

EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS
POR LA SUBSIDENCIA EN PUNTOS CRÍTICOS Y ZONAS MÁS AFECTADAS
EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.

DIEGO ALEJANDRO CLAVIJO PERALTA
2011160001

JUAN SEPÚLVEDA GUEVARA
2013260019

ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ, D.C.
2014

EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS
POR LA SUBSIDENCIA EN PUNTOS CRÍTICOS Y ZONAS MÁS AFECTADAS
EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.

DIEGO ALEJANDRO CLAVIJO PERALTA

2011160001

JUAN SEPÚLVEDA GUEVARA

2013260019

Proyecto de grado en modalidad de proyecto de aplicación presentado como
requisito para optar por el título de Ingeniero Ambiental

Director:

ALBERTO GARCÍA BOLIVAR.

GEÓLOGIA M Sc

ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ, D.C.
2014

NOTA DE ACEPTACIÓN



DIRECTOR
Heinrich F. L. L.

JURADO



JURADO

BOGOTA, MARZO DE 2014

Juan.

El apoyo brindado por mi familia en especial mi madre, por acompañarme en el cumplimiento de esta meta académica y estar siempre presente para culminar este ciclo que está a punto de finalizar, por su constante compañía y ejemplo, entregando parte del corazón y su ser a mí y mis hermanos, quienes también afirmaron este deseo de conocimiento y entrega a la universidad.

Diego.

Especialmente, a mis padres quienes me brindaron la oportunidad de vivir y a mis buenos acompañantes en este camino como mis hermanos y amigos. A todos los conocidos de ambiente, y a ti por mostrarme el más bello sentimiento, Erika O.

Resumen

Existe en la ciudad de Bogotá un hundimiento del terreno progresivo en algunas áreas y zonas conocido como subsidencia.

Diferentes factores producto del creciente desarrollo económico e industrial, reflejado en la extracción del agua subterránea, la construcción de nuevas estructuras civiles, entre otras razones, y factores naturales como las características hidrogeológicas de la sabana de Bogotá hacen que este proceso se acentúe en el tiempo.

Este estudio busca crear una relación de causas, efectos y consecuencias de la subsidencia, integrando los diferentes elementos y variables que tengan influencia en los resultados, además de emitir alternativas, recomendaciones y posibilidades de solución al problema diagnosticado y estudiado.

El uso de herramientas técnicas, estudios específicos de distintas entidades oficiales y privadas, mecanismos de medición satelitales y de georeferenciación unido a los registros obtenidos in-situ, permiten realizar un amplio diagnóstico sobre la situación que actualmente afecta la capital colombiana.

Palabras clave: *Subsidencia, Evaluación de Impacto ambiental, Georeferenciación, Deformación Suelos.*

Abstract

There is in the city of Bogota a collapse to terrain progressive in some areas and zones indentify.

Different factors result to growing economics and industrial development as same as extraction regimes of aquifer systems, construction to new civil structures, among others reasons, and naturals factors like hydrogeology's characteristic's land of Bogota, make to this process involve on the time.

This study look for create connection of causes, effects and consequences of the subsidence, make up different elements and variables which have influence in the results, as well as produce alternatives, recommendations and possibilities of solution to problem diagnosed and studied.

The use of techniques possibilities, specific studies of different state and private organizations, mechanisms of satellite's measure and geological reference with results obtained in-situ, allowed realize a broad diagnostic about situation which current affects the Colombian' capital.

Keywords: *Subsidence, Environmental Impact Assessment, Geocoding, Soil deformation.*

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
2 JUSTIFICACIÓN.....	4
3 OBJETIVOS.....	5
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
4 METODOLOGÍA.....	7
4.1 EVALUACIÓN DIAGNÓSTICA.....	7
4.2 INVESTIGACIÓN OPERATIVA.....	8
4.3 EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES.....	9
4.4 DIAGRAMA DE FLUJO.....	10
5 MARCOS DE REFERENCIA.....	11
5.1 MARCO GEOGRÁFICO.....	11
5.2 MARCO CONCEPTUAL.....	14
5.3 MARCO LEGAL.....	22
5.4 MARCO HISTÓRICO.....	24
5.5 MARCO TEÓRICO.....	27
5.5.1.1 Principales causas de procesos de subsidencia.....	29
5.5.1.2 Descenso del nivel freático.....	30
5.5.1.3 Subsidencia natural.....	30
5.5.1.4 Existencia de materiales solubles.....	30
5.5.1.5 Procesos de erosión mecánica sub-superficial.....	31
5.5.1.6 Flujo lateral.....	31

5.5.1.7	Hidrocompactación	31
5.5.1.8	Por carga	32
5.5.1.9	Tectónica	33
5.5.1.10	Subsidencia por Minería.	34
5.5.1.11	Los peligros de la subsidencia	34
5.6	PRINCIPALES MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA	35
5.6.1	Método Rotativo	36
5.6.2	Nuevas técnicas para la exploración del recurso hídrico	37
6	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE BOGOTÁ	38
6.1	GEOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA Y GEOTECNIA	39
6.1.1	Depósitos aluviales (Otb -Terrazas Bajas: Qta -Terrazas altas)	41
6.1.2	Coluvión (Qdp)	41
6.1.3	Suelo Residual (Qrs)	41
6.1.4	Rellenos de excavaciones (Qr)	41
6.1.5	Formación Sabana (Qs)	41
6.1.6	Formación Mondoñedo	42
6.1.7	Formación Chía	42
6.1.8	Formación Chipaque (ksch)	42
6.1.9	Grupo Guadalupe (Ksg)	42
6.1.10	Formación Plaeners (Ksgp)	43
6.1.11	Formación Arenisca Labor-Tierna (Ksglt)	43
6.1.12	Formación Guaduas (Tkg)	43
6.1.13	Formación Cacho (Tpc)	43
6.1.14	Formación Bogotá (Tpb)	44
6.1.15	Formación Arenisca de la Regadera (Tir)	44

6.1.16	Formación Usme (Tiu).....	44
6.1.17	Formación Tunjuelo (QPt)	45
6.2	MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE BOGOTÁ.	47
6.2.1	Zonificación Geotécnica de la Ciudad de Bogotá.....	48
6.2.1.1	Zona 1: Cerros.	48
6.2.1.2	Zona 2: Piedemonte.	48
6.2.1.3	Zona 3: Lacustre A.	49
6.2.1.4	Zona 4: Lacustre B.	49
6.2.1.5	Zona 5: Terrazas y Conos.....	49
6.3	ASENTAMIENTOS DE INGENIERÍA CIVIL.....	50
6.4	RECURSO HÍDRICO	50
6.4.1	Agua Subterránea.....	52
6.4.2	Acuífero Cuaternario.....	53
6.4.3	Acuífero Terciario.....	54
6.4.4	Acuífero Cretáceo.....	54
6.4.5	Agua pluvial y superficial	54
6.4.6	Temporada de precipitación alta	55
6.4.7	Temporada de precipitación baja	57
6.4.8	Hidrogeología de Bogotá.....	59
6.4.9	Recarga potencial de Bogotá	63
6.4.10	Posibles zonas de recarga	64
7	EXPLOTACIÓN Y GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO	66
7.1	TRÁMITES ANTE LA AUTORIDAD.....	67
7.1.1	Permiso de exploración	67
7.1.2	Solicitud de Concesión de Aguas Subterráneas	67

7.1.3	Solicitud de Prórroga de Concesión de Aguas Subterráneas	68
7.1.4	Solicitud de Modificación del Caudal de Aguas Subterráneas Concesionado	69
7.1.5	Concesión para su explotación	70
7.1.6	Renovación de la concesión	70
7.1.7	Especificaciones técnicas	71
7.1.7.1	Etapas de diseño	71
7.1.7.2	Características de diseño	72
7.1.8	Tarifas extracción agua subterránea	72
8	SISTEMAS DE REFERENCIA GEODÉSICO	75
8.1	TELEDETECCIÓN ESPACIAL	75
8.2	INTERFERÓMETRO DE APERTURA SINTÉTICA. (INSAR)	75
8.3	MÓDULOS MAGNA SIRGAS PRO	78
8.4	RED GEODÉSICA DISTRITAL	79
8.4.1	Estudio Interferométrico Diferencial (SAR) Bogotá	81
9	EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL	84
9.1	ATRIBUTOS DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES	84
9.1.1	Consideraciones y criterios previos	85
9.1.2	Componentes Ambientales	85
9.1.3	Escenarios del riesgo	86
9.1.4	Causas	87
9.1.5	Efecto-Consecuencias	88
9.1.6	Carácter del impacto o Naturaleza	90
9.1.7	Efecto	90
9.1.8	Magnitud/Intensidad	90
9.1.9	Extensión	91

9.1.10	Momento	92
9.1.11	Persistencia	92
9.1.12	Reversibilidad	93
9.1.13	Recuperabilidad	93
9.1.14	Sinergia	94
9.1.15	Acumulación	94
9.1.16	Periodicidad	94
9.1.17	Importancia del Impacto	95
9.2	GESTIÓN DEL RIESGO	95
9.2.1	Riesgo	95
9.2.2	Vulnerabilidad	96
9.2.3	Aspectos sociales	96
10	RESULTADOS	97
10.1	REGISTRO HISTÓRICO DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA	97
10.2	EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA POR LOCALIDADES	98
10.2.1	Relación de estaciones con puntos de hundimiento	101
10.2.2	Monitoreo Subsistencia mediante Interferometría Diferencial DInSAR	108
10.2.3	Proyectos de construcción realizados desde 2003	112
10.2.4	Microzonificación en la localidad de Puente Aranda	114
10.2.5	Modelo Hidrogeológico en las Localidades de Puente Aranda, Kennedy y Fontibón 115	
10.2.6	Hallazgos en terrenos de estos hundimientos	117
10.2.7	Evaluación del Impacto Ambiental	121
11	MEDIDAS DE MITIGACIÓN TÉCNICO-ADMINISTRATIVAS.	122
11.1	MEDIDAS TÉCNICAS	122
11.1.1	MEDIDAS ADMINISTRATIVAS	123

12	CONCLUSIONES.....	124
13	RECOMENDACIONES	126
14	BIBLIOGRAFÍA.....	128
15	ANEXOS	132
15.1	MATRIZ DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL	133
15.2	ARCHIVO FOTOGRAFICO	134
15.3	ZONIFICACION DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE BOGOTA PARA EL DISEÑO DE EDIFICACIONES	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de Bogotá en Colombia.....	11
Figura 2. Ubicación espacial de la ciudad de Bogotá.	13
Figura 3. Fallas sinclinales y anticlinales.....	18
Figura 4. Crecimiento Urbano Ciudad de Bogotá 1969-2000.....	26
Figura 5. Captación de agua por método de percusión.....	36
Figura 6. Mapa geológico de Bogotá,.....	40
Figura 7. Microzonificación Sísmica de Bogotá.	47
Figura 8. El Ciclo Hidrológico.	52
Figura 9. Mapa de Isopiezas temporada de alta precipitación 1999-2010.....	56
Figura 10. Mapa de Isopiezas temporada de baja precipitación 1999-2010.....	58
Figura 11. Perfil Hidrogeológico de Bogotá.....	60
Figura 12. Corte Hidrogeológico transversal Sabana de Bogotá.....	62
Figura 13. Esquema de la cuenca artesiana de la Sabana de Bogotá.....	65
Figura 14. Aumento en el valor facturado de consumo aguas subterráneas.....	74
Figura 15. Ubicación de Estaciones BOGT-BOGA.....	76
Figura 16. Red Geodésica de Bogotá.	80
Figura 17. Medición a partir de imágenes satelitales.	82
Figura 18. Ubicación de las localidades con mayor extracción de agua subterránea.....	100
Figura N° 19. Extracción de Agua Subterránea Ciudad de Bogotá.....	101
Figura N° 20: Puntos Geodésicos con hundimientos de suelo detectados 2003-2004.	103
Figura N° 21 . Estaciones Bogotá 9-8-15-3.	105
Figura N° 22: Puntos Geodésicos con hundimientos de suelo detectados 2004-2007.	106

Figura N°: 23 Puntos Geodésicos con hundimientos de suelo detectados 2003-2007.	107
Figura 24. Deformación estudio 2007.....	109
Figura 25. Resultados de la deformación estudio 2009	110
Figura 26. Proyectos de Construcción realizados en Bogotá en el periodo 2003- 2011.....	112
Figura 27. Microzonificación Sísmica Localidad de Puente Aranda.	114
Figura 28. Isopiezas Zona Puente Aranda, Kennedy y Fontibón.....	116

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Hundimiento malla vial por emplazamiento de una construcción.....	33
Fotografía 2. Hundimiento pavimento por construcción.....	30
Fotografía 3. Hundimiento Esquina nororiental de la Torre City Bank.....	39
Fotografía 4. Estacion de referencia Magna-Sirgas	77
Fotografía 5. Pilastra red Magna, barrio San Pedro (Bosa).....	78
Fotografía 6. GNSS Estación de la Red MAGNA-ECO. Fontibón.....	81
Fotografía 7. Hundimiento Calle 2A con Transversa 53.....	118
Fotografía 8. Hundimiento Calle 17 con Carrera 65.....	118
Fotografía 9. Hundimiento Carrera 5 con Diagonal 16.....	119
Fotografía 10. Calle 17 con Carrera 65.....	120

