturas variables entre los 3 m y 10 m aproximadamente, que hacen parte del parque existente. En el separador de la vía se presentan árboles con altura promedio de 3 m, pinos y eucaliptos.

Redes de Servicios Públicos: En la zona de estudio existen redes de alumbrado público, energía eléctrica, telefonía local, y gas.

Estación No. 8: Calle 124 con Avenida 116

Esta estación se encuentra en la Calle 24 con Avenida 116, en un terraplén existente en el interior del Parque Atahualpa, ubicado en el Barrio Versalles (Localidad de Fontibón). La condición topográfica del área de influencia directa es plana.

Edificaciones existentes: En el costado norte se encuentran las pistas del Aeropuerto El Dorado. En los demás costados, se encuentran algunas viviendas entre 2 y 3 pisos en mampostería convencional. En la parte central se encuentra una zona verde que hace parte del Parque Atahualpa.

Vías existentes: En la zona de estudio se encuentran las siguientes vías principales: La Avenida La Esperanza (Calle 24) y la Avenida 116. La Avenida La Esperanza se compone de pavimento flexible y se encuentra en buen estado. La Avenida 116 se compone de pavimento flexible y se encuentra en buen estado.

Vegetación: En los alrededores del Parque Atahualpa se encuentran árboles entre 4 y 5 m de altura. El resto de la zona de influencia directa corresponde a una zona plana provista de pastos.

Redes de Servicios Públicos: En la zona de estudio existen redes de alumbrado público, energía, teléfono y gas, las cuales se encuentran en buen estado.

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden a Residencial (viviendas entre 2 y 3 pisos) y Recreación (Parque Atahualpa).

Estación No. 9: Avenida Ciudad de Cali con Calle 26

Este punto se ubica en la intersección de la Avenida El Dorado con la Avenida Ciudad de Cali (Costado derecho), en la parte alta de una meseta conformada por la construcción del puente existente, ubicado en la localidad de Engativá.

Edificaciones existentes: En el costado oriental se encuentra el hipermercado Homecenter. En el costado occidental se encuentra el puente vehicular Av. Ciudad de Cali y un edificio de 3 pisos perteneciente a Industrias Carvajal. Además, se encuentra una zona de bodegas entre 2 y 3 pisos.

Vías existentes: En la zona de estudio se encuentran las siguientes vías principales: La Avenida El Dorado y la Avenida Ciudad de Cali. La Avenida El Dorado se compone de pavimento flexible y se encuentra en buen estado. Presencia de fallas tipo piel de cocodrilo de baja severidad. El carril central es rígido, debido a que en esta avenida se está construyendo actualmente las vías del sistema Transmilenio. La Avenida Ciudad de Cali se compone de pavimento flexible y se encuentra en regular estado. Mayor deterioro por fallas tipo piel de cocodrilo.

Vegetación: En los alrededores de la zona de estudio se presentan áreas de pastos, con pocos árboles entre 2 y 6 m de altura tipo arbustos. La pendiente es moderada por la existencia de una meseta conformada por la construcción del puente existente.

Redes de Servicios Públicos: En la zona de estudio solamente existen redes de alumbrado público.

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden a Comercial e Industrial (Bodegas, centro Homecenter e Industrias Carvajal).

En las siguientes fotografías se muestran detalles de sitios en donde se encuentran instaladas algunas de las estaciones que han reportado mayor asentamiento.





Fotografía 1. Detalles de la ubicación de la Estación No. 8 – Parque Atahualpa.





Fotografía 2 Ubicación de la Estación No. 9 – Av. Ciudad de Cali con Calle 26.

Estación No. 10: Autopista Norte con Calle 79 (Héroes)

La estación IGAC No. 10 se localiza en la intersección de la Calle 80 con Autopista Norte (Costado izquierdo), en el área del Monumento a Los Héroes (Sentido Norte – Costado Occidental), ubicado en la localidad de Chapinero. La condición topográfica del área de influencia directa es plana.

Edificaciones existentes: En el costado occidental se encuentran edificios entre 4 y 6 pisos, un puente peatonal en concreto reforzado, una estación de servicio y la estación de Transmilenio Los Héroes. En el costado oriental se encuentran algunas viviendas entre 2 y 3 pisos, con presencia de edificios entre 6 y 10 pisos.

Vías existentes: En la zona de estudio se encuentran las siguientes vías principales: La Autopista Norte. Esta vía se compone de dos carriles centrales en pavimento rígido (Carriles exclusivos de Transmilenio y dos carriles laterales en pavimento flexible. Se evidencian trabajos de reparación en las losas de los carriles de Transmilenio. Los daños existentes en estas vías se deben principalmente al paso de tráfico pesado.

Vegetación: En la zona adyacente a la estación de Transmilenio se presentan árboles entre 2 y 6 metros de altura, saúcos y algunas palmas. En el costado Norte-Occidental se aprecian árboles con una altura promedio de 10 m. No se evidencian deformaciones por vegetación.

Redes de Servicios Públicos: En la zona de estudio existen redes de alumbrado público, alcantarillado, transformadores de energía, las cuales se encuentran en buen estado.

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden a Comercial (Costado oriental) y Residencial (Costado occidental.

Estación No. 11: Calle 6D con Avenida Ciudad de Cali

De acuerdo a la información suministrada por el IGAC, la estación IGAC No. 11 se localiza en el parque de la Biblioteca El Tintal, ubicado en la Calle 6D con Avenida Ciudad de Cali (Localidad de Kennedy). La condición topográfica del área de influencia directa es plana. Durante la visita de inspección no se encontró el mojón correspondiente a dicha estación, por lo cual se realizara la caracterización de la zona de influencia directa indicada por el IGAC.

Edificaciones existentes: En los alrededores del parque El Tintal se aprecian urbanizaciones residenciales nuevas entre 4 y 10 pisos, y las instalaciones de la Biblioteca El Tintal.

Vías existentes: En la zona de estudio se encuentran las siguientes vías principales: La Avenida Ciudad de Cali y unas vías locales en ambos costados del parque. La Avenida Ciudad de Cali se compone de pavimento flexible y se encuentra en buen estado. Las vías locales se componen de pavimento flexible y se encuentran en regular estado, debido a la presencia de deformaciones en superficie.

Vegetación: En los alrededores de la zona de estudio se presentan áreas de pastos, con poca vegetación arbustiva.

Redes de Servicios Públicos: En la zona de estudio existen redes de alumbrado público y alcantarillado.

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden a Residencial (Viviendas Multifamiliares) y Educación (Biblioteca El Tintal).

Estación No. 12: Avenida Boyacá con Avenida Las Américas

El mojón correspondiente a la estación No. 12 de la Red Geodésica del IGAC se encuentra localizado sobre la meseta de la oreja noroccidental del puente que conecta la Avenida de las Américas con Avenida Boyacá.

Edificaciones existentes: En el costado noroccidental de la Avenida Las Américas se encuentra un conjunto de viviendas de dos pisos y urbanizaciones residenciales con edificios de 5 pisos construidos en sistema industrializado. En el costado sur-occidental de la Avenida de las Américas se encuentran edificios residenciales de 6 pisos de altura construidos en mampostería estructural. En el costado sur-oriental de la Avenida de las Américas se encuentra la clínica de occidente y algunas urbanizaciones residenciales con edificios de 8 pisos, construidos en mampostería estructural. En el costado nororiental de la Avenida de las Américas se encuentra la planta de la Cervecera Bavaria y edificaciones entre 3 y 6 pisos.

Vías existentes: En la zona de estudio se encuentran, la Avenida de las Américas constituida por 2 carriles para el Sistema Transmilenio y 5 carriles en los extremos, construidos en pavimento flexible; y la Avenida Boyacá se encuentra construida igualmente en pavimento flexible con 2 calzadas centrales de 2 carriles cada una y 2 calzadas paralelas de 3 carriles cada una. En general las vías de la zona se encuentran en buen estado. Se hallan en la zona varios senderos peatonales en concreto que conectan con el puente peatonal que se encuentra a lo largo del puente vehicular que cruza la avenida de las Américas sobre la Avenida Boyacá.

Vegetación: Sobre la Avenida Boyacá se encuentran árboles con alturas promedio entre 2 y 6 metros, sobre la avenida de las Américas se encuentran algunos árboles aislados con alturas entre 3 y 5 metros.

Redes de Servicios Públicos: En la zona de estudio existen redes de alumbrado público, alcantarillado, red de transmisión de energía eléctrica de alta tensión que viene sobre la Avenida de las Américas y que continúa sobre la Avenida Boyacá,

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden a Residencial (Viviendas Multifamiliares), industrial (Planta Bavaria S.A.), Hospitalaria (Clínica de Occidente) y Comercial.