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación de las principales normas legales de referencia.....	22
Tabla 2. Clasificación de acuíferos en el área de estudio EAAB-JICA (2009).....	45
Tabla 3. Recarga Potencial (Balance Hídrico).	63
Tabla 4. Ingresos por concepto de consumo de agua subterránea.....	74
Tabla 5. Valoración de Efecto	90
Tabla 6. Valoración de Magnitud/Intensidad.....	90
Tabla 7. Valoración de Extensión.....	91
Tabla 8. Valoración de Momento	92
Tabla 9. Valoración de Persistencia.....	93
Tabla 10. Valoración de Reversibilidad.....	93
Tabla 11. Valoración de Recuperabilidad	93
Tabla 12. Valoración de Sinergia	94
Tabla 13. Valoración de Acumulación.....	94
Tabla 14. Valoración de Periodicidad	94
Tabla 15. Volumen total de extracción de agua concesionado (SDA) y real consumido.....	98
Tabla 16. Concesiones con pozo con mayor extracción y localidades.....	99
Tabla 17. Cambio en alturas derivado del estudio de GNSS- Estudios realizados 2003-2004-2007 Red Geodésica de Bogotá.....	102

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de Evaluación de Impacto Ambiental.....	133
Anexo 2. Archivo fotográfico.....	134
Anexo 3. Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño de edificaciones.....	135
Anexo 4. Tabla de Características de las Unidades hidrogeológicas.....	136

INTRODUCCIÓN

Con la elaboración del presente estudio, se busca realizar un aporte al medio ambiente desde la identificación y análisis de las actividades antrópicas como la extracción de agua subterránea en la ciudad de Bogotá. Para esto se desarrolló la individualización de factores asociados y la descomposición de elementos que sirven de base para la evaluación cuantitativa y cualitativa de las consecuencias ambientales generadas por su explotación en el área urbana, sin desestimar los elementos naturales que puedan incidir en este proceso.

En Colombia el Decreto 2858 de 1981 reglamentó los mecanismos de uso del recurso hídrico subterráneo por concesión para la explotación. Por otro lado, el bajo costo en las tasas retributivas y la auto-declaración de volúmenes de extracción a la Secretaria Distrital de Ambiente (SDA), han generado interés en las empresas en obtener y/o mantener las concesiones.

Parte de la población bogotana de más de siete millones de habitantes, está expuesta a un conjunto de factores relacionados a la subsidencia, para la cuales actualmente no existen estudios específicos a profundidad del tema, favoreciendo el aumento de riesgos ambientales, posibles contingencias por vulnerabilidad y daños que pueden afectar económicamente y socialmente las áreas y localidades del estudio.

Para el desarrollo de la disertación se identificaron distintos aspectos y características naturales como la zonificación geotécnica, la microzonificación sísmica, el modelo hidrogeológico, principales acuíferos, entre otros aspectos, así como los mecanismos y las metodologías para su identificación y medición y de esta manera encontrar su correlación con las zonas y localidades donde existe el mayor número de concesiones para la explotación de agua subterránea.

Este recurso natural es extraído de acuíferos profundos recurrentemente en la sabana desde épocas ancestrales para actividades de agricultura, consumo

humano y recientemente por diferentes industrias para satisfacer la demanda por aumento y crecimiento exponencial de la población de la región.

Dadas las repercusiones y consecuencias de la subsidencia a nivel ambiental, social y económico, se efectuó la identificación de causa y efectos en la localidad de Puente Aranda mediante la metodología de Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) según Conesa Fernández Vítora (1997), siendo esta la herramienta para identificar, evaluar, interpretar y definir los principales aspectos que influyen e impactan ambientalmente la problemática estudiada, así como facilita proponer medidas de mitigación, prevención y generar recomendaciones apropiadas para los efectos generados por estas actividades.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La sobre explotación de agua subterránea sumado a factores como la vibración generada por el transporte vehicular además del peso natural de estructuras, edificios e industrias y características de los suelos entre otras, facilitan las condiciones para el hundimiento del suelo en Bogotá.

El inventario de explotación de agua en Bogotá indicó que por el desarrollo urbano y su crecimiento poblacional e industrial generó que para el año 2001 existieran 294 pozos inventariados y 95 concesiones vigentes, para un consumo de 7 millones de m³/año. El aumento paulatino de la demanda del recurso hídrico, ha derivado en un crecimiento de la problemática lo que permitió que a la fecha, existan más de 5000 concesiones. La extracción de agua está alrededor de 42'000.000 m³/año, representado en pozos mayoritariamente en Suba, Fontibón, Usaquén y en las localidades de Puente Aranda y Kennedy.

Bogotá está constituida geológicamente por suelos orgánicos, depósitos de arcillas formados por la desecación de un antiguo lago, con estratos intermedios y discontinuos de arenas. “El espesor de los depósitos aumenta gradualmente desde las zonas próximas a los cerros orientales, en donde tienen pocos metros de profundidad, hasta el sector occidental de la sabana”¹. Bogotá se ha desarrollado hacia los terrenos de las Sabana, conformados por suelos blandos de origen lacustre. La ausencia de estudios sobre subsidencia y su impacto ambiental genera una baja gestión en la evaluación de impactos, prevención del riesgo y daños a la infraestructura física de la ciudad.

¹ CAR. Plan de Manejo Ambiental de Agua Subterránea de la Sabana de Bogotá y Zona Crítica. Primera edición. Bogotá 2008.

2 JUSTIFICACIÓN

Estudios de investigación realizados por Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE), en convenio de operación con el Instituto Cartográfico de Cataluña en el 2007 confirman que hay procesos de subsidencia en Bogotá, “en un periodo de evaluación de unos ocho años, se detectaron en sectores valores de hundimiento de 1 cm/año, mientras que en otros de hasta 7.5 cm/año según registros”². Los valores más altos se detectaron principalmente en zonas industriales donde se requiere un gran volumen de agua para las actividades que componen los distintos procesos como en la localidad de Puente Aranda.

El desarrollo de Bogotá ha llevado a la construcción de viviendas y edificios, además de obras proyectadas como el Metro donde los trabajos subterráneos son recurrentes y demás factores antrópicos generan la deformación del mismo en algunos sectores de la ciudad, todo esto ligado a la probabilidad de amenazas naturales como terremotos, inundaciones sectorizadas por el aumento de las lluvias contribuyen a la vulnerabilidad física por su ubicación espacial y geográfica. Los hundimientos de los suelos se ven acelerados por diferentes factores propios de una urbe, como aumento de la población, la demanda del recurso, el uso del suelo por necesidad y no por su vocación lleva a generar sobreexplotación de aguas subterráneas y la pérdida de la cobertura vegetal.

Se hace necesaria la recopilación de información técnica generada por terceros como autoridades ambientales y civiles que permita conocer las principales características hidrológicas, geológicas y geotécnicas de este suelo, las causas y efectos que se derivan de su uso, no solo por su vocación y formación lacustre, sino por factores antrópicos que inciden directamente.

²INSTITUTO GEOGRAFICO DE CATALUÑA. Estudio Interferométrico Diferencial AR (DIn SAR) Para La Monitorización De Deformaciones Del Terreno En La Ciudad De Bogotá. 28 Paginas.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la evaluación y el diagnóstico de causas e impactos ambientales generados por la subsidencia, en áreas y puntos críticos de la ciudad de Bogotá D.C.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar información existente del tipo de suelo y características geológicas, geotécnicas e hidrológicas de la ciudad de Bogotá, así como de los diferentes procesos endógenos que influyen directamente en la subsidencia, para determinar las áreas y puntos críticos de mayor vulnerabilidad.
- Relacionar mediante los registros de medición de las estaciones SIRGAS-CON, Red Catastro Distrital y Red Geodesia de Colombia, del suelo urbano de Bogotá, los efectos y consecuencias en áreas y puntos que han presentado los hundimientos más significativos del terreno.
- Evaluar las causas e impactos ambientales generados por causas naturales como las características internas geológicas y antrópicas que acentúan el proceso de subsidencia y asociarlos con los hundimientos en áreas y zonas más afectadas.

- Formular las recomendaciones y sugerencias pertinentes para las diferentes afectaciones e impactos en áreas y puntos críticos de estudio.

4 METODOLOGÍA

De acuerdo al alcance del estudio y los objetivos planteados, se procedió a trazar y aplicar las metodologías de evaluación diagnóstica y operativa para la identificación de las causas y escenarios, involucrando distintos componentes y aspectos que nos llevaron al cumplimiento de los mismos. Para la estimación del efecto y diagnóstico de la problemática generada por la subsidencia se definió la metodología de Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) según Conesa Fernández Vítora (1997), las cual se describen a continuación:

4.1 EVALUACIÓN DIAGNÓSTICA

“Establece o detecta las necesidades; tiene en cuenta las causas del problema; a quien afecta, consecuencias o efectos del problema sobre la población objetivo. Luego de tener el objetivo general establecido, se realizaron actividades definieran con mayor claridad y brindaran lineamientos de los objetivos específicos”.³

Luego de la identificación del problema mediante la recopilación de información de distintas entidades y organismos estatales como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE), el Instituto Geográfico “Agustín Codazzi” (IGAC); se examinan las causas, daños e impactos ambientales generados en las áreas con mayor hundimiento del suelo en la ciudad de Bogotá. También se realiza la interrelación de parámetros, características y elementos para el respectivo análisis de la información, ayudado de gráficas, interpretación de planos y demás elementos que permitan la identificación de los cambios de alturas del suelo.

³ Lecturas complementarias seminario metodología de la investigación, métodos de investigación ambiental, conferencista José Gabriel Santafé, Universidad de Pamplona, Facultad de educación, Especialización en educación y gestión ambiental, 2000.

Se cuenta con la información de estudios previos generados principalmente por el IGAC, el SGC y más recientemente por el FOPAE en el año 2011 y la SDA en el 2013, representados en fotogrametría y mapas geológicos, hidrológicos, tablas y figuras estadísticas etc. Para detectar las mayores diferencias en el movimiento del suelo de acuerdo a registros de nivelación se tienen cuenta distintos sistemas de referencia geodésico como el Interferómetro de Apertura Sintética y el Estudio Interferométrico Diferencial (SAR).

4.2 INVESTIGACIÓN OPERATIVA

En el planteamiento integral de alternativas de mejoramiento en todas las fases, aplicamos la investigación operativa, la cual utiliza métodos que permiten valorar, con anticipación, la solución a problemas operativos, lo que involucra un conocimiento y genera una herramienta para la toma de decisiones buscando alternativas de acción.

La validez y confiabilidad en instrumentos de medición y registro, junto con la trazabilidad y correcto análisis de los datos obtenidos es imprescindible para la coherencia y robustez de los resultados y en consecuencia la obtención y consecución de los objetivos planteados.

Visitas in situ para realizar el registro cualitativo de efectos y consecuencias en puntos representativos según datos de mediciones de las estaciones, complementado con asesorías académicas brindadas por personas vinculadas a la institución y externas.

4.3 EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

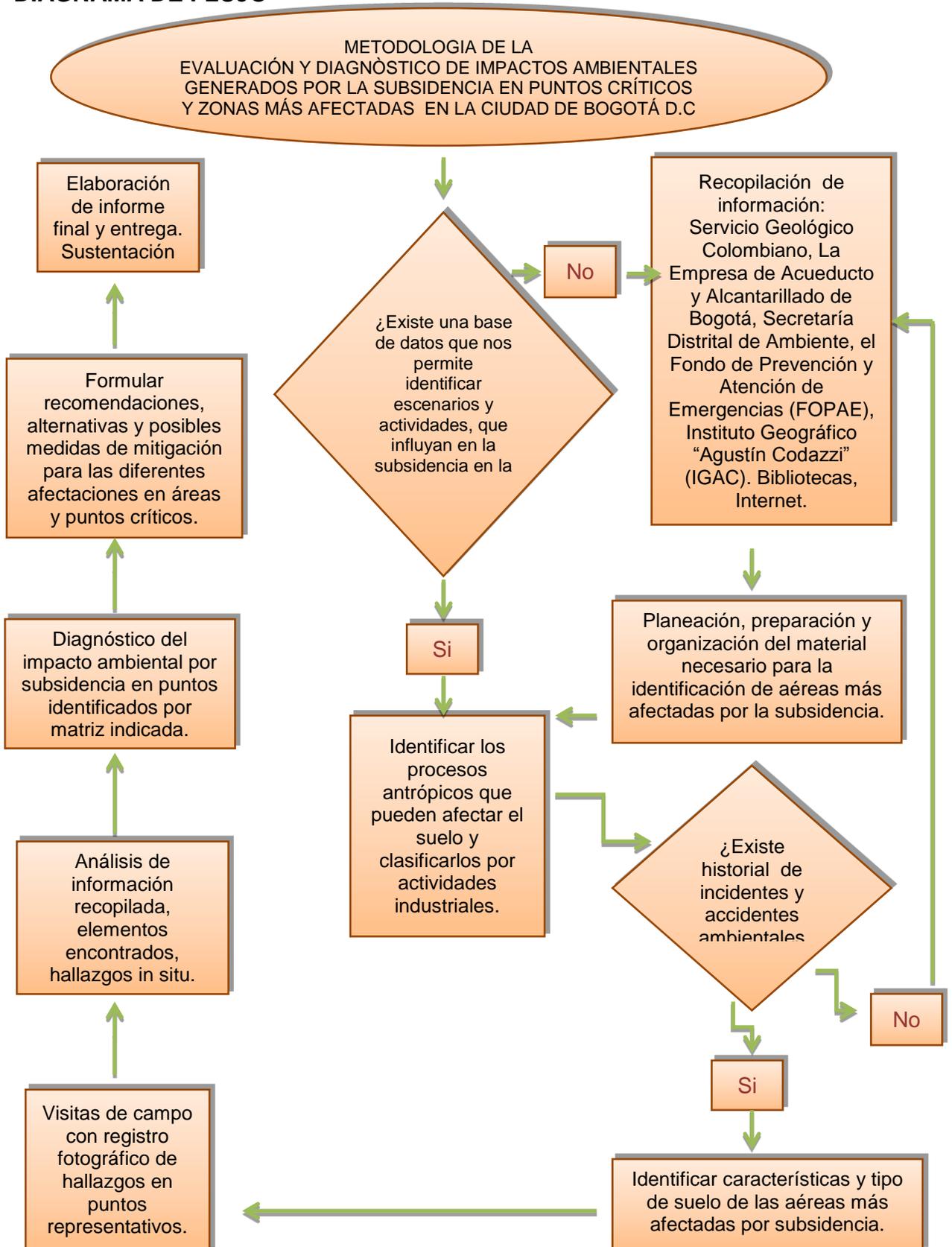
En función de las particularidades, características e información a recopilada del área de estudio se determina mediante la metodología de Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) de Conesa Fernández Vítora (1997), los pasos para predecir, evaluar, interpretar y definir los efectos generados, “impactos positivos o negativos”⁴ favorables o desfavorables ambientalmente.

Estos son determinados y evaluados mediante la caracterización del Medio Físico y Natural que se dividen respectivamente en Medio Inerte, Biótico y Porcentual; al igual que se evalúa el Medio Socioeconómico relacionado con las actividades en referencia y la asociación por la disertación de las causas y efectos en el entorno, los cuales se enfocan en las estructuras, condiciones sociales y de población, por emanación del proceso en el medio ambiente y los cambios de calidad de vida.

Esta evaluación nos debe permitir brindar y comparar diferentes alternativas de mitigación y prevención a los impactos generados y que a largo plazo sean mínimos o nulos los daños personales y materiales en los lugares de mayor incidencia.

⁴ CONESA FERNADEZ-VITORA. Vicente. Guía Metodológica Para La Evaluación Del Impacto Ambiental. Mundi-Prensa, 1993. Pag 6.

4.4 DIAGRAMA DE FLUJO



La ciudad se localiza en las inmediaciones de un ambiente sísmico tectónico de reconocida actividad histórica; en el cual la Zona de Subducción del Pacífico y un complejo sistema de fallas, son las fuentes sísmogénicas que mayor efecto potencial tienen sobre toda la región.

Datos generales:

“Temperatura media anual: 14.0° C

Temperatura máxima media anual: 19.9° C

Temperatura mínima media anual: 8.2° C

Precipitación media anual: 1.013 mm.

Presión atmosférica: 752 milibares.

Humedad relativa media anual: 72%”⁷

⁷ <http://www.inviertaencolombia.com.co/informacion-regional/bogota-dc.html>



Figura 2. Ubicación espacial de la ciudad de Bogotá. Fuente: Google Earth

5.2 MARCO CONCEPTUAL ^{8,9,10,11,12}

Dados los distintos aspectos y complejidad en varios de los términos mencionados y para una mejor comprensión y entendimiento del presente documento, se presenta el siguiente glosario:

Acuicludo: Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que no permite que el agua circule a través de ella. Ejemplo: Limos y arcillas.

Acuíferos: Son formaciones geológicas que, dadas sus características de permeabilidad o porosidad, o sea, intersticios entre los granos que conforman las rocas y el suelo en general, facilitan que el agua infiltrada circule y se almacene a través de estos o a través de estructuras geológicas como fallas sinclinales principalmente.

Acuífero libre: aquellos acuíferos en los que el límite superior de la masa de agua forma una superficie real que está en contacto con el aire de la Zona No Saturada y, por tanto, a presión atmosférica. Cuando se perfora un pozo desde la superficie del terreno, el agua aparece en el pozo cuando se corta o alcanza el nivel freático y se mantiene a esa profundidad. La recarga de este tipo de acuíferos se realiza principalmente por infiltración del agua de lluvia (o de riego, ríos y lagos) a través del suelo.

⁸ hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf

⁹ <http://www.miliarium.com/proyectos/nitratos/diccionario/diccionario.asp>

¹⁰ <http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/08/acuitardo-acuicludo-y-acuifugo.html>

¹¹ http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/e/effective_porosity.aspx?p=1

¹² <http://www.lacomunidadpetrolera.com/showthread.php/93-POROSIDAD-PRIMARIA-Y-SECUNDARIA>

Acuífero artesiano o confinado: Es en el cual el agua subterránea se encuentra encerrada bajo presión, en medio de rocas impermeables.

Acuífero semiconfinado: Es el que está completamente saturado de agua y limitado en su parte superior por una roca o formación semipermeable.

Acuífugo: Es una unidad geológica que no contiene agua y no la puede transmitir. Es el caso del granito fracturado.

Acuitardo: Es una formación geológica semipermeable, que conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas, sin embargo bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos.

Aguas subterráneas: Son las aguas que hacen parte del ciclo hidrológico, las cuales provienen de las lluvias que se infiltran a través del suelo y se almacenan en acuíferos.

Aforo: Es la prueba que se realiza en sistema de bombeo instalado en un pozo profundo a fin de determinar el caudal o cantidad de agua que se puede extraer, medida en volumen por unidad de tiempo.

Amenaza: En el análisis de escenarios el "riesgo" es distante de lo que se llama "amenaza". Una amenaza es un evento serio pero de poca probabilidad.

Aprovechamiento: Es la actividad consistente en obtener concesión de aguas subterráneas, ante la CAR, del pozo profundo una vez que la exploración ha sido exitosa, en cuanto a cantidad y calidad.

Coefficiente de almacenamiento: Es el volumen de agua que puede ser liberado de un acuífero y corresponde a la porosidad eficaz.

Compactación: Se refiere a la pérdida de volumen de depósitos sedimentarios de baja densidad y que puede ser inducida por carga. En un material es el volumen de agua que, con la viscosidad cinemática, se mueve en el tiempo bajo un gradiente hidráulico unitario, a través de una sección unitaria, medida en ángulo recto a la dirección del flujo.

Consolidación. Es el proceso de compactación de un volumen de suelo debido al cambio en el esfuerzo efectivo que se manifiesta como pérdida del agua de saturación.

Espacio intersticial: El volumen de los poros interconectados o espacio intersticial presente en una roca, que contribuye al flujo de fluidos o a la permeabilidad de un yacimiento. La porosidad efectiva excluye los poros aislados y el volumen de los poros ocupado por el agua adsorbida en los minerales de arcilla u otros granos. La porosidad total es el espacio intersticial total de la roca, sin importar si contribuye o no al flujo de fluidos. La porosidad efectiva normalmente es menor que la porosidad total.

Evaluación de riesgo: Es el resultado de la comparación y el análisis de las amenazas de un proyecto y la vulnerabilidad del medio ambiente, con el fin de determinar las posibles consecuencias sociales, económicas y ambientales que este puede producir.

Exploración o prospección: Es la actividad consistente en perforar un pozo profundo en el suelo, mediante métodos manuales o mecánicos, a profundidades variables para obtener aguas subterráneas.

Fallas anticlinales: En los anticlinales las capas se curvan inicialmente hacia arriba, de tal manera que, considerando una secuencia de capas, las más antiguas ocupan el centro de la estructura, es decir su núcleo.

Fallas sinclinales: En los sinclinales, por el contrario, las capas se curvan inicialmente hacia abajo, de tal manera que al observar una secuencia de capas, las que ocupan el núcleo son las más recientes. En la Figura 1a, se observa una estructura anticlinal y en la Figura 1b, una estructura sinclinal.

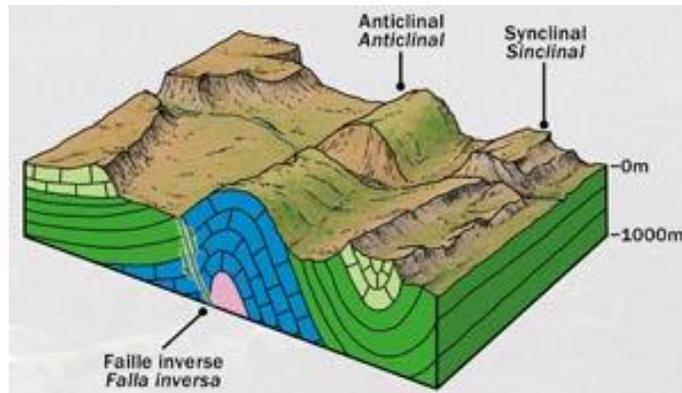


Figura 3. Fallas sinclinales y anticlinales; **Fuente:** <http://juanmontessori.blogspot.com/2012/08/1-eso-la-estructura-interna-de-la-tierra.html>

Fuentes sismogénicas: Se entiende así, a las fuentes de terremotos con características sísmicas y tectónicas homogéneas, pueden estar constituidas por una o varias estructuras tectónicas; sus límites geográficos quedan definidos por la distribución de epicentros.¹³

Gradiente hidráulico: Gradiente hidráulico es la pendiente del nivel freático y se determina midiendo la diferencia de elevación entre dos puntos del nivel freático dividida por la distancia entre esos puntos.

Intersticio: Espacio hueco entre los granos de una roca o suelo, los cuales pueden estar total o parcialmente llenos de agua.

¹³ <http://www.arqhys.com/contenidos/fuentes-sismogeneticas.html>

Impacto ambiental: Cualquier alteración en el sistema ambiental físico, químico, biológico, cultural y socioeconómico que pueda ser atribuido a actividades humanas relacionadas con las necesidades de un proyecto.

Isopiezas: Son las líneas que señalan los puntos a una misma altura piezométrica de cada una de las porciones de un acuífero referidas a una determinada profundidad; en los acuíferos libres, la superficie piezométrica coincide, a grandes rasgos, con la superficie freática, es decir, con el límite de saturación. En los acuíferos confinados la superficie piezométrica es más elevada que el techo de los mismos. En los acuíferos permeables por fisuración y/o karstificación y, en general, en acuíferos muy heterogéneos, puede ser una superficie discontinua.

Nivel potenciométrico: “El nivel potenciométrico es el término utilizado para referirse a la altura de la superficie del agua subterránea sobre el nivel del mar“(Hölting, 1996).¹⁴

Parámetros hidrogeológicos: Son las características hidráulicas y geológicas del acuífero y que es necesario tener en cuenta en un pozo perforado para establecer un diseño constructivo y operativo, para el aprovechamiento de las aguas subterráneas.

Permeabilidad: Es la facilidad mayor o menor de un material para permitir la circulación del agua, por tanto es la capacidad que tiene un medio poroso o

¹⁴ www.osso.org.co/docu/.../potenciometricos/CaliPotenciomJun00.pdf

material o capa acuífera para transmitir el fluido de agua bajo un gradiente hidráulico.

Piezometría: En mecánica de fluidos es el estudio de la compresibilidad de los líquidos. Trata sobre la medición de las presiones especialmente elevadas.

Porosidad primaria y secundaria: La porosidad primaria es la porosidad que se desarrolla al final de la sedimentación o que ha estado presente dentro de las partículas sedimentarias al tiempo de depositación. La porosidad secundaria se desarrolla en una roca después de su depositación, por procesos como la disolución o el fracturamiento. Generalmente, la porosidad secundaria es muy pequeña (1% a 2%).

Porosidad eficaz o efectiva: Es el volumen de espacio intersticial a través del cual el agua puede moverse.

Riesgo: Es usualmente vinculado a la probabilidad de que ocurra un evento no deseado. Generalmente la probabilidad de que ocurra dicho evento y algún asesoramiento sobre el daño que se espera de él deben ser unidos en un escenario creíble que combine el riesgo y las probabilidades.

Transmisividad: Caudal que fluye a través de una franja vertical del acuífero, de ancho unitario y altura igual al espesor del acuífero.

Viscosidad o viscosidad absoluta: Es la propiedad de un fluido mediante la cual se hace resistencia al corte y depende de las fuerzas de cohesión y la rapidez de transferencia de cantidad de movimiento entre moléculas.