Estación No. 13: Calle 2 con Carrera 44

La estación No. 13 de la Red Geodésica del IGAC se encuentra localizada en el Parque Zonal El Jazmín, ubicado en la Avenida Carrera 46 con Calle 1B, Costado Nororiental. Localidad de Puente Aranda – Barrio Montes. El mojón se localiza sobre un terraplén ubicado en la zona aledaña a la pista de patinaje del parque. La topografía en la zona de estudio es plana.

Edificaciones existentes: En las zonas aledañas al parque se encuentran viviendas entre 2 y 3 pisos de altura (costado sur-oriental), en el costado norte se encuentra la Institución Educativa Distrital El Jazmín (Calle 1H No. 40D-13). Dentro del parque se encuentra un coliseo construido en sistema aporticado de 3 niveles. Como construcciones adicionales este parque cuenta con una pista de patinaje en buen estado y en funcionamiento.

Vías existentes: Dentro del parque se encuentran senderos peatonales en adoquín, en buen estado. Las vías aledañas al parque se encuentran en pavimento flexible y presentan daños producto del tráfico y del mantenimiento precario que se evidencia.

Vegetación: Dentro del parque se encuentran árboles con alturas entre los 3 y 8 metros, algunas especies son: eucaliptos, pinos, saúcos y acacias, también se hallan algunos arbustos pequeños. Las zonas verdes del parque se encuentran en pastos.

Redes de Servicios Públicos: En la zona de estudio existen redes de alumbrado público, alcantarillado y energía eléctrica de baja tensión.

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden a Residencial (Viviendas Unifamiliares), educativa (Institución Educativa Distrital El Jazmín), recreativa y deportiva (Parque El Jazmín).

Estación No. 14: Calle 40 Sur con Av. Boyacá (Parque Timiza)

Esta estación se encuentra ubicada en el Parque Timiza localizado entre la Carrera 72 y Transversal 72 V Bis con Calle 43 y 45 Sur, en la Localidad de Kennedy – Barrio Timiza. El mojón se encuentra ubicado en la parte superior del terraplén localizado en el costado norte del estadio.

Edificaciones existentes: Dentro del parque se encuentra la zona de administración, los módulos de comidas y baños públicos, edificaciones de una planta construidas en mampostería. En las zonas aledañas al parque se encuentran urbanizaciones residenciales con edificios entre 5 y 12 pisos, relativamente nuevas y algunas en proceso de construcción.

Vías existentes: Dentro del parque se encuentran senderos peatonales en adoquín en general se encuentran en buen estado. En las zonas aledañas al parque se encuentran vías construidas en pavimento flexible con afectación producto del tráfico y el mantenimiento precario que se evidencia.

Vegetación: El parque Timiza se encuentra bañado por el canal Alquería – La Fragua que se convierte en el lago interior de más de 4 hectáreas, en su alrededor se encuentran abundantes eucaliptos con alturas promedio entre 15 y 20 metros, otras especies de árboles que se encuentran en el parque son pinos y urapanes con alturas promedio entre 6 y 8 metros. En el resto del parque se hallan zonas verdes en pasto con algunos arbustos pequeños entre 1 y 2 metros de altura.

Redes de Servicios Públicos: En la zona de estudio existen redes de alumbrado público y alcantarillado.

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden a Residencial (Viviendas Multifamiliares), recreativa y deportiva (Parque Timiza).

Estación No. 15: Carrera 87C con Calle 78 Sur

La estación No. 15 de la Red Geodésica del IGAC se encuentra ubicada en el Parque El Río San José de Maryland (Carrera 99 A # 74 A – 09), dicho parque se encuentra localizado en el costado occidental del Colegio Distrital "Alfonso Reyes Echandía" (Dirección Carrera 85 con calle 74 sur), en la localidad de Bosa.

El mojón se encuentra en el costado sur-occidental del parque en la parte posterior del coliseo, en uno de los diques del río Tunjuelo que bordea el parque en los costados sur y occidente. Nota: Este parque no se encuentra abierto al público.

Edificaciones existentes: Dentro del parque se encuentra un coliseo en sistema aporticado de 3 niveles, en general en buen estado. Fuera del parque, en el costado nororiental se encuentra ubicado el Colegio Distrital "Alfonso Reyes Echandía", cuya estructura se encuentra construida con un sistema aporticado y es evidente que es una construcción reciente. En el costado noroccidental del parque se encuentran edificaciones entre 2 y 3 pisos contiguos al río Tunjuelo, se evidencian sistemas de mampostería no confinada y procesos de autoconstrucción.

Vías existentes: Dentro del parque se encuentran senderos peatonales en buen estado. Las vías de acceso al parque y en general las de la zona se encuentran sin pavimentar y en mal estado, ya que no cuentan con desagües y es evidente la afectación por la temporada de lluvias.

Vegetación: Dentro del parque se encuentran arbustos entre 2 y 3 metros de altura, fuera del parque en el costado nororiental hay presencia abundante de eucaliptos con alturas promedio entre 10 y 12 metros.

Redes de Servicios Públicos: El parque no cuenta con los servicios de agua potable y alcantarillado, se evidencia en la zona solamente una red de energía eléctrica de baja tensión.

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden a Residencial, deportiva (Parque El Río San José Maryland) y educativa (Colegio Distrital "Alfonso Reyes Echandía").

Estación No. 16: Avenida Calle 11 Sur Con Carrera 2

Este punto de la Red Geodésica del IGAC se encuentra ubicado en el Parque Metropolitano San Cristóbal localizado Entre Calle 12 y 13 Sur con Carrera 3 y 4 Este (dirección entrada principal, Calle 13 Sur No. 2A-50 Este), en la localidad de San Cristóbal –Barrio San Cristóbal Sur. El mojón de referencia para dicha estación se halla localizado en una zona aparentemente estable en el costado oriental del parque. En el área de estudio la topografía es ondulada.

Edificaciones existentes: Dentro del parque se encuentra una zona de administración compuesta por edificaciones de 1 piso en sistema prefabricado, así como la caseta de la portería principal de acceso al parque y baños públicos. En los costados norte y oriental del parque se encuentran edificaciones entre 2 y 4 pisos, en los costados sur y occidental se encuentran zonas residenciales con edificios entre 6 y 8 pisos en mampostería estructural.

Vías existentes: Dentro del parque se encuentran senderos peatonales en adoquín y en algunas zonas se evidencia afectación por la vegetación. También se encuentra una zona de parqueaderos con acabado en asfalto.

Vegetación: Dentro del parque hay presencia abundante de árboles con alturas entre 4 y 12 metros, algunas especies son: eucaliptos, pinos, sauces, acacias, urapanes y algunas especies menores, las zonas verdes se encuentran en pastos.

Redes de Servicios Públicos: En la zona de estudio existen redes de alumbrado público, alcantarillado y en el exterior del parque una red de energía eléctrica de baja tensión. Dentro del parque en sentido sur-norte cruza un canal trapezoidal de conducción de aguas lluvias revestido en concreto.

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden a Residencial (Viviendas Multifamiliares), recreativa y deportiva (Parque San Cristóbal).

Estación No. 17: Carrera 24 con Calle 51 Sur

La estación No. 17 del IGAC se encuentra ubicada en el Parque Metropolitano El Tunal (Ubicado entre la Calle 48B sur y la avenida Boyacá, y entre la avenida Mariscal Sucre y la avenida Villavicencio, en la localidad de Tunjuelito), el mojón se localiza sobre un terraplén armado en tierra en el costado occidental de la Biblioteca El Tunal, dentro de la zona de influencia la topografía es plana.

Edificaciones existentes: Dentro del parque se encuentra la biblioteca El Tunal de 3 niveles, 2 baterías de baños y un coliseo de 3 niveles construido en sistema pórtico. En las zonas aledañas al parque se encuentran urbanizaciones residenciales entre 6 y 8 pisos, así como viviendas entre 2 y 3 pisos.

Vías existentes: Dentro del parque se encuentran senderos peatonales adoquinados y una vía interna de dos carriles en pavimento flexible, la cual presenta desgaste en forma de piel de cocodrilo, el adoquinado se encuentra en general en buen estado. En general las vías principales de la zona como la Avenida Boyacá y la Calle 48B sur se encuentran en pavimento flexible, la calle 48B sur se encuentra en buen estado y la avenida Boyacá en algunas zonas se encuentra en mantenimiento, las demás vías menores de la zona se encuentran construidas en pavimento flexible y en algunas partes se evidencian afectaciones producto del tránsito.