Tensión efectiva: Es la fuerza normal repartida por unidad de área que se transmite de partícula a partícula en un agregado de partículas o rocas.

Vulnerabilidad: Es la incapacidad de resistencia cuando se presenta un fenómeno amenazante, o la incapacidad para reponerse después de que ha ocurrido un desastre. Por ejemplo, las personas que viven en la planicie son más vulnerables ante las inundaciones que los que viven en lugares más altos.

5.3 MARCO LEGAL

DESCRIPCIÓN LEGAL	FECHA DE EXPEDICIÓN	QUÉ REGLAMENTA	ENTIDAD EMISORA	VIGENTE O DEROGADA
Decreto ley 2811	1974	Determina prioridades para el aprovechamiento de las diversas categorías de recursos naturales	Presidente de la República	Vigente
Decreto 1449	1977	Fija las obligaciones de los propietarios de predios ribereños en relación con la conservación, protección y aprovechamiento de las aguas, asimismo con la conservación de bosques, suelos y demás recursos naturales renovables.	Presidente de la República	Vigente
Decreto 2858	1981	Determina las regulaciones para la explotación de las aguas subterráneas y obliga a la obtención de concesión para la explotación del RHS.	Presidente de la República	Vigente
Resolución 815	1987	Implementa un sistema de medición para la explotación del RHS.	Secretaria Distrital de Ambiente	Vigente
Ley 99	1993	Crea el Ministerio de Medio Ambiente, reordena el sector público de la gestión y conservación del medio ambiente y de los recursos naturales renovables y organiza el Sistema Nacional Ambiental, establece que las Corporaciones Autónomas Regionales son entes corporativos de carácter público.	El Congreso de Colombia	Vigente
Ley 142	1994	Establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios	MAVDT	Vigente
Ley 373	1997	Ahorro y uso eficiente del agua en Colombia	Presidente de la República	Vigente
Decreto 901	1997	Reglamenta las tasas retributivas por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de vertimientos puntuales y establece las tarifas de estas.	MAVDT	Vigente

DESCRIPCIÓN LEGAL	FECHA DE EXPEDICIÓN	QUE REGLAMENTA	ENTIDAD EMISORA	VIGENTE O DEROGADA
Resolución N° 250	1997	Determina anual los niveles estáticos y dinámicos y el monitoreo fisicoquímicos de las aguas.	Secretaria Distrital de Ambiente	Vigente
Resolución 815	1997	Por la cual se fija un término para la implementación de medidores en los pozos de extracción de aguas subterráneas	Secretaria Distrital de Ambiente	Vigente
Decreto 155	2003	El cual define la metodología para determinar la tasa por uso de las Aguas Subterráneas	MAVDT	Vigente
Resolución 1391	2003	Adopta los formatos que se deben diligenciar para adelantar trámites ante la SDA para obtención o prorroga de una nueva concesión de agua.	Secretaria Distrital de Ambiente	Vigente
Resolución 240	2004	Determina la tarifa mínima para el cobro de la tasa por uso	MAVDT	Vigente
Resolución 1148	2005	Mediante la cual se acoge la tarifa mínima para aplicación en el Distrito.	Secretaria Distrital de Ambiente	Vigente
Decreto 1220	2005	Establece que la licencia ambiental se otorga por la vida útil del proyecto, obra o actividad	Presidente de la República	Derogado
Decreto 2820	2010	Reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales	Presidente de la República	Vigente
Resolucion 068	2005	Adopta MAGNA-SIRGAS como único datum oficial de Colombia.	IGAC	Vigente
Decreto 1575	2007	Establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano	MAVDT	Vigente

Tabla 1. Relación de las principales normas legales de referencia; **Fuente:** Autores

5.4 MARCO HISTÓRICO

Los primeros reportes que relacionan los hundimientos del terreno con la extracción de agua fueron realizados por R. Fuller en 1908 (Poland, 1984). El primero en tratar de explicar científicamente el proceso fue Terzaghi (1925) quien propone una ecuación de consolidación unidimensional. Dicho trabajo fue retomado por Meinzer (1928) quien reconoció que la extracción de agua del almacenamiento de un acuífero se debe a la compresión del mismo y que la disminución del almacenamiento puede ser permanente (inelástica) o recuperable (elástica).

Las primeras observaciones son realizadas por Rappley y Tibbets en 1933 (citados en Poland e Ireland, 1988) en el Valle de Santa Clara en California. Posteriormente, T. Althouse asoció la extracción de agua con hundimientos en el valle de San Joaquín en California en 1935 (en Evans, 1986). En México, Nabor Carrillo desde la década de 1950 reconoció que la subsidencia está asociada a la extracción de agua subterránea del gran paquete arcilloso de origen lacustre de la Cuenca de México (Marsal y Mazari, 1959).

En la ciudad de Bogotá este proceso se ha venido estudiando desde los años 90 y el INGEOMINAS de la época, ahora Servicio Geológico Colombiano, 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 proceso de subsidencia en la ciudad de Bogotá”¹⁵

El hundimiento de Bogotá se discute desde hace unos veinte años en foros sobre geotecnia de la Sabana, en la actualidad existen estudios de “pérdidas importantes de presión del agua subterránea por efecto de su extracción en municipios al occidente de la ciudad”¹⁶; algunos referenciados en el Plan De Manejo Ambiental de aguas subterráneas de la sabana de Bogotá y Zona Critica (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR 1998), donde se advierten de descensos significativos del nivel del agua subterránea y del nivel freático.

“Esto también ha sido notorio en la zona urbana. Hace algunos años varias casas tenían aljibes mediante los cuales extraían el líquido; hoy la mayoría han sido explotados en su totalidad. Por esta razón, es necesario perforar más profundo.

Pero, si la extracción no se acompaña de una infiltración natural de agua lluvia que recargue el acuífero (que es el suelo o la roca donde esta se almacena), se reducen las presiones en los niveles de extracción.”¹⁷

¹⁵ Estudio de modelación geotécnica del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá D.C, Pg. 8

¹⁶ <http://www.sogeocol.edu.co/documentos/cuencap7.pdf>

¹⁷ <http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/ndetalle/article/suelos-arcillosos-de-bogota-proclives-al-hundimiento.html>

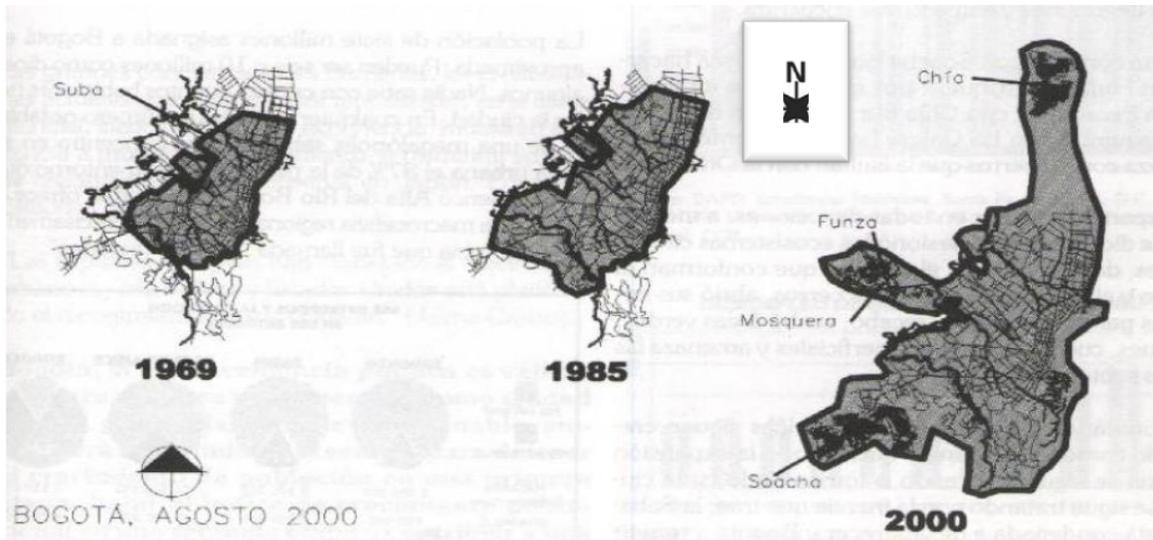


Figura 4. Crecimiento Urbano, Ciudad de Bogotá, 1969-2000, POT. **Fuente:** Sociedad Geográfica Colombiana.

Entonces, el líquido de los estratos superiores tiende a descender para equilibrar las presiones del fondo. Cuando la extracción es excesiva o supera los caudales de recarga, el descenso de agua de los estratos superiores del suelo hacia los inferiores se refleja en reducciones de volumen o hundimiento del terreno.

5.5 MARCO TEÓRICO

“La subsidencia es definido como el hundimiento del terreno asociado a cambios que ocurren en profundidad”¹⁸. Es un proceso que afecta amplias extensiones de terreno, sin embargo, las zonas urbanas son más susceptibles a daños a causa de los movimientos del terreno debido a la infraestructura existente. El término “fenómeno” es transcripción directa de la bibliografía y no representa la posición del director por considerarlo inapropiado para el tema en estudio, siendo la palabra proceso, la que más genera identidad.

La explotación minera y la extracción de fluidos del subsuelo generan subsidencia, el cual es causante de grietas y hundimientos que deterioran los terrenos, el cual se debe básicamente a la extracción de un fluido en el subsuelo (que puede ser agua, gas, petróleo o vapor en las zonas geotérmicas). En la mayor parte de Latinoamérica este proceso es provocado por la extracción de agua, mientras que en ciudades como Houston y Dallas, la tradición petrolera es su principal causante.

El hundimiento del terreno es lento e imperceptible en los primeros años de extracción y por ello pasa desapercibido por mucho tiempo; sin embargo la tendencia cada vez más creciente de la explotación del agua subterránea, con tasas de extracción mayores a las de recarga de los acuíferos productores, imprime una característica importante a la deformación y que a su vez la hace evidente, la deformación producto de la extracción de agua subterránea es en parte irrecuperable. Al ser irrecuperable parte de la deformación que sufre el suelo, el efecto acumulativo que se observa en estratos de espesor importante deriva en hundimientos considerables de la superficie del terreno

Otros detonantes de este proceso son la compresión del manto acuífero, la disolución de materiales profundos, la construcción de obras subterráneas o de

¹⁸ POLAND. Joseph F., Guidebook to Studies of Land Subsidence due to groundwater Withdrawal, UNESCO.1984.Pág. 24

galerías mineras, la erosión del terreno en profundidad, el flujo lateral del suelo, la compactación de los materiales que constituyen el terreno o la actividad tectónica. Dentro de los riesgos naturales y antropogénicos que afectan al planeta, la subsidencia ocasiona deformaciones verticales a manera de grandes grietas, que pueden ir desde milímetros o incluso alcanzar varios metros, en periodos que oscilan desde minutos hasta años.

Las consecuencias no son inmediatas en la mayoría de los casos, pero “aunque generalmente este proceso natural no cobra vidas humanas, es causante de cuantiosos daños económicos, ya que afecta zonas industriales y urbanas con un riesgo latente para edificaciones, canales, conductos, vías de comunicación, así como todo tipo de construcciones asentadas sobre el terreno que se deteriora”¹⁹

La ciudad de Bogotá, la cual se formó sobre materiales de relleno sedimentario que constituyen la Formación Sabana y está rodeada por cerros de constitución rocosa de areniscas, arcillolitas y conglomerados, con suelos conformados de sedimentos y características asociadas al progresivo descenso del nivel potenciométrico regional generado por factores naturales, como capacidades de pérdida de humedad por condiciones como la ubicación geográfica, la altitud, el régimen de lluvias, el desecado y compactado del suelo, etc. y factores antrópicos como la extracción de agua subterránea, generan las condiciones para el agrietamiento y deformación del suelo en la ciudad.

El mecanismo de deformación más recurrente en la práctica y estudio de la ingeniería geotécnica es la imposición de cargas en la superficie del suelo, por metodologías utilizadas en la cimentaciones y construcciones, sin embargo la deformación puede presentarse no solo en respuesta a los incrementos de esfuerzos inducidos por cargas externas, sino por los cambios volumétricos de la fase líquida y de la fase gaseosa contenida en la masa de suelo, que contribuyen a la deformación y estos efectos pueden llegar a ser bastante considerables.

¹⁹ Justiciaambientalcolombia.org/2012/08/page/2/

“La subsidencia puede también estar asociada a procesos tectónicos y de consolidación de sedimentos arcillosos, como es el caso de los deltas, donde las tasas de material depositado suponen una carga creciente sobre el sustrato, produciéndose movimientos verticales de reajuste. Las turbas (depósitos no consolidados de restos vegetales descompuestos) sufren frecuentemente subsidencia por disminución del contenido de agua o por cargas externas, dada su elevada compresibilidad”²⁰

En la naturaleza el recurso agua no existe en todo lugar donde se necesita y en ocasiones la disponibilidad es por líquido contaminado o con propiedades no aptas para su uso. La erosión, las inundaciones y la sequía afectan la calidad y cantidad de agua, lo que cada año origina pérdidas a propiedades en gran medida por no utilizar de manera apropiada el medio ambiente y sus elementos.