Vegetación: Dentro del parque se encuentran árboles recién plantados en las zonas aledañas al mojón, con una altura promedio de 1 metro, en las zonas perimetrales y en la parte sur-occidental del parque hay abundantes árboles con alturas promedio entre 8 y 10 metros. Algunas especies predominantes son: pinos, eucaliptos, urapanes y acacias. En gran parte del parque hay zonas verdes en pastos, así como en el área de estudio.

Redes de Servicios Públicos: En la zona existe una red de alumbrado público.

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden a Residencial (Viviendas Multifamiliares), Educación (Biblioteca El Tunal), Recreación, Deportiva y cultural.

Estación No. 18: Avenida Boyacá con Calle 71 Sur

Esta Estación se encuentra localizada dentro de las instalaciones del Cementerio Parque Serafín (Avenida Calle 51 Sur – Km. 7 vía al llano) en la Localidad de Ciudad Bolívar, Barrio Central de Mezclas. En la zona de estudio la topografía es montañosa. En la zona oriental en la parte baja del cementerio se encuentra el lecho del río Tunjuelo sin ningún tipo de revestimiento, en el talud adyacente no se presenta erosión y se encuentra con cobertura vegetal.

Edificaciones existentes: El Cementerio Parque Serafín está compuesto por 2 mausoleos constituidos por una estructura aporticada de 2 niveles. En la zona de administración se encuentran edificaciones de 1 y 2 niveles construidos en mampostería. También se encuentra dentro del cementerio un tranque de almacenamiento de agua potable construido en concreto. En la parte norte del Cementerio Parque Serafín se encuentra ubicada la planta de concreto de la empresa CEMEX.

Vías existentes: Dentro del Cementerio Parque Serafín se encuentra una vía perimetral de acceso en pavimento flexible así como dos niveles de parqueaderos con acabado en asfalto, también se encuentran senderos peatonales en concreto. En general las estructuras antes mencionadas se encuentran en buen estado. En el costado occidental del Cementerio se encuentra ubicada la Avenida Boyacá constituida por pavimento flexible y en el momento de la visita se encontraba en reparación.

Vegetación: Dentro del cementerio se encuentran arbusto pequeños de alturas promedio entre 1 y 2 metros. En el costado norte y oriente del cementerio se encuentran abundantes eucaliptos con alturas aproximadas entre 15 y 20 metros.

Redes de Servicios Públicos: Dentro del cementerio se encuentra el servicio de alumbrado público y alcantarillado, paralelo a la avenida Boyacá se encuentra una red de transmisión de energía eléctrica de alta tensión.

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden a Industrial (Planta de Concreto CEMEX) y área de cementerio.

Estación No. 19: Transversal 50 con Calle 78 Sur

La estación No. 19 de la Red Geodésica del IGAC se encuentra ubicada en la Base Militar - Sierra Morena, donde a su vez también está localizado el tanque de almacenamiento de agua potable de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB Sierra Morena III sector, en la Localidad de Ciudad Bolívar. El mojón se encuentra localizado en la parte superior del tanque de almacenamiento aproximadamente de 7.20 metros de altura. La topografía en la zona de estudio es montañosa.

Edificaciones existentes: Dentro de la Base Militar se encuentran varias edificaciones de un piso distribuidas en zona administrativa y de dormitorio, allí también se encuentran las estructuras de 3 antenas de telecomunicaciones y en la parte sur-oriental de la Base Militar se encuentra la Institución Educativa Distrital Sierra Morena III sector construida con un sistema aporticado de dos niveles.

Dentro de la Base Militar también se encuentra el tanque de almacenamiento de agua potable Sierra Morena III Sector construido en concreto con una capacidad de 10.200 m^3 y una altura de 7.20 m. Las edificaciones aledañas a la zona de estudio son entre 1 y 2 pisos en sistemas de mampostería generalmente no confinada, además se evidencian procesos de autoconstrucción. Algunas edificaciones presentes en la zona son viviendas no formales con limitaciones en el acceso a los servicios públicos básicos.

Vías existentes: La vía principal de acceso a la localidad de Ciudad Bolívar se encuentra en algunas zonas construida en 4 carriles en pavimento rígido, en la zona aledaña al sector de Sierra Morena se encuentra en 2 carriles igualmente en pavimento rígido. La vía secundaria de acceso a la Base Militar Sierra Morena se encuentra sin pavimentar.

Vegetación: En la zona no hay presencia de árboles de gran altura, en algunas zonas no pobladas se evidencia cobertura vegetal en cocuyo y arbustos aislados.

Redes de Servicios Públicos: Se evidencian en la zona antenas de comunicación, alcantarillado, acueducto y red de energía eléctrica de baja tensión.

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden a Residencial, Educativa (Institución Educativa Distrital Sierra Morena III Sector), prestación de servicios públicos (tanque de almacenamiento) y Fuerzas Militares (Base Militar Sierra Morena).

Estación No. 20: Calle 90 Sur con Avenida Boyacá

Esta estación se encuentra ubicada en el Barrio Chuniza – Localidad de Usme, en la parte superior de una meseta aparentemente en suelo natural, donde además se presentan algunos afloramientos de areniscas. Contigua a las siguientes instituciones: en el costado sur-oriental se localiza el Centro Educativo Distrital Bosco No. 4 (Calle 91 Sur No. 4-22 Este), en el costado sur se encuentra el Centro de Desarrollo Comunitario “Julio Cesar Sánchez” (Av. Calle 91 Sur No. 3C-34 Este) y en el costado occidental se encuentra el Centro de Atención Inmediata (CAI) Yomasa.

Edificaciones existentes: En la zona aledaña al mojón se encuentran las edificaciones del Centro Educativo Distrital Bosco 4 y el Centro de Desarrollo Comunitario "Julio Cesar Sánchez", construidas en mampostería en 2 niveles. En el costado occidental de la zona de estudio se encuentran viviendas entre 2 y 3 pisos, con sistema predominante en mampostería confinada, aunque en algunos casos se detectan autoconstrucción con mampostería no reforzada.

Vías existentes: En la zona se hallan las siguientes vías principales, Calle 91 Sur construida en pavimento rígido, se encuentra en regular estado y presenta deformaciones por el trafico ya que es la única vía de acceso a la zona, también se encuentra la transversal 2B Este en pavimento rígido y presenta ondulaciones en las zonas aledañas a la red de alcantarillado público.
Además de la red vial, se encuentran senderos peatonales que incluyen un puente colgante y en general se encuentra en buen estado, sin evidencias aparentes.

Vegetación: En el área de estudio se encuentran zonas verdes en pasto y algunos árboles aislados con alturas promedio de 5 metros.

Redes de Servicios Públicos: En esta zona de estudio existe una red de conducción de energía eléctrica de alta tensión, una red de energía eléctrica de baja tensión, sistema de alcantarillado, alumbrado público y en la zona baja hacia el costado oriental de la meseta en donde se encuentra el mojón existe un canal rectangular de conducción de aguas lluvias.

Actividad Económica: Los usos del suelo en la zona de estudio corresponden en esencia a tipo Residencial (Viviendas Unifamiliares), Educación (Centro Educativo Distrital Bosco No. 4), recreación, deportiva y cultural (Centro de Desarrollo Comunitario "Julio Cesar Sánchez").

Estación No. 21: Edificio IGAC

No visitado.

Estación No. 22: Limite IGAC con INGEOMINAS

No visitado.

REGISTRO FOTOGRÁFICO COMPLEMENTARIO DE LA INSPECCIÓN

Estación No. 15 IGAC









Ubicación Mojón





Lecho del Río Tunjuelo en la zona de estudio

Estación No. 19 IGAC







Ubicación Mojón







Tanque de Almacenamiento EAAB Sierra Morena III Sector

ANEXO No. 5:

INFORME DE LA VISITA DE INSPECCIÓN A LA ZONA CRÍTICA DE MAYOR SUBSIDENCIA

SECTOR DE LA LOCALIDAD DE "PUENTE ARANDA" (BOGOTÁ)

INFORME VISITA DE CAMPO

Lugar: Localidad de Puente Aranda. Fecha de realización: Abril 18 de 2010
Inspección realizada por: Ing. Mauricio Bernal López, Ing. Leonardo Rojas Rojas

Introducción

A continuación se presenta el informe de la visita de campo realizada a la localidad de Puente Aranda, como apoyo a la definición del área de estudio para los trabajos de tesis denominados: "Estudio de las deformaciones del suelo por cambios de niveles piezométricos y su influencia en el fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá y Estudio de las deformaciones del superficiales por cambios de succión y su influencia en los fenómenos de Subsidencia en la Ciudad de Bogotá". El recorrido se inicia en esta zona, ya que de acuerdo con los resultados del estudio de subsidencia realizado por la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias (DPAE) es aquí donde se han presentado las mayores tazas de subsidencia en la ciudad de Bogotá.

Inspección de campo Realizada

El recorrido fue realizado de la siguiente manera:

- Se realizo 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 se continuó por la Avenida Carrera 68 hasta la Calle 26 en sentido sur-norte y finalmente en sentido occidente-oriente se continuó 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.

Durante el recorrido 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.

Recorrido y evidencias presentadas

1. Centro Urbano Antonio Nariño

Ubicación	Sobre la Avenida Las Américas entre Carreras 30 y 36
Tipo de Construcciones	Edificios entre 3 y 8 pisos
Vegetación	Árboles de altura aproximada de 10 y 12 m (Fotografías 3 y 4)
Observaciones	En la esquina de la Calle 23 con carrera 36 se encuentra el edificio "Centro Urbano Antonio Nariño", declarado Monumento Nacional.
Evidencias	Sobre la Cra 36 se observa cabeceo de uno de los edificios del Centro Urbano Antonio Nariño, en sentido oriental (Fotografías 1 y 2) No se observan daños en las vías aledañas, ni evidencias notorias en las construcciones vecinas. En la parte occidental de la carrera 36 se encuentran viviendas de aproximadamente 2 y 3 pisos.



Fotografía 1



Fotografía 2

Edificio Centro Urbano Antonio Nariño sobre Carrera 36



Fotografía 3



Fotografía 4

Presencia de vegetación en el Centro Urbano Antonio Nariño

Ubicación	Por Carrera 37 (Av. Esperanza) con Calle 24
Tipo de Construcciones	Edificios entre 3 y 8 pisos
Vegetación	Árboles de altura aproximada de 10 y 12 m
Observaciones	Se encuentra el edificio “Centro Urbano Antonio Nariño” al costado oriental y al occidental construcciones entre 2 y 3 pisos, además, se localiza en esta zona el edificio de la empresa de acueducto y alcantarillado (EAAB) y el Centro Internacional de Negocios y Exposiciones – CORFERIAS
Evidencias	Se presentan agrietamientos en una de las construcciones y asentamientos diferenciales en algunos de los edificios del Centro Urbano Antonio Nariño (ver Fotografías 5 y 6).



Fotografía 5



Fotografía 6

Edificio Centro Urbano Antonio Nariño sobre Carrera 37

Ubicación	Por Avenida calle 25 con Carrera 37 (Av. Esperanza)
Tipo de Construcciones	Edificios entre 3 y 8 pisos
Vegetación	Árboles de altura aproximada de 10 y 12 m
Observaciones	Se encuentra el edificio “Centro Urbano Antonio Nariño” al costado sur y al costado norte construcciones entre 3 y 4 pisos.
Evidencias	Se presentan asentamientos diferenciales en los edificios del "Centro Urbano Antonio Nariño ubicados" y cabeceo hacia el costado occidental (Fotografías 7 y 8), además de agrietamientos en la estación eléctrica del mismo (Fotografías 9 y 10).



Fotografía 7



Fotografía 8



Fotografía 9



Fotografía 10

Estación eléctrica Edificio Centro Urbano Antonio Nariño sobre Calle 25

2. Recorrido por Avenida de Las Américas (Calle 20) entre Carrera 36 y 50

Ubicación	Por Avenida de Las Américas (Calle 20) entre Carrera 36 y 50
Tipo de Construcciones	Edificaciones entre 2 y 3 pisos, zona comercial y residencial
Vegetación	Presencia de árboles sobre las vía con alturas entre 10 y 12 m aproximadamente
Evidencias	El pavimento de la zona es flexible, no se evidencian daños en las vías por efecto de árboles o por asentamientos.



Fotografía 11



Fotografía 12

Avenida Las Américas , presencia de árboles en las vías



Fotografía 13



Fotografía 14

Construcciones ubicadas sobre La Avenida de Las Américas entre Carrera 36 y 50

3. Recorrido por Avenida de Las Américas (Calle 20) entre Carrera 50 y Avenida 68

Ubicación	Av. Las Américas (Calle 20) entre Carrera 50 y Av. Carrera 68
Tipo de Construcciones	Edificaciones entre 2 y 3 pisos, zona comercial y residencial
Vegetación	Presencia de árboles entre 4 y 5 metros de altura
Evidencias	El pavimento de la zona es flexible, no se evidencian daños en las vías por efecto de árboles o por asentamientos.



Fotografía 15



Fotografía 16

Avenida de Las Américas , vías y tipo de construcción

4. Recorrido por Avenida Carrera 68 entre Avenida de las Américas y Calle 13

Ubicación	Por Av. Carrera 68 entre Avenida Las Américas y Calle 13
Tipo de Construcciones	Edificaciones entre 2 y 5 pisos, predominan viviendas entre 2 y 3 pisos, es una zona residencial y de actividades y comerciales
Vegetación	Presencia de árboles en vías con una altura entre 4 y 6 metros
Evidencias	El pavimento de la zona es flexible, no se evidencian daños en las vías por efecto de árboles o por asentamientos.

5. Recorrido por Avenida Carrera 68 entre Calle 13 y Calle 26

Ubicación	Por Avenida Carrera 68 entre Calle 13 y Calle 26
Tipo de Construcciones	Edificaciones entre 2 y 5 pisos de altura, con predominio en esta zona de las actividades comerciales. Entre la Avenida La Esperanza y la Calle 26 (Av. El Dorado) presencia de edificios de aproximadamente 10 pisos.
Vegetación	Presencia de árboles en vías con una altura entre 4 y 6 metros
Evidencias	El pavimento de la zona es flexible, no se evidencian daños en las vías por efecto de árboles o por asentamientos. Se presenta cabeceo hacia el costado oriental en el edificio ubicado en la Av. 68 No. 14-80.



Fotografía 17



Fotografía 18

Edificio que presenta cabeceo hacia el costado oriental



Fotografía 19



Fotografía 20

Presencia de edificios y vegetación en la zona

6. Recorrido por Calle 26 desde Avenida Carrera 68 hasta Carrera 45

Ubicación	Por Calle 26 entre Avenida Carrera 68 hasta Carrera 45
Tipo de Construcciones	Edificios recientes y en construcción con 10 pisos de altura aproximadamente, predomina en la zona la actividad residencial, aunque se encuentran en esta zona edificios de oficinas de las más importantes empresas del país.
Vegetación	Presencia de árboles en vías con una altura entre 4 y 10 metros
Evidencias	El pavimento de la zona es flexible, no se evidencian daños en las vías por efecto de árboles o por asentamientos. En esta zona se encuentran las obras para la adecuación del sistema Transmilenio, además, se observa la construcción de varios edificios. En esta zona se encuentra ubicada la Gobernación de Cundinamarca y la Embajada de Estados Unidos en Colombia.



Fotografía 21



Fotografía 22

Presencia de construcciones modernas y recientes en la zona

7. Recorrido por Calle 26 desde la Carrera 45 hasta Carrera 43

Ubicación	Por Calle 26 desde Carrera 45 hasta Carrera 43
Tipo de Construcciones	Edificaciones entre 3 y 8 pisos, es una zona residencial
Vegetación	Presencia de árboles en vías con una altura entre 4 y 6 metros
Evidencias	El pavimento de la zona es flexible, no se evidencian daños en las vías por efecto de árboles o asentamientos. Existen obras de construcción para la adecuación del sistema Transmilenio.



Fotografía 23



Fotografía 24

Tipo de construcciones y obras de adecuación sistema Transmilenio

8. Recorrido por Calle 26 desde la Carrera 43 hasta Carrera 30

Ubicación	Por Calle 26 desde Carrera 43 hasta Carrera 30
Tipo de Construcciones	Edificios entre 5 y 20 pisos, zona de actividad residencial
Vegetación	Presencia de árboles en vías con una altura entre 4 y 6 metros
Evidencias	El pavimento de la zona es flexible, no se evidencian daños en las vías por efecto de árboles o asentamientos. Existen obras de construcción para la adecuación del sistema Transmilenio. Se observan edificios antiguos y construcciones recientes, en algunos casos se presentan asentamientos diferenciales.



Fotografía 25



Fotografía 26

Edificio donde se evidencian asentamientos diferenciales

Las descripciones realizadas desde el ítem 1 al 8, incluyen el recorrido perimetral por la zona seleccionada con el fin de observar las evidencias que pueda generar el fenómeno de subsidencia, como son: asentamientos en construcciones, daños en vías, daños en redes, etc.

Se seleccionó esta zona ya que según los resultados presentados por el Estudio de Subsidencia realizado por la DPAE utilizando la técnica de Interferometría Diferencial, es allí donde se presentan las mayores tazas de subsidencia, con deformaciones aproximadamente de 7,5 cm/año.