El suelo como formación natural por el paso de los años se han consolidado y por lo tanto las propiedades de resistencia tanto en dirección horizontal son diferentes a las propiedades de resistencia verticales. Hoy en día estas condiciones son sometidas a nuevos escenarios derivados del cambio drástico de entornos físicos por actividades antrópicas que utilizan los recursos naturales por demanda global, mantienen la presión sobre el suelo y agua con sobre explotación de estos. El cambio climático que sufre el planeta también influye en las condiciones sistemáticas que regulan el ciclo hídrico y terminan afectando los medios físicos y la constitución del suelo.

5.5.1.1 Principales causas de procesos de subsidencia

El impacto de este proceso está en función del tipo de sedimentos, su espesor y de la dimensión del declive en el nivel freático, “hay materiales principalmente susceptibles a los procesos de subsidencia, como los suelos orgánicos, los

²⁰ GONZALEZ DE VALLEJO, Luis; FERRER, Mercedes. ORTUÑO, Luis. Ingeniería Geológica Pearson Educación S.A. Madrid. 2004. Pág. 658

rellenos no compactados y los suelos de regiones frías que permanecen congelados por debajo de la superficies” los principales tipos son:

5.5.1.2 **Descenso del nivel freático**

La extracción de agua en acuíferos o periodos de sequía afecta los “materiales no consolidados, generando cambios en el estado tensionar (Se incrementan las tensiones efectivas al disminuir la presión intersticial), reduciendo su volumen, con descenso de la cota de superficie; Son procesos lentos, pero pueden afectar a grandes extensiones”²¹

5.5.1.3 **Subsidencia natural**

Se presenta cuando áreas regionales de “roca competente que son de poca plasticidad”²², se deprimen por asiento a lo largo de fallas importantes. Cuando el asiento es súbito, la subsidencia está asociada con terremotos mayores.

5.5.1.4 **Existencia de materiales solubles**

La sal, el yeso y las rocas con alto contenido de carbono (limolitas y dolomitas) son materiales que pueden estar asociados con subsidencia, dependiendo en parte del grado de solubilidad, “estructura del suelo”²³ y en parte por otras propiedades físicas. El colapso de rocas solubles o la compresión de rocas débiles y suelos son causas principales de subsidencia natural. Además de la subsidencia tectónica, la causa última de subsidencia es normalmente la insuficiente capacidad portante del sustrato de los suelos y rocas sobre yacentes. “La roca soluble más corriente es la caliza, una roca compuesta por carbonato cálcico”²⁴. Con el tiempo, el agua se filtra a través de las grietas existentes en las rocas y percola hacia abajo, mientras disuelve la roca y crea huecos cada vez mayores. Estos factores

²¹ GONZALEZ DE VALLEJO, Luis; FERRER, Mercedes. ORTUÑO, Luis. Ingeniería Geológica Pearson Educación S.A. Madrid. 2004. Pág. 656

²² W, Farmer. Propiedades Elásticas de las Rocas.1968 Pág. 81

²³ JORDA LOPEZ, Antonio. Manual de Edafología.2005 Pág. 65.

²⁴ GALAN, Carlos. Disolución y Génesis del Karst en Rocas Carbonáticas y Rocas Silíceas. 1991. Pág. 46.
<http://www.aranzadi-zientziak.org/fileadmin/docs/Munibe/1991043072CN.pdf>

están en consecuencia relacionados con la velocidad de circulación de las aguas y con las características del acuífero.

5.5.1.5 Procesos de erosión mecánica sub-superficial

Se denomina así al proceso en el cual se crean canales temporales de flujo sub-superficial en materiales fiabiles o no consolidados, que pueden llevar al colapso superficial. El agua, que transporta granos de arena encuentra una salida a lo largo de las paredes de las rocas y taludes o internamente en cuevas, galerías de explotación minera o perforaciones. La erosión deteriora y aumenta el tamaño de túneles al interior del material, los cuales intersecan el flujo vertical de agua; en la medida que el aumento de tamaño de los túneles y su propagación hacia arriba reducen la capacidad de soporte de los materiales superficiales, la superficie del terreno colapsa produciendo huecos a veces de grandes dimensiones y profundidad importante.

5.5.1.6 Flujo lateral

Materiales tales como la sal, el yeso y las arcillas son susceptibles de sufrir flujo plástico. En ocasiones rocas competentes super yacen estos “materiales que al fluir plásticamente”²⁵ permiten el descenso de los materiales rocosos.

5.5.1.7 Hidrocompactación

Se refiere a la pérdida de volumen de depósitos sedimentarios de baja densidad y que puede ser inducida por carga (colocación de rellenos sobre el terreno natural, emplazamiento de estructuras de gran tamaño y/o peso), o “aumento de energía de compactación”²⁶, drenajes (abatimiento de la tabla de aguas mediante drenaje artificial), vibración (natural durante sismos o inducida por la acción de taladros, generadores, tráfico pesado, hincado de pilotes y explosiones), extracción de fluidos bajo ciertas condiciones, aplicación de agua (hidrocompactación, que se

²⁵ RESTREPO VILLALAS, Carlos. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. México: Limusa, 1979. Pág.53

²⁶ RESTREPO VILLALAS, Carlos. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. México: Limusa, 1979. Pág. 85

ha detectado en estratos de baja densidad depositados en áreas de bajas precipitaciones, que pierden volumen una vez son humedecidos). Otros procesos incluyen el ablandamiento o eliminación de materiales tales como arcilla y calcita, que actúan como cementos fortaleciendo y mejorando el soporte del suelo cuando está seco. El loess (Limos depositados por el viento) y los suelos derivados de sedimentos de antiguos lagos presentan susceptibilidad a la compactación.

5.5.1.8 **Por carga**

La construcción pueden llevar a que el suelo se hunda rápidamente, esta subsidencia se produce por una reducción gradual “de las distintas partículas y poros del suelo”²⁷. Otro tipo es la asociada a la preparación de sitios para el desarrollo de construcciones y se refiere al impacto de las excavaciones, el abatimiento del nivel freático y el drenaje de las aguas subsuperficiales, las actividades de pilotaje, entre otras situaciones, que pueden destruir el balance del suelo alrededor del emplazamiento de la construcción a diferencia de la subsidencia que se puede generar por la extracción de agua subterránea, que puede tardar tiempo en detectarse.

²⁷ JORDA LOPEZ, Antonio. Manual de Edafología.2005 Pág. 55.



Fotografía 1. Hundimiento malla vial por emplazamiento de una construcción; Fuente: Ana María García /Diario EL TIEMPO Crra 11 con calle 98. Año 2013 Marzo 20



Fotografía 2. Hundimiento pavimento por construcción. Fuente: Diario EL TIEMPO emplazamiento de una Carrera 11 con Calle 98.

5.5.1.9 Tectónica

Desplazamientos verticales que afectan áreas de cientos de kilómetros cuadrados por desplazamientos de placas tectónicas. Es más gradual y no asociada a

terremotos mayores, también tiene importantes implicaciones para las viviendas e infraestructuras de las ciudades.

Los rellenos antrópicos compuestos por suelo, roca y escombros son también propensos a subsidencia durante los temblores y terremotos. Algunas veces la subsidencia ocurre cuando los terrenos no están bien compactados y en ocasiones pueden incluir materiales degradables tales como basura, la cual eventualmente se destruye y crean huecos.

5.5.1.10 **Subsidencia por Minería.**

“La subsidencia minera ocurre cuando grandes huecos subterráneos han sido creados por el hombre; Incluso las minas más profundas pueden ocasionar eventualmente un efecto de depresión local de la superficie del terreno, la mayoría de minas metálicas ocasionaran subsidencia dentro de un pequeño entorno porque el depósito mineral esta generalmente vertical o al menos restringido bajo una reducida área superficial.”²⁸

5.5.1.11 **Los peligros de la subsidencia**

El peligro potencial para la vida en los sucesos habituales es prácticamente inexistente. A continuación se citan algunos ejemplos de daños frecuentes:

- Destrucción física y daños por asiento diferencial y fisuras en el terreno, que se desarrollan frecuentemente en un área subsidente.
- Invasión del agua sobre las tierras bajas adyacentes al mar, lagos o ríos.
- Cambios en el gradiente que afecta al flujo de agua en canales, drenajes construidos por el hombre, tuberías y líneas de alcantarillado.
- Colapso de tuberías de pozos de petróleo y agua.
- Pérdidas y filtraciones de rellenos, canales y embalses.

²⁸ NUHFER, Edwar. Guía Ciudadana de los Riesgos Geológicos. 1997. Pág. 119

- Contaminación de abastecimientos de agua subterránea por contaminantes de superficie que viajan a través de conductos y fisuras producidas por subsidencia.

No existe un medio práctico para invertir, parar o retardar el hundimiento tectónico natural. “Una vez la subsidencia de la tierra inducida por el hombre ha sido detectada, las medidas correctivas solo pueden retardar o parar el hundimiento; solamente una parte de la elevación de la superficie perdida puede ser recuperada.”²⁹

5.6 PRINCIPALES MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA

A continuación se exponen los principales métodos de perforación y nuevas técnicas que se están empleando en este ámbito para la extracción del recurso hídrico del subsuelo.

Se lleva a cabo la operación de perforar, levantando y dejando caer con regularidad una pesada sarta de herramienta dentro del agujero que se va abriendo. El barrenado fractura o desmorona la roca dura y la convierte en pequeños fragmentos. Durante el proceso las partículas desprendidas se entremezclan con agua, (la que debe ser agregada sino se encuentra presente en la formación que se está penetrando). El lodo formado por las partículas desprendidas y el agua deberá ser extraído mediante una bomba de arena o una cuchara con la finalidad que la columna de lodo formada no amortigüe la caída de las herramientas y retarde la velocidad de perforación.

29. GONZALEZ DE VALLEJO, Luis; FERRER, Mercedes. ORTUÑO, Luis. Ingeniería Geológica Pearson Educación S.A. Madrid. 2004, Pág. 658

- Método de Percusión.

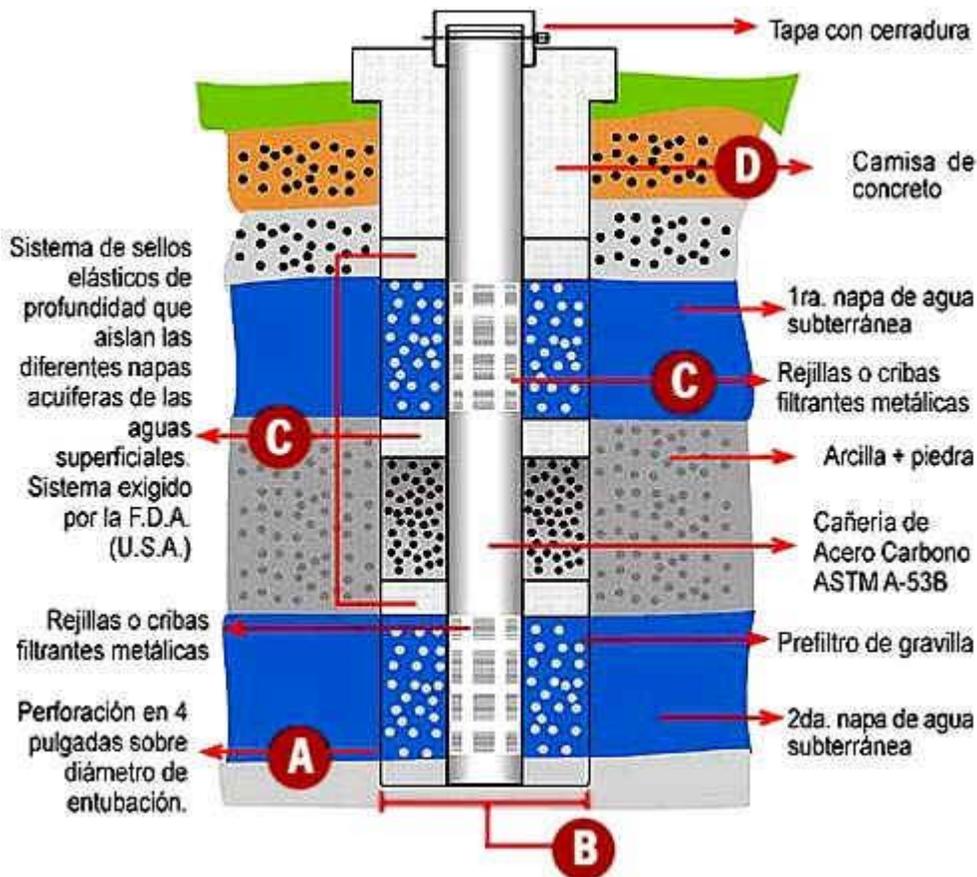


Figura N° 5: Captación de agua por método de percusión, **Fuente:** <http://www.miliarium.com/proyectos/estudioshidrogeologicos/Memoria/Captaciones/PozosVerticales.asp>.