A continuación se presenta el recorrido realizado por algunas de las vías principales de la Localidad de Puente Aranda, donde se pueden presentar evidencias del fenómeno de subsidencia:

9. Recorrido por Avenida La Esperanza desde Carrera 42B hasta Carrera 50

Ubicación	Por Avenida La Esperanza entre Carrera 42B y Carrera 50
Tipo de Construcciones	Edificaciones entre 2 y 8 pisos de altura, predominan las viviendas entre 2 y 3 pisos, zona residencial
Vegetación	Presencia de árboles en vías y parques con alturas aproximadamente entre 5 y 100 metros.
Evidencias	El pavimento de la zona es flexible, no se evidencian daños en las vías por efecto de árboles o por asentamientos. En esta zona se observan algunos edificios antiguos y construcciones recientes.



Fotografía 27



Fotografía 28

Avenida La Esperanza, tipo de vías, presencia de vegetación y edificaciones tipo

10. Por Avenida de La Esperanza entre Carrera 50 y Avenida Carrera 68

Ubicación	Por Avenida La Esperanza entre Carrera 50 y Avenida Carrera 68
Tipo de Construcciones	Edificaciones de aproximadamente 10 pisos de altura, es una zona residencial. Se encuentran en esta zona la sede de La Fiscalía General de la Nación y la Gobernación de Cundinamarca Finalizando el recorrido sobre la Avenida de La esperanza con Carrera 68 se encuentra el Edificio de la Clínica Colombia de Colsanitas.
Vegetación	Presencia de árboles en vías y pequeñas zonas despobladas entre 4 y 6 metros de altura
Evidencias	El pavimento de la zona es flexible, no se evidencian daños en las vías por efecto de árboles o por asentamientos En esta zona se observan algunos edificios antiguos, construcciones recientes y en proceso de construcción Se observan asentamientos diferenciales en el edificio ubicado en la Av. La Esperanza con Carrera 64 (Fotografía 29 y 30)



Fotografía 29



Fotografía 30

Avenida La Esperanza, tipo de vías, presencia de vegetación y edificaciones tipo



Fotografía 31



Fotografía 32

Edificio con presencia de asentamientos diferenciales

11. Recorrido por Calle 17 entre Avenida Carrera 68 Carrera 60

Ubicación	Por Calle 17 entre Avenida Carrera 68 y Carrera 60
Tipo de Construcciones	Bodegas de aproximadamente 2 niveles, zona industrial con algunas viviendas entre 2 y 3 pisos de altura En esta zona se encuentra ubicada la Cárcel Nacional Modelo
Vegetación	Presencia de árboles en vías y pequeñas zonas despobladas entre 2 y 4 metros de altura
Evidencias	El pavimento de la zona es flexible, no se evidencian daños en las vías por efecto de árboles o por asentamientos Las construcciones ubicadas en esta zona tienen aproximadamente 20 a 30 años de construidas

12. Recorrido por Calle 17 entre Carrera 60 y Carrera 50

Ubicación	Por Calle 17 entre Carrera 60 y Carrera 50
Tipo de Construcciones	Viviendas entre 2 y 3 pisos de altura
Vegetación	Presencia de árboles en parques entre 6 y 10 metros de altura aproximadamente
Evidencias	El pavimento de la zona es flexible, no se evidencian daños en las vías por efecto de árboles o por asentamientos Se presentan algunas zonas despobladas

13. Recorrido por Carrera 50 desde Calle 17 hasta calle 21

Ubicación	Por Carrera 50 entre Calle 17 y Calle 21
Tipo de Construcciones	Se encuentran en esta zona varias estaciones de servicio y el batallón del Policía Militar y hay unas pequeñas zonas despobladas

Vegetación	Presencia de árboles en vías con alturas entre los 2 y 8 metros aproximadamente
Evidencias	El pavimento de la zona es flexible, no se evidencian daños en las vías por efecto de árboles o por asentamientos



Fotografía 33

Carrera 50: árboles en vías, tipo de pavimentos y construcciones ubicadas en la zona

14. Recorrido realizado por el Barrio Salitre

Ubicación	Calle 22B No. 59-81
Tipo de Construcciones	Zona residencial con edificios entre 10 y 12 pisos de altura
Vegetación	Presencia de árboles en vías entre 10 y 15 metros de altura
Evidencias	Se evidencia fisuras y hundimientos tanto en el pavimento flexible como en la ciclo ruta (fotografías 34 y 35) Se pueden apreciar asentamientos diferenciales en los edificios de la zona (fotografías 36 y 37)





Fotografía 34 Fotografía 35

Presencia de vegetación y evidencias presentadas en el pavimento y ciclo ruta



Fotografía 36



Fotografía 37

Edificaciones tipo de la zona

ANEXO No. 6:

PERFILES GEOLÓGICOS PARA ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS DE LA SUBSIDENCIA EN BOGOTÁ

PERFIL LONGITUDINAL L 1-1' – AUTOPISTA NORTE – AV. CARACAS

PERFIL LONGITUDINAL L 2-2' – SUBA – OLAYA

PERFIL TRANSVERSAL T 1-1' – CALLE 170

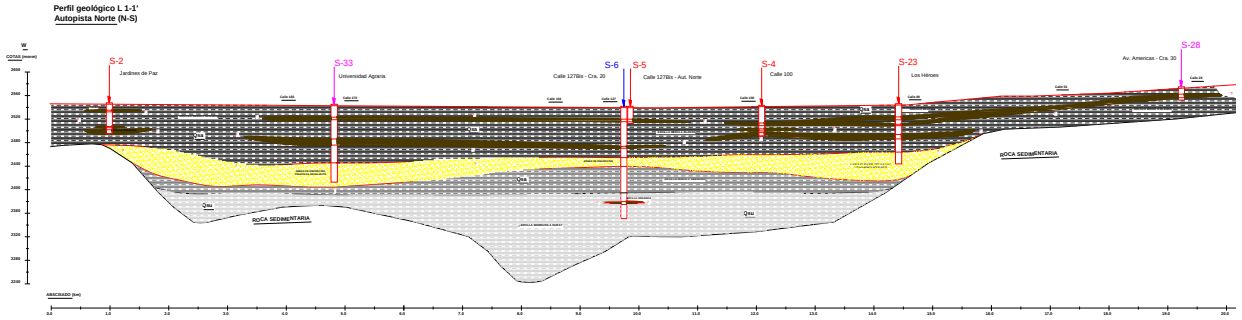
PERFIL TRANSVERSAL T 2-2' – CALLE 127

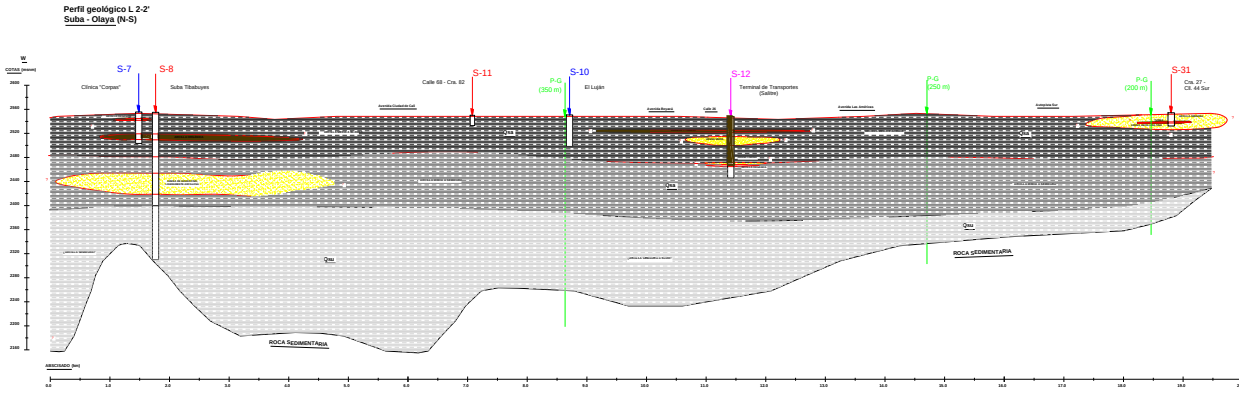
PERFIL TRANSVERSAL T 3-3' – AEROPUERTO – HÉROES