5.6.1 Método Rotativo

Consiste en o cavar un agujero mediante la acción rotatoria de un trépano y remover los fragmentos que se producen con un fluido que continuamente se hace circular, conforme el trépano penetra en los materiales de la formación.

Cuando se utiliza el sistema rotativo las bombas seleccionadas y el compresor deben proporcionar una adecuada circulación de retorno para los fluidos de acuerdo a la velocidad de ascenso del material perforado y una buena ejecución del trabajo en relación a la viscosidad de los fluidos y al diámetro perforado.

5.6.2 Nuevas técnicas para la exploración del recurso hídrico

La mayoría del agua de los pozos subterráneos se extrae entre 200 y 400 metros de profundidad. En el mundo, con tecnologías avanzadas, se explora el recurso a más de 2.000 metros de profundidad, en capas o mantos de roca fracturados, donde se ubica el líquido con sondeos satelitales y se extrae con sistemas parecidos al de la explotación del petróleo. Esta técnica según expertos, cuesta más que la tradicional, y hasta ahora no se conoce su impacto ambiental.

6 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE BOGOTÁ

La ubicación espacial del proyecto se encuentra enmarcado 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.”³⁰

La caracterización e identificación de los suelos capitalinos es compleja y variable debido su gran longitud pero el común denominador es presencia de “arcillas plásticas color gris oscuro, en estratos de 0.40 m a 1.0 m de espesor, con interestratificaciones 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.”³¹

³⁰ Estudio de modelación geotécnica del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá D.C"
Pg. 5

³¹ Estudio de modelación geotécnica del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá -
FOPAE



Fotografía 3. Hundimiento Esquina nororiental de la Torre City Bank, **Fuente:** Evaluación de asentamientos por consolidación generada por descenso del nivel freático. 2011. Pág. 32

El sector de la Calle 100 entre Carreras 8 y 10 se caracteriza por la presencia de suelos arcillosos de la Formación Sabana de consistencia media firme a blanda, subyacidos por estratos granulares de densidad compacta a muy compacta producto de la meteorización y transporte de las rocas de la Formación Guadalupe que conforma los cerros orientales.

6.1 GEOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA Y GEOTECNIA³²

Durante el Plioceno tardío y antes del último levantamiento de la Cordillera Oriental se formaron algunos lagos tectónicos, la mayoría situados a 2.600 m.s.n.m. El más importante fue el lago Humboldt, que cubrió la actual Sabana de Bogotá hasta hace aproximadamente 40.000 años, cuando empezó a reducir su tamaño; durante este nuevo proceso formo un sistema hídrico de abundantes humedales, pantanos y ríos que fueron los afluentes del que hoy conocemos como río Bogotá, este gran lago se redujo y desapareció finalmente por su “desagüe” a

32

través del salto de Tequendama durante el periodo Pleistoceno y algunas secciones erosivas constituidas en los Cerros Orientales, por este proceso se formaron suelos lacustres compuestos por materiales finos como arcillas y limos, establecido una altillanura con características de superficie plana en toda su extensión.

De acuerdo a las características y componentes geológicos de Bogotá, podemos nombrar y definir los más importantes como lo son:

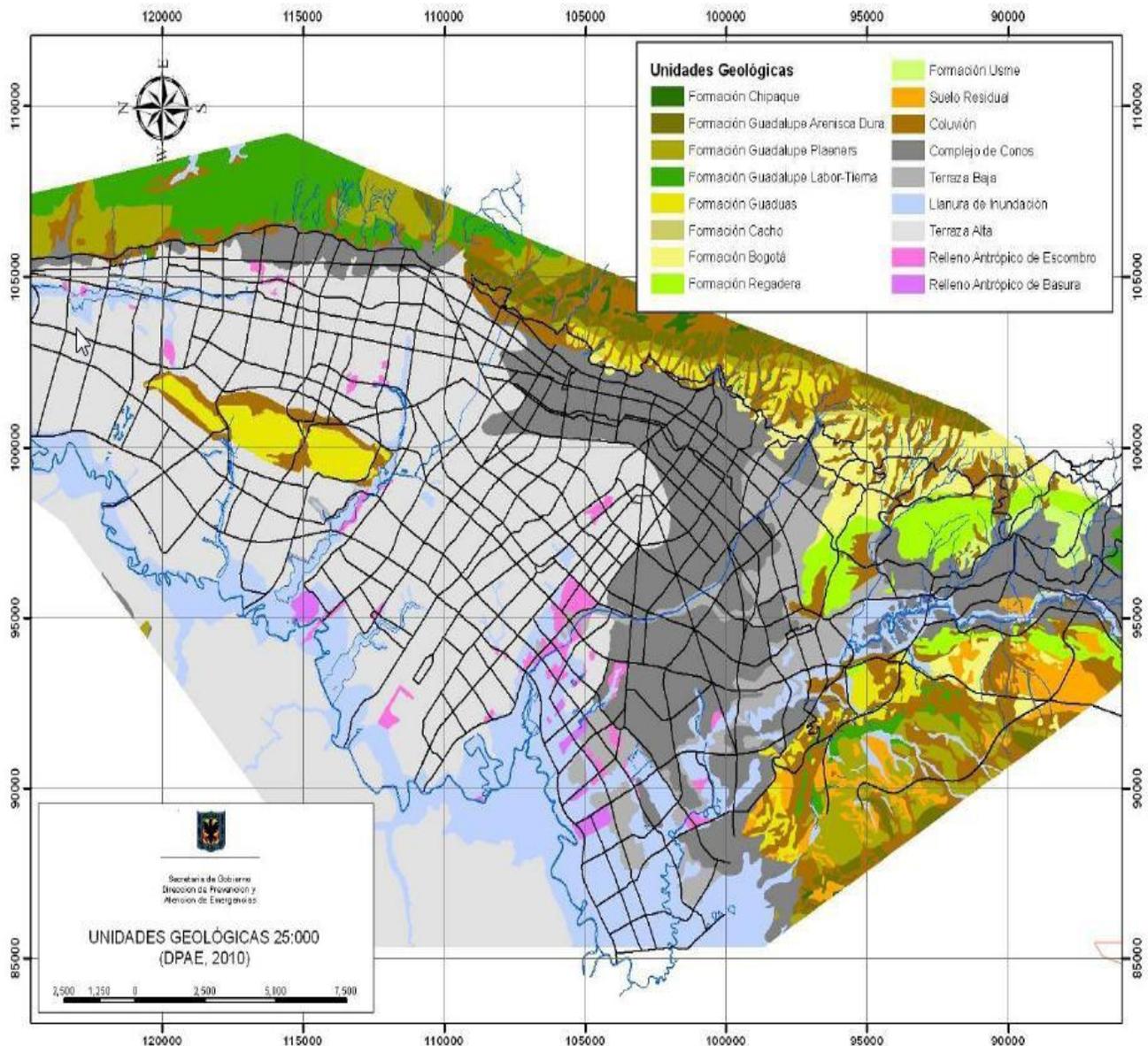


Figura 6. Mapa geológico de Bogotá, Fuente: FOPAE, 2010.

6.1.1 Depósitos aluviales (Otb -Terrazas Bajas: Qta -Terrazas altas)

Los afloramientos son escasos y su delimitación se realizó exclusivamente con base geomorfológica. Algunos de los afloramientos están constituidos por limos y arenas.

6.1.2 Coluvión (Qdp)

Son los depósitos productos de la fracturación, meteorización y erosión de rocas preexistentes, que han tenido transporte por acción del agua y de la gravedad y se han depositado en las partes media e inferior de las laderas. Sus mejores afloramientos se presentan en los piedemontes oriental, suroriental y suroccidental de área.

6.1.3 Suelo Residual (Qrs)

Es el material producto del intemperismo de las rocas y son importantes por su espesor, hasta de 10m, en la parte suroeste. Por tratarse de suelos predominantemente arcillosos, su permeabilidad es baja y su comportamiento geomecánico pobre.

6.1.4 Rellenos de excavaciones (Qr)

Son los depósitos que han resultado de acciones antrópicas para la adecuación de terrenos en el desarrollo urbanístico, principalmente en zonas pantanosas y deprimidas, donde el material utilizado es el sobrante sacado de las excavaciones. Estos depósitos abundan principalmente en los alrededores de Guaymaral, Aeropuerto El Dorado, Autopista Norte y Norte de Bosa.

6.1.5 Formación Sabana (Qs)

Se caracteriza porque constituye la mayor parte de la superficie plana; Geomorfológicamente corresponde al nivel de terraza alta. Consta de arcillas

plásticas de color gris oscuro, en estratos de 0.4 a 1.0 metro de espesor, con interestratificaciones 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. Sus niveles arenosos y de gravas son importantes para el almacenamiento de agua. El espesor total alcanza los 320 m.

6.1.6 Formación Mondoñedo

Cubren grandes áreas en la parte inferior de las pendientes y los fondos de los valles. Generalmente están por encima de (o encajonados) en las arcillas de la formación Balsillas o reposan directamente sobre el substrato rocoso. Son el horizonte superior de la cobertura de suelos original de la ladera y aflora en zonas no intervenidas por la actividad extractiva.

6.1.7 Formación Chía

La formación Chía está sobre los sedimentos de la formación Río Tunjuelo o formación Sabana, afloran a lo largo de los ríos principales que generalmente están por debajo de las llanuras de inundación de los ríos.

6.1.8 Formación Chipaque (ksch)

Constituida por lutitas limo-arcillosas de color negro, carbonosas, piritosas y laminadas, en bancos hasta de 10 metros de espesor, con intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano muy fino, en estratos de 0.1 a 0.2 metros, que se acentúan hacia el tope. En los anticlinales de Bogotá, la parte que aflora tiene 130 metros de espesor.

6.1.9 Grupo Guadalupe (Ksg)

Se encuentra conformada por areniscas cuarzosas, blancas a amarillentas por alteración, grano fino a muy fino, con estratificación muy delgada a gruesa, intercalada esporádicamente con limolitas silíceas y arcillolitas de color gris claro,

al occidente de la Sabana las areniscas son más lodosas y se reporta un espesor de 320 metros, mientras que al oriente tiene un espesor de 407 metros. En el área de Bogotá se reporta un espesor de 450 metros en el cerro del Alto del Cable.

6.1.10 Formación Plaeners (Ksgp)

Conformada por secuencias monótonas de arcillolitas, limolitas silíceas, chert fosfático con intercalaciones de capas delgadas de areniscas de grano muy fino, areniscas fosfáticas y fosforitas con abundantes foraminíferos bentónicos, es típica la partición ortogonal prismática a manera de panelitas y el fracturamiento conchoideo de las limolitas silíceas.

6.1.11 Formación Arenisca Labor-Tierna (Ksglt)

Está conformada por secuencias en capas muy gruesas de areniscas cuarzosas y feldespáticas blancas a grises claras de grano fino a grueso y en ocasiones conglomeradas, intercaladas con capas delgadas de arcillolitas grises claras, se identifican estructuras sedimentarias internas como estratificación cruzada.

6.1.12 Formación Guaduas (Tkg)

La parte superior de este segmento constituye un conjunto de areniscas de grano fino con estratificación plano paralela y conglomerados de intraclastos, la cual conforma el nivel de Arenisca Lajosa que compone el conjunto arenoso más destacado de la formación.

6.1.13 Formación Cacho (Tpc)

Aflora a lo largo del piedemonte oriental de Bogotá, haciendo parte del flanco occidental del anticlinal de Bogotá. Litológicamente está constituida por areniscas de color amarillo rojizo, de grano grueso, con estratificación cruzada, en estratos de 0.1 a 2.0 metros, es importante como acuífero y sus arenas se explotan como material de construcción.

6.1.14 Formación Bogotá (Tpb)

Aflora en los flancos del sinclinal de Usme-Tunjuelito. Consta de dos conjuntos:

El inferior constituido por alternancia de arcillolitas y areniscas cuarzosas-feldespáticas, gris verdosas, de grano fino hacia la base y grueso hacia el tope, con un espesor de 620 metros.

El conjunto superior constituido por arcillolitas gris oscuro, gris verdoso y marrón, por meteorización; su espesor sobrepasa los 100 metros. Las arcillas como producto de meteorización se utilizan para la fabricación de ladrillo, teja y tubería y como lechos impermeables para depósitos de basura.

6.1.15 Formación Arenisca de la Regadera (Tir)

Aflora hacia la parte media en las laderas del Valle de río Tunjuelito, haciendo parte del sinclinal Usme -Tunjuelito. Está constituida por capas de areniscas de cuarzo y fragmentos líticos, de color gris claro, con abundante matriz arcillosa e intercalaciones de arcillolitas de color gris claro a oscuro, blandos y plásticas, las cuales predominan hacia el tope de la unidad. Su espesor es de 360 metros. Sus arenas son importantes como material de construcción; tiene poca importancia como acuífero por su alto contenido y constitución arcillosa.