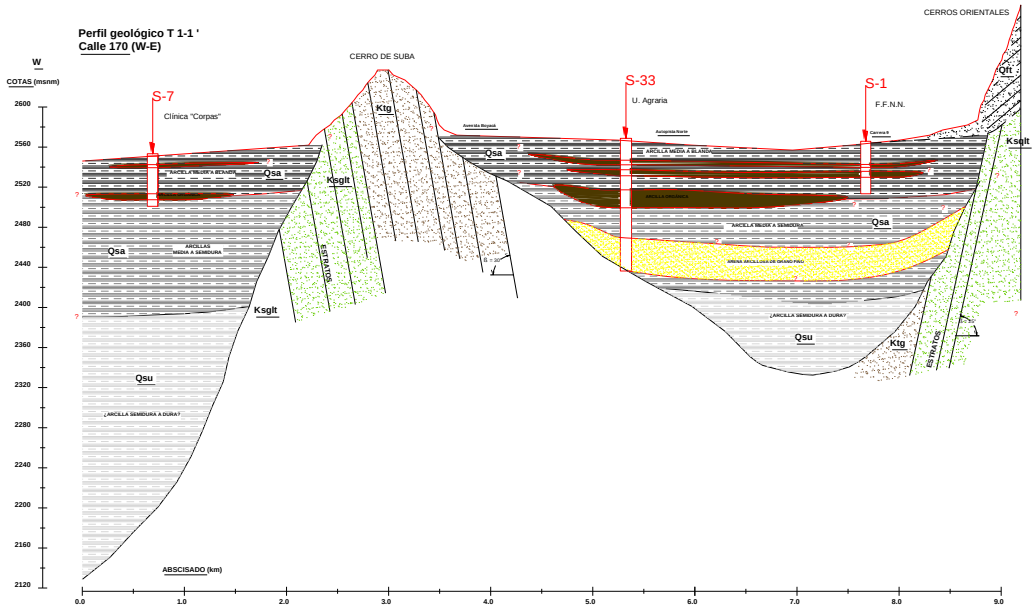
PERFIL TRANSVERSAL T 4-4' – BOSA – CALLE45

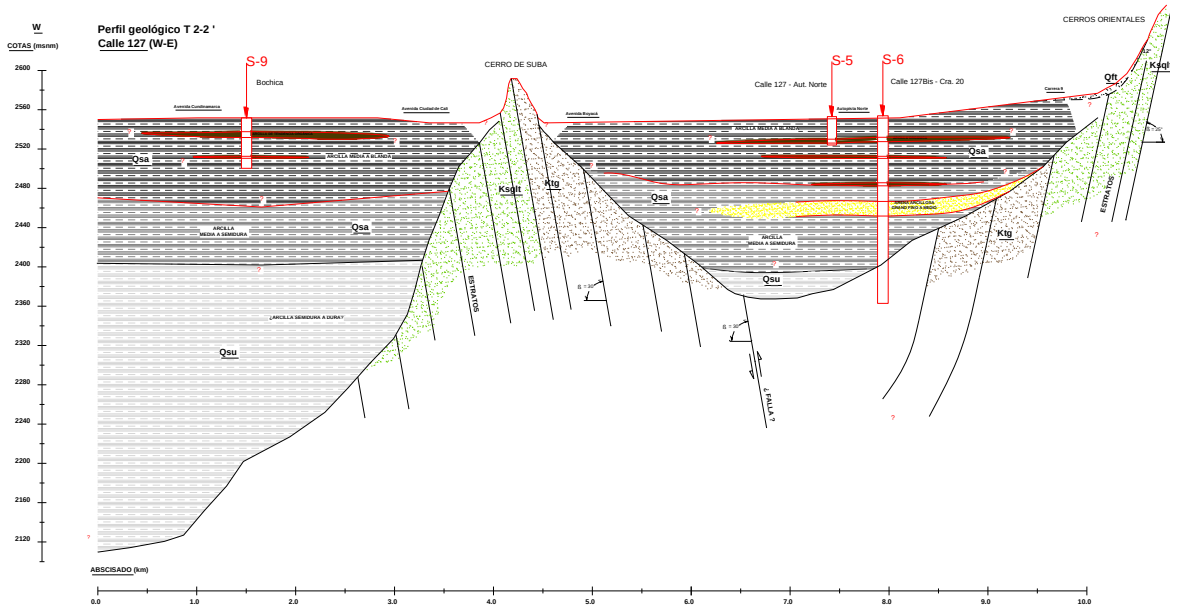
PERFIL TRANSVERSAL T 5-5' – CALLE 26 (Av. EL DORADO)

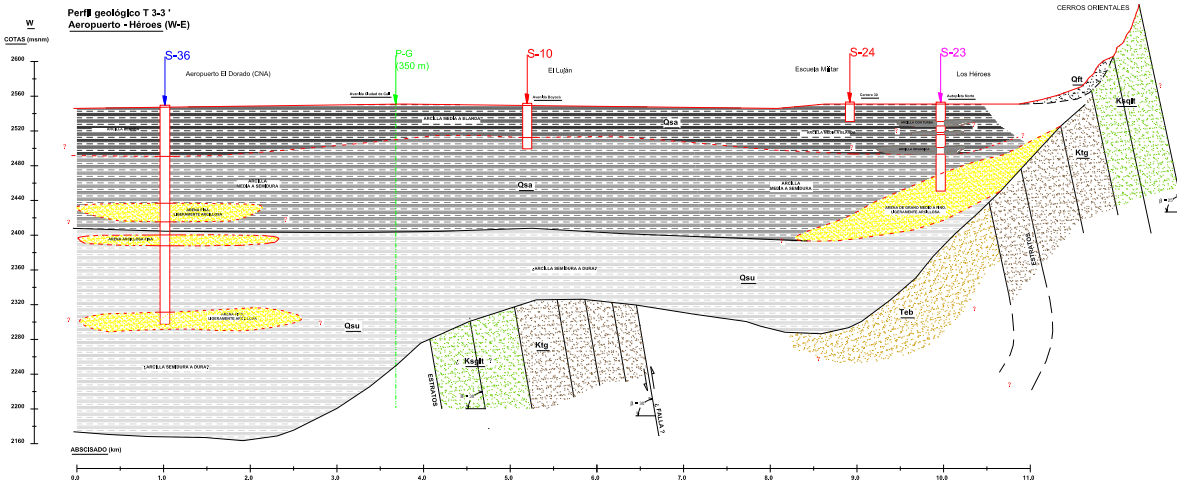
PERFIL TRANSVERSAL T 6-6' – PARQUE TIMIZA – OLAYA

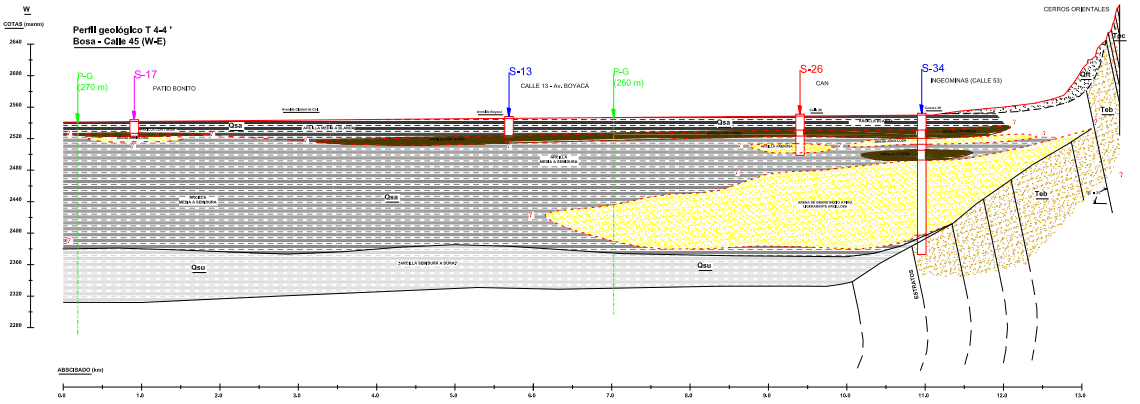

Perfil geológico L 1-1'
Autopista Norte (N-S)
S-2
Jardines de Paz
S-33
Universidad Agraria
S-6
Calle 127Bis - Cra. 20
S-5
Calle 127Bis - Aut. Norte
S-4
Calle 100
S-23
Los Héroes
S-28
Av. Americas - Cra. 30
ROCA SEDIMENTARIA
Qsu
ABSCISADO (km)