6.1.16 Formación Usme (Tiu)

En general la secuencia se compone por lodolitas grises claras, con esporádicas intercalaciones de areniscas de cuarzo y feldespatos, finas, en capas medias paralelas, se definen dos niveles, el inferior de 100 metros compuesto por arcillolitas cafés y grises y el miembro superior de 200 metros compuesto por arcillolitas limosas coloreadas con intercalaciones de areniscas de grano fino a medio, al tope de la formación aparecen capas de lignito y restos de materia orgánica.

6.1.17 Formación Tunjuelo (QPt)

Aflora a lo largo del piedemonte oriental de Bogotá pero sus mejores afloramientos se presentan en el valle del río Tunjuelito, entre Yomasa y la Escuela de Artillería. Su litología está compuesta por bancos de Bloques, guijarros, guijos y gránulos de areniscas, limolitas, y chert, dentro de una matriz areno-arcillosa consolidada. Ocasionalmente se presentan intercalaciones de capas de arena y limo-arcilloso de aspecto lenticular y estratificación horizontal. Su espesor se estima en unos 100m. De esta unidad se extrae la gravilla de mejor calidad que existe en la Sabana de Bogotá y se utiliza como agregado para concretos de alta resistencia.

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 Limos, arcilla (Consolidada)		Alta
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	Medio Fisurado	Alta-Baja
		Formación Chipaque	Lutita fisil, arenisca		Baja

Tabla N° 2. Clasificación de acuíferos en el área de estudio EAAB-JICA (2009). **Fuente:** JICA.

Para Bogotá se realizó en el año 2010 El Estudio de Microzonificación Sísmica (FOPAE, 2010), basado en los principios de la mecánica de suelos e hidráulica, los cuales son fundamento para establecer las características de los suelos, y determinar sus propiedades como la presión del suelo³³, se ha actualizado y establecido la Zonificación Geotécnica para la ciudad, dividiendo en cinco unidades geotécnicas o zonas de “características geotécnicas homogéneas”³⁴, las cuales son la base de ramas de la Ingeniería Civil para el diseño de estructuras como edificios, puentes, vías entre otros.

6.2.1 Zonificación Geotécnica de la Ciudad de Bogotá

Los suelos de la ciudad de Bogotá están definidos en el decreto 523 de 2010 “Por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá” y se describen a continuación:

6.2.1.1 Zona 1: Cerros.

“Caracterizadas por la presencia de formaciones rocosas con capacidad portante relativamente mayor. Puede presentar amplificaciones locales de aceleración sísmica por efectos topográficos. Se presentan sectores inestables desde el punto de vista geotécnico. Las variables que inciden en dicha inestabilidad son las altas pendientes, las lluvias fuertes y prolongadas, las fuentes de aguas subterráneas o superficiales, los efectos relacionados con actividad antrópica, la eventualidad de sismos intensos”.³⁵

6.2.1.2 Zona 2: Piedemonte.

Accedidas por la zona de transición entre los cerros y la zona plana y constituye su formación especialmente de depósitos coluviales y conos de deyección de

³³ RESTREPO VILLALAS, Carlos. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. México: Limusa, 1979. Pág.339

³⁴ Fundamentos de ingeniería geotécnica – Braja M.

³⁵ Zonificación Sísmica de Bogotá, Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE) Coordinación de Investigación y Desarrollo, Pág. 60

materiales con una elevada capacidad portante en general, pero con estratigrafías heterogéneas con predominio de gravas, arenas, limos y depósitos ocasionales de arcillas de poco espesor.

6.2.1.3 Zona 3: Lacustre A.

Conformadas principalmente por depósitos de arcillas blandas con profundidades mayores de 50 metros. Pueden aparecer depósitos ocasionales de turbas y/o arenas de espesor intermedio a bajo. Presenta una capa superficial preconsolidada de espesor variable no mayor de 10 metros.³⁶

6.2.1.4 Zona 4: Lacustre B.

Poseen las mismas características de la Zona 3, pero los depósitos superficiales (Los primeros 30 a 50 metros) son consistentemente más blandos que los anteriores. Además, corresponde a la zona en que la profundidad hasta la roca base es del orden de 200 m hasta 400 m o más.³⁷

6.2.1.5 Zona 5: Terrazas y Conos.

Se presentan predominantemente en la zona sur de la ciudad y está conformada por suelos arcillosos secos y pre-consolidados de gran espesor, arenas o limos o combinaciones de ellos, pero con capacidad portante mayor que los depósitos de las zonas Lacustres A y B. También se presentan sectores donde predominan las arenas limpias, finas y superficiales, combinadas con la posibilidad de niveles freáticos altos, lo cual redundará en una alta susceptibilidad a la licuación ante la ocurrencia de un sismo intenso.

³⁶ Zonificación Sísmica de Bogotá, Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE) Coordinación de Investigación y Desarrollo, Pág. 50

³⁷ Zonificación Sísmica de Bogotá, Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE) Coordinación de Investigación y Desarrollo, Pág. 60

6.3 ASENTAMIENTOS DE INGENIERÍA CIVIL

El estudio de asentamientos del terreno inducidos por descensos del nivel freático, demanda la comprensión de conceptos básicos del campo de hidrogeología y de la geotecnia. En esta unidad se exponen los conceptos necesarios que permiten entender los mecanismos de flujo y deformación en los suelos.

El suelo formado por arcillas consolidadas al recibir todo el peso de las capas del suelo sobre ellas y al ser sometidas a una presión mayor que soportan por su constitución, es posible que sufran procesos de asentamiento debido a la nueva carga que deben resistir y por la expulsión del agua que desalojan de sus poros; Las arcillas presentan un nivel de permeabilidad muy bajo determinante y reflejando en asentamientos muy lentos o muy pequeños.

Los edificios y viviendas pueden desarrollar “asentamientos de contacto”³⁸ sobre el suelo al desplazar la masa de las mismas aéreas construidas al cambiar las presiones y esfuerzos en toda la cimentación, traduciendo en afectaciones por cargas y formación de asentamientos con diferente rapidez. En terrenos plásticos y elásticos las deformaciones pueden ser grandes produciendo que los terrenos se consoliden a la misma velocidad del terreno que lo circunda.

6.4 RECURSO HÍDRICO

El crecimiento exponencial poblacional y la expansión industrial han incrementado la necesidad de suministrar y distribuir agua en mayores cantidades y de mejor calidad, intentando encontrar fuentes alternativas de abastecimiento, nuevas tecnologías para su explotación, etc., sin medir los efectos a largo plazo del uso, a

³⁸ RESTREPO VILLALAS, Carlos. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. México: Limusa, 1979. Pág. 308

veces irracional, afectando el entorno natural, la cantidad y calidad del agua, la flora, fauna y llevando a la pérdida del suministro.

Las diversas formas y opciones de extracción del recurso hídrico benefician de manera desigual a diferentes tipos de usuarios. Los proyectos importantes como presas e hidroeléctricas afectan a una población en medida de su impacto ambiental, el uso de agua subterránea genera efectos ambientales menos conocidos pero igualmente relevantes los cuales no se han estudiado a profundidad. Las técnicas para la planeación adecuada del uso de los recursos naturales dependen directamente de la información apropiada y datos de los beneficios y efectos por uso de los recursos del medio ambiente.

Hemos dependido a lo largo de la historia de fuentes de abastecimiento superficiales como ríos o embalses, y aún con esta dependencia, la afectación antrópica a estos cuerpos de agua aumenta cada día por estar cerca de estos la colonización y centros de desarrollo urbano. Aun no se desarrollan a gran escala tecnologías de purificación y/o desalinización del agua marítima por sus altos costos respecto al agua dulce. El agua proveniente de la precipitación es de gran utilidad y de fácil acceso y tratamiento pero está condicionada por la temporada de lluvias, y se agudiza la problemática al no existir programas de incentivo para su captación y almacenamiento con usos dirigidos a actividades distintas al consumo humano.

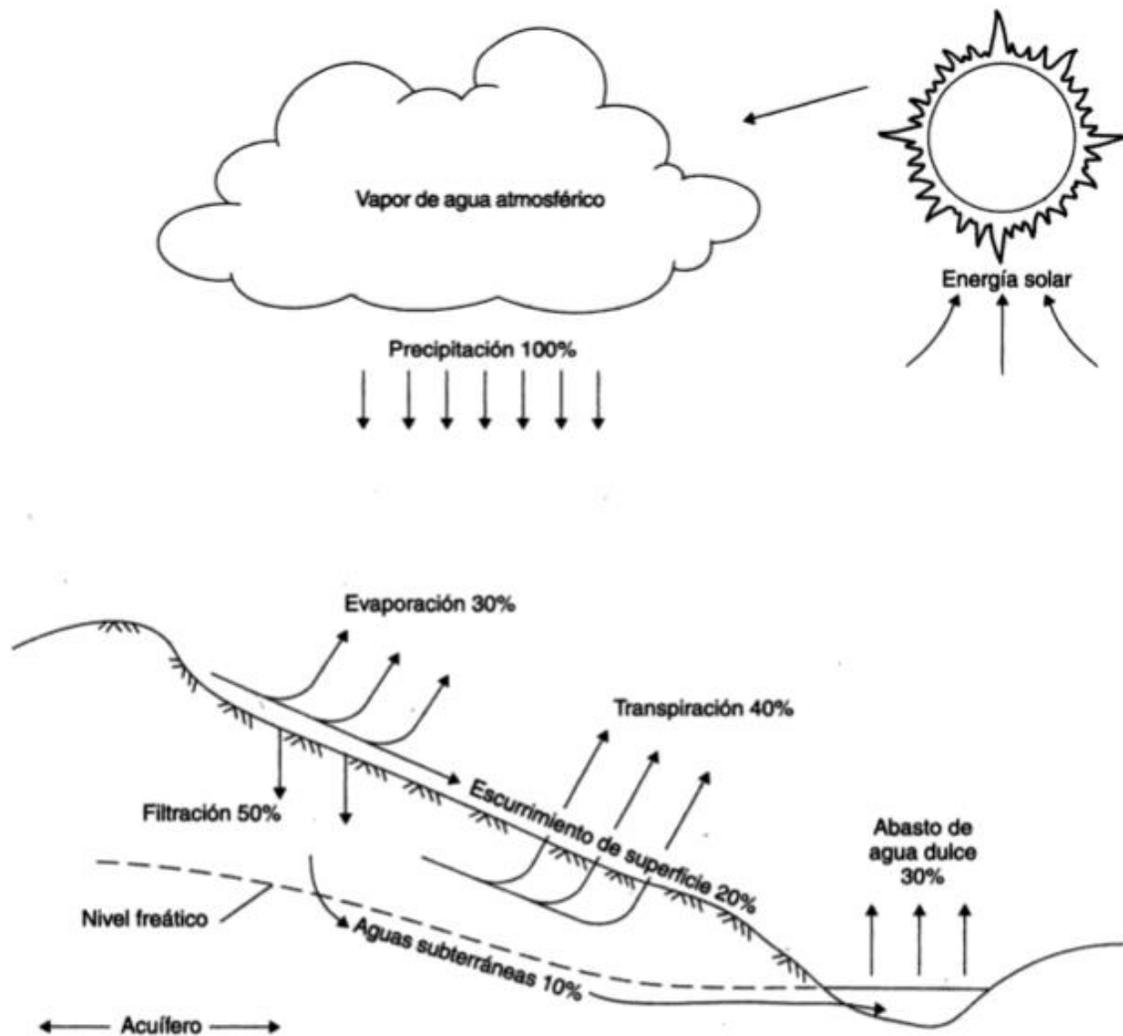


Figura 8. El Ciclo Hidrológico. Fuente: Ingeniería Ambiental. Gary W. Heinke

6.4.1 Agua Subterránea

El agua de lluvia se percola y llega a las capas subterráneas del suelo luego de reabastecer la capacidad de retención y almacenamiento del suelo, rápidamente es infiltrada y drenada al punto por debajo de la zona radical. El agua subterránea se desplaza muy lentamente a través de los materiales del subsuelo en dirección del drenaje dominante recargando acuíferos; si en la capa freática la altura no es inferior al lecho de la corriente de aguas, esta alimenta el caudal de las cuencas

hidrográficas, de esta forma realiza el agua subterránea un proceso de amortiguación de ríos y pozos disminuyendo el descenso de los niveles en épocas de sequías y siendo durante todo el año primordial para el ciclo del agua. Está directamente relacionada la filtración a la cantidad e intensidad de agua lluvia con la tasa de infiltración del suelo correspondiente, por condiciones de textura, porosidad del suelos además de la estabilidad de este y la conductividad a niveles inferiores.

La extracción del recurso se debe limitar y realizar a la velocidad de recarga de los acuíferos, impidiendo que el nivel freático descienda, donde al disminuir la cantidad de agua disponible aumentara proporcionalmente el costo de extracción del recurso natural, los acuíferos poco profundos se recargan más rápido que los que se encuentra a mayor profundidad y aquellos que se encuentran en área secas se demoran cientos de años para recargar, siendo estos considerados como no renovables.