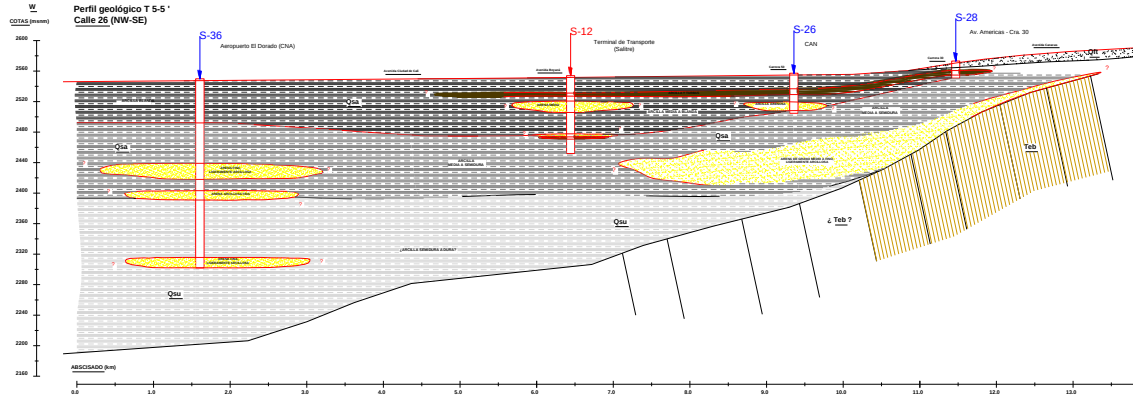

Perfil geológico L 2-2'
Suba - Olaya (N-S)
S-7
Clínica "Corpas"
S-8
Suba Tibabuyes
S-11
Calle 68 - Cra. 82
S-10
El Luján
S-12
Terminal de Transportes (Salitre)
S-31
ROCA SEDIMENTARIA
Qsu
ABSCISADO (km)

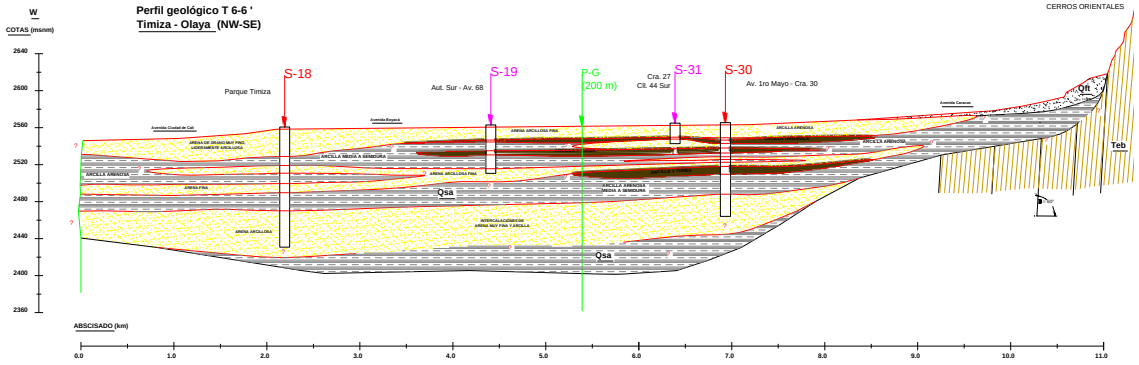

Perfil geológico T 1-1 '
Calle 170 (W-E)
CERRO DE SUBA
CERROS ORIENTALES
S-7
Clínica "Corpas"
S-33
U. Agraria
S-1
F.F.N.N.
Ktg
Qsa
Ksglt
Qsu
Oh
ESTRATOS
ABSCISADO (km)


Perfil geológico T 2-2 '
Calle 127 (W-E)
W
COTAS (msnm)
S-9
Bochica
CERRO DE SUBA
S-5
S-6
Calle 127 - Aut. Norte
Calle 127Bis - Cra. 20
CERROS ORIENTALES
Qft
Ksgf
Qsa
Ktg
Qsu
ESTRATOS
ABSCISADO (km)


Perfil geológico T 3-3 '
Aeropuerto - Héroes (W-E)
W
COTAS (msnm)
S-36
Aeropuerto El Dorado (CNA)
P-G
(350 m)
S-10
El Luján
S-24
Escuela Militar
S-23
Los Héroes
CERROS ORIENTALES
Qft
Ksgf
Qsa
Ktg
Qsu
Teb
ESTRATOS
ABSCISADO (km)


Perfil geológico T 4-4 '
Bosa - Calle 45 (W-E)
W
COTAS (msnm)
P-G (270 m)
S-17
PATIO BONITO
S-13
CALLE 13 - Av. BOYACÁ
P-G (250 m)
S-26
CAN
S-34
INGEOMINAS (CALLE 53)
CERROS ORIENTALES
Tpc
Qft
Teb
Qsa
Qsu
ABSCISADO (km)


Perfil geológico T 5-5 '
Calle 26 (NW-SE)
W
COTAS (msnm)
S-36
Aeropuerto El Dorado (CNA)
S-12
Terminal de Transporte (Salitre)
S-26
CAN
S-28
Av. Americas - Cra. 30
Qft
Qsa
Qsu
Teb
¿ Teb ?
ABSCISADO (km)


Perfil geológico T 6-6 '
Timiza - Olaya (NW-SE)
W
COTAS (msnm)
Parque Timiza
S-18
Aut. Sur - Av. 68
S-19
P-G (200 m)
Cra. 27 Cll. 44 Sur
S-31
S-30
Av. 1ro Mayo - Cra. 30
CERROS ORIENTALES
Qft
Teb
Qsa
ABSCISADO (km)

ANEXO No. 7:

PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DETERMINADOS PARA LOS PERFILES DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA

SITIO 01: CLUB DE SUBOFICIALES FUERZAS MILITARES

SITIO 02: CALLE 127BIS CON CARRERA 20

SITIO 03: Av. CUNDINAMARCA – CLL. 139 (SUBA TIBABUYES)

SITIO 04: BARRIO "BOCHITA" NORTE

SITIO 05: BARRIO "EL LUJÁN"

SITIO 06: TERMINAL DE TRANSPORTES (SALITRE)

SITIO 07: MONUMENTO A LOS HÉROES

SITIO 08: UNIVERSIDAD AGRARIA (CALLE 170 – CRA. 54)

SITIO 09: INGEOMINAS (CALLE 53 – CARRERA 30)

SITIO 10: AEROPUERTO EL DORADO (CNA)

PERFIL Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Club de Suboficiales Fuerzas Militares **MODELO 1D - SITIO 01**

Estrato	USCS	Espesor (m)	PUH (kN/m^3)	C' (kPa)	ϕ' (°)	kh (m/s)	kv (m/s)	Cc	Cr	eo
1	SP	2.20	14.3	10.0	30.0	7.30E-06	3.65E-06	0.730	0.110	1.34
2	CH	18.80	16.3	12.0	18.0	1.97E-09	9.86E-10	1.883	0.326	3.44
3	CH	18.00	14.2	15.0	22.0	4.63E-09	2.32E-09	1.846	0.118	3.23
4	CH	11.00	15.4	20.0	25.0	8.92E-09	4.46E-09	1.641	0.101	2.64

Prof. total: 50.00 m

Posición inicial del Nivel Freatico: **5.00** m

PERFIL Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Calle 127Bis con Carrera 20 **MODELO 1D - SITIO 02**

Estrato	USCS	Espesor (m)	PUH (kN/m^3)	C' (kPa)	ϕ' (°)	kh (m/s)	kv (m/s)	Cc	Cr	eo
1	CL	5.00	14.8	35.3	18.0	6.73E-08	3.37E-08	0.810	0.125	1.920
2	CL	25.50	13.4	17.2	12.0	1.05E-08	5.23E-09	1.565	0.398	3.148
3	CL	19.50	13.7	30.4	17.3	5.13E-09	2.56E-09	1.237	0.313	2.367
4	CH, CL	35.00	15.1	69.0	10.7	1.12E-08	5.58E-09	0.720	0.125	1.438
5	SP	15.00	14.5	57.9	28.0	7.30E-06	3.65E-06	0.730	0.110	1.340
6	CH	35.00	14.4	60.8	18.0	1.72E-08	8.61E-09	0.720	0.097	1.450
7	CH, CL	53.50	16.9	68.7	22.0	4.91E-08	2.46E-08	0.810	0.049	1.050

Prof. total: 188.50 m

Posición inicial del Nivel Freatico: **2.00** m

PERFIL Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Av. Cundinamarca - Calle 139 (Suba Tibabuyes) **MODELO 1D - SITIO 03**

Estrato	USCS	Espesor (m)	PUH (kN/m^3)	C' (kPa)	ϕ' (°)	kh (m/s)	kv (m/s)	Cc	Cr	eo
1	CH, CL	8.00	13.1	30.0	20.0	1.006E-09	5.032E-10	1.665	0.100	3.16
2	CH	15.50	13.5	18.0	16.0	2.59E-08	1.30E-08	2.209	0.161	2.55
3	CH,OH	26.00	13.0	20.0	14.0	1.05E-09	5.27E-10	1.666	0.306	2.98
4	CH, CL	23.00	14.1	30.0	22.0	7.50E-11	3.75E-11	0.836	0.175	1.54
5	CL	52.50	16.5	40.0	24.0	4.84E-10	2.42E-10	0.889	0.102	1.26
6	SC	20.00	15.5	10.0	30.0	7.30E-06	3.65E-06	0.460	0.036	0.84
7	CL, CH	48.00	16.9	50.0	26.0	6.45E-10	3.22E-10	0.233	0.069	0.90
8	CL	52.00	17.1	35.0	24.0	7.34E-10	3.67E-10	0.363	0.046	1.15

Prof. total: 245.00 m

Posición inicial del Nivel Freatico: **3.50** m

PERFIL Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Barrio Bochica Norte - Av. Cundinamarca **MODELO 1D - SITIO 04**

Estrato	USCS	Espesor (m)	PUH (kN/m^3)	C' (kPa)	ϕ' (°)	kh (m/s)	kv (m/s)	Cc	Cr	eo
1	OH	5.00	13.6	25.0	14.0	7.65E-09	3.83E-09	2.818	0.088	3.0
2	CH	15.50	13.1	20.0	12.0	1.84E-09	9.21E-10	1.722	0.441	3.6
3	CH	17.00	13.7	30.0	18.0	3.18E-09	1.59E-09	1.960	0.228	3.3
4	CH	12.50	13.3	40.0	20.0	3.22E-09	1.61E-09	2.468	0.200	2.6

Prof. total: 50.00 m

Posición inicial del Nivel Freatico: **3.00** m

PERFIL Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Barrio "El Luján" **MODELO 1D - SITIO 05**

Estrato	USCS	Espesor (m)	PUH (kN/m^3)	C' (kPa)	ϕ' (°)	kh (m/s)	kv (m/s)	Cc	Cr	eo
1	CH	8.00	15.0	18.0	12.0	3.53E-08	1.76E-08	1.816	0.238	3.44
2	CH	20.50	12.8	20.0	15.0	3.50E-09	1.75E-09	2.288	0.200	4.23
3	CL, CH	21.50	15.0	30.0	22.0	4.74E-09	2.37E-09	2.304	0.061	2.93

Prof. total: 50.00 m

Posición inicial del Nivel Freatico: **3.00** m

PERFIL Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Terminal de Transportes (Salitre) **MODELO 1D - SITIO 06**

Estrato	USCS	Espesor (m)	PUH (kN/m^3)	C' (kPa)	ϕ' (°)	kh (m/s)	kv (m/s)	Cc	Cr	eo
1	CL, CH	10.00	15.3	20.0	28.0	4.21E-10	2.11E-10	1.190	0.190	1.97
2	CH	10.50	14.0	22.0	14.0	9.32E-10	4.66E-10	1.090	0.370	2.04
3	CH, OH	10.50	12.9	18.0	12.0	2.72E-09	1.36E-09	1.170	0.150	1.93
4	SP	15.00	16.7	10.0	30.0	7.30E-06	3.65E-06	0.390	0.027	0.94
5	CH	14.00	15.0	50.0	12.0	2.11E-09	1.05E-09	0.730	0.130	1.41
6	SM	18.00	17.6	10.0	30.0	7.30E-06	3.65E-06	0.410	0.029	1.07
7	OH, CL	22.00	17.9	30.0	18.0	4.10E-10	2.05E-10	0.650	0.070	0.89

Prof. total: 100.0 m

Posición inicial del Nivel Freatico: **7.50** m

PERFIL Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Monumento "Los Héroes" **MODELO 1D - SITIO 07**

Estrato	USCS	Espesor (m)	PUH (kN/m^3)	C' (kPa)	ϕ' (°)	kh (m/s)	kv (m/s)	Cc	Cr	eo
1	CH	5.00	14.4	30.0	17.0	2.03E-09	1.02E-09	1.610	0.161	3.40
2	CH, OH	12.50	12.1	18.0	12.0	3.89E-09	1.95E-09	2.150	0.215	4.36
3	CH	15.00	14.3	40.0	14.0	8.82E-09	4.41E-09	1.340	0.110	2.22
4	CL	22.50	15.5	20.0	18.5	6.53E-10	3.26E-10	0.695	0.070	1.20
5	SP	20.00	18.1	10.0	30.0	7.30E-06	3.65E-06	0.613	0.037	1.00

Prof. total: 100.0 m

Posición inicial del Nivel Freatico: **3.00** m

PERFIL Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Universidad Agraria - Calle 170 con Carrera 54 **MODELO 1D - SITIO 08**

Estrato	USCS	Espesor (m)	PUH (kN/m^3)	C' (kPa)	ϕ' (°)	kh (m/s)	kv (m/s)	Cc	Cr	eo
1	CH	5.30	13.6	110.4	18.0	3.38E-09	1.69E-09	1.280	0.250	2.27
2	CH, OH	14.20	13.4	21.9	4.0	7.36E-10	3.68E-10	2.750	0.400	3.98
3	CH	6.00	12.7	42.2	14.0	5.47E-09	2.74E-09	3.770	0.150	3.60
4	CL	2.50	15.5	7.8	20.0	3.01E-09	1.50E-09	3.030	0.130	3.38
5	CH	29.50	11.3	72.1	18.0	1.05E-08	5.24E-09	2.085	0.160	4.05
6	CL	18.50	18.8	84.9	24.0	6.88E-09	3.44E-09	1.290	0.032	1.78
7	CH	11.50	17.9	95.2	20.0	5.89E-10	2.94E-10	1.270	0.025	1.00
8	SC	33.00	21.3	105.5	30.0	7.30E-06	3.65E-06	0.450	0.025	0.68

Prof. total: 130.0 m

Posición inicial del Nivel Freatico: **3.00** m

PERFIL Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

INGEOMINAS - Calle 53 con Carrera 30 **MODELO 1D - SITIO 09**

Estrato	USCS	Espesor (m)	PUH (kN/m^3)	C' (kPa)	ϕ' (°)	kh (m/s)	kv (m/s)	Cc	Cr	eo
1	CL, CH	7.00	15.0	37.3	24.0	7.56E-10	3.78E-10	0.690	0.138	1.34
2	CH	22.80	13.8	19.6	16.0	5.02E-10	2.51E-10	1.208	0.162	2.22
3	SC	8.00	18.6	10.0	30.0	7.30E-06	3.65E-06	0.390	0.060	0.89
4	CH, CL	13.70	15.4	30.0	22.0	2.36E-09	1.18E-09	1.190	0.105	1.91
5	OH, CL	15.50	16.5	20.0	18.0	7.24E-11	3.62E-11	0.940	0.044	1.11
6	SC	85.50	19.0	10.0	30.0	1.00E-05	5.00E-06	0.330	0.085	0.89
7	CH, CL	24.50	17.4	60.0	24.0	1.70E-09	8.49E-10	0.490	0.019	1.38

Prof. total: 177.0 m

Posición inicial del Nivel Freatico: **6.00** m

PERFIL Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Aeropuerto El Dorado - CNA **MODELO 1D - SITIO 10**

Estrato	USCS	Espesor (m)	PUH (kN/m^3)	C' (kPa)	ϕ' (°)	kv (m/s)	kh (m/s)	Cc	Cr	eo
1	CH	3.00	14.9	40.0	16.0	1.32E-08	2.64E-08	1.848	0.071	2.67
2	CH	7.00	12.9	28.4	17.0	6.95E-09	1.39E-08	2.051	0.119	2.88
3	CH	18.50	12.9	54.0	19.5	1.94E-08	3.89E-08	3.994	0.081	2.99
4	CH	28.00	13.8	5.0	22.5	3.13E-09	6.26E-09	2.281	0.172	2.78
5	CH, CL	28.50	14.2	4.0	30.0	2.23E-09	4.46E-09	1.285	0.018	1.37
6	CL, CH	25.50	16.7	61.8	14.5	1.62E-09	3.24E-09	1.070	0.030	1.10
7	SC	21.50	15.9	10.0	28.0	3.65E-06	7.30E-06	0.528	0.029	0.77
8	CL	15.00	16.9	20.0	20.0	3.59E-10	7.18E-10	0.540	0.018	0.69
9	SC	12.50	19.7	10.0	28.0	5.00E-06	1.00E-05	0.450	0.025	0.68
10	CL	76.50	19.2	30.0	22.0	7.79E-11	1.56E-10	0.446	0.025	0.55
11	SC	14.00	16.9	15.0	28.0	5.00E-06	1.00E-05	0.484	0.040	0.68

Prof. total: 250.0 m

Posición inicial del Nivel Freatico: **5.00** m

/