En numerosas áreas donde falta el recurso hídrico para su conservación es primordial mantener las condiciones de infiltración del agua, minimizar la extracción y cuidar las corrientes y flujos naturales, en búsqueda de disminuir las problemáticas de seguridad alimentaria e hídrica, siendo esta una alternativa de protección de las cuencas y cultivos, con el objeto de mantener y mejorar las condiciones para riego y abrevaderos para animales, garantizar la subsistencia de la flora, fauna y su hábitat, el mantenimiento de la calidad de vida y el uso doméstico e industrial.

6.4.2 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.

6.4.3 **Acuífero Terciario**

El Acuífero Terciario constituido 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.

6.4.4 **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.

6.4.5 **Agua pluvial y superficial**

En Colombia "la Zona de Confluencia Intertropical fluctúa, aproximadamente, entre 0° de latitud, posición en la que se encuentra en enero-febrero y 10° de latitud norte, posición extrema que se puede alcanzar en julio-agosto."³⁹ El desplazamiento ocasiona que en la mayor parte de Colombia se presente, durante el año, un doble máximo y un doble mínimo de precipitaciones y, por supuesto, también de los demás elementos meteorológicos. Es decir, la Zona de Confluencia Intertropical, pasa por el centro de Colombia dos veces al año.

³⁹ <http://institutodeestudiosurbanos.info/endatos/0100/0110/0116-clima/index.htm>

6.4.6 Temporada de precipitación alta

Se presenta en la ciudad alta precipitaciones, una primera vez, entre abril y mayo, cuando se desplaza hacia el norte y ocasiona el primer período lluvioso que va acompañado de un pequeño descenso de las temperaturas medias, con una disminución de las temperaturas máximas y un aumento de las mínimas.

Una segunda vez, entre septiembre y octubre, cuando regresa de su posición norte más extrema, alcanzada en julio-agosto, y se dirige al sur, originando el segundo período lluvioso que es el más fuerte y que también se acompaña de un descenso de las temperaturas medias, disminución de las temperaturas máximas y aumento de las mínimas.

Según el mapa de Isopiezas (ver figura 9) son los Cerros Orientales el mayor receptor de estas lluvias y Asimismo se presentan altas precipitaciones en los cerros de Suba, en el sector del Jardín Botánico y el parque Simón Bolívar, y algunas zonas aledañas al canal de Fucha, todo esto validado con registros de la Secretaria del Medio Ambiente de los años 2009 a 2010 en las estaciones Pluviométricas de Guadalupe, Venado de Oro, El Bosque, Usaquén, Torca, Juan Rey.

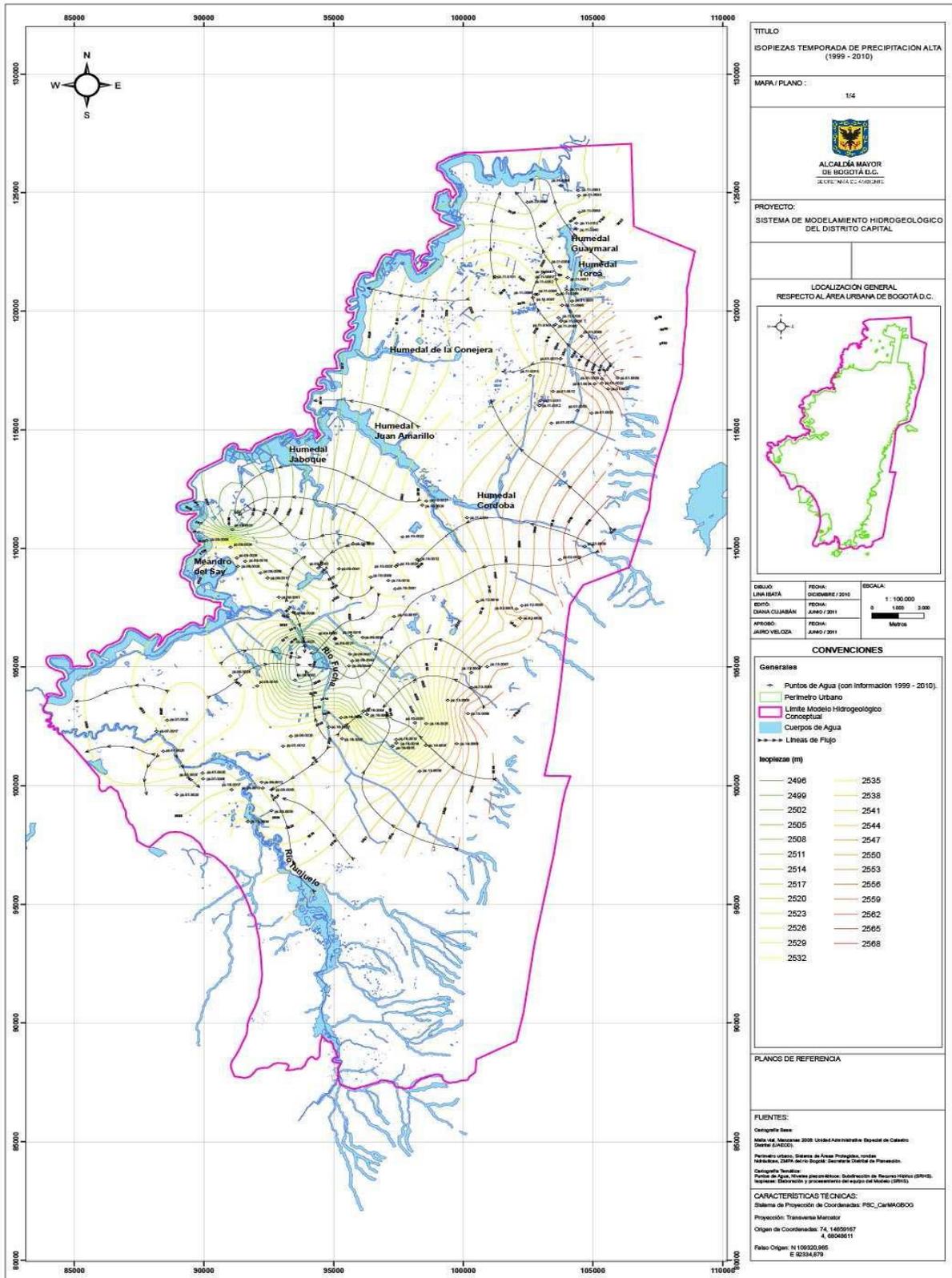


Figura 9: Mapa de Isopiezas temporada de alta precipitación 1999-2010, **Fuente:** Sistema de Modelamiento Hidrogeológico del Distrito Capital Bogotá, 2013.

Existen en la ciudad dos periodos de lluvias con precipitaciones intensas durante los meses de marzo, abril y mayo, al igual que en los meses de septiembre, octubre y noviembre, siendo estos últimos meses los que presentan los valores más altos.

6.4.7 Temporada de precipitación baja

Al ser un periodo bimodal, las temporadas secas y húmedas se alternan a lo largo del año. Se presentan dos periodos de lluvias con precipitaciones bajas, el primero en los meses de junio, julio y agosto, y el segundo periodo con los más bajos registros en los meses de diciembre, enero y febrero. Siendo la parte baja de la cuenca baja del río Tunjuelo y al occidente de la ciudad cerca del río Bogotá las de valores más bajos.

Los meses más secos son los de enero, febrero, marzo y diciembre; y los más lluviosos son Abril, Mayo, Septiembre, Octubre y Noviembre. En los meses intermedios se presentan variaciones en el régimen de sol y lluvia. La regularidad de estas condiciones es diversa por efecto de los cambios climáticos sucedidos en la Cuenca del Pacífico, especialmente por procesos climáticos denominados El Niño y La Niña.

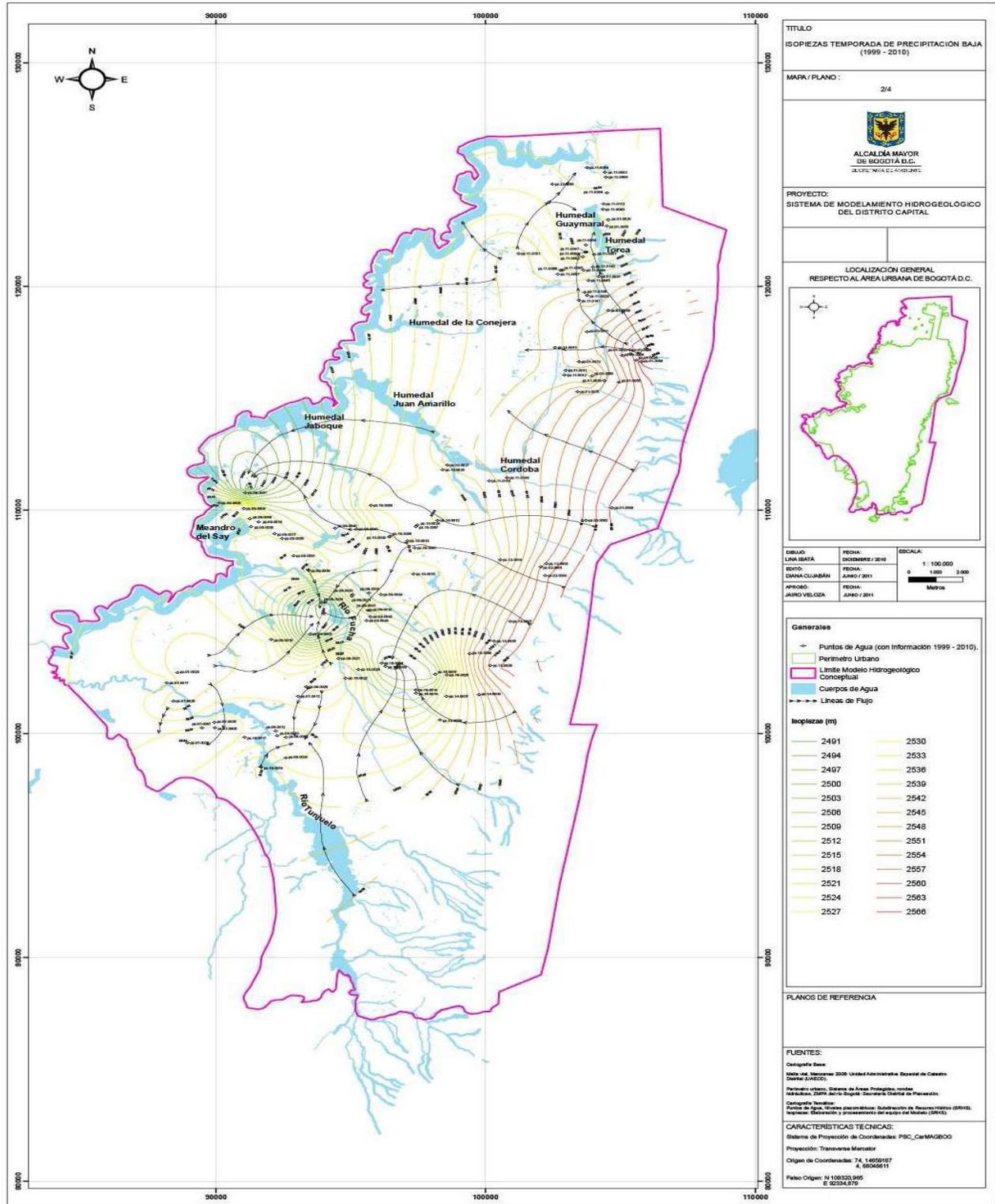


Figura 10. Mapa de Isopiezas temporada de baja precipitación 1999-2010, **Fuente:** Sistema de Modelamiento Hidrogeológico del Distrito Capital Bogotá, 2013.

En el mapa de Isopiezas, tanto en la temporada de precipitación baja (ver figura 10) como de la alta (ver figura 9) se puede observar como la distribución de la precipitación no es uniforme para toda la ciudad, esto se explica principalmente por la circulación de los vientos y por la topografía circundante a Bogotá. Caso específico el de los cerros orientales que actúan como una barrera natural restringiendo el flujo de humedad, alcanzando valores de humedad relativa media hasta del 80% en dicha zona, influyendo de manera directa sobre la frecuencia de las precipitaciones.

6.4.8 Hidrogeología de Bogotá

Existen dos tipos principales de flujos de agua subterránea. Un flujo regional proveniente de infiltración y recarga, en la zona de afloramiento de las formaciones Labor – Tierna y Arenisca Dura (zonas fracturadas). El agua se percola y se mueve hacia la parte de menor pendiente topográfica. Otro flujo de agua es el originado de la recarga sobre la formación Sabana, en la parte plana proveniente principalmente de las partes de contacto entre las rocas fracturadas al oriente de la ciudad.

De Noreste a Sureste el agua proveniente de la precipitación se infiltra hacia el oriente en inmediaciones de la Quebrada Aguas Claras hacia otra cuenca, desde el eje hacia el flanco occidental del anticlinal de Bogotá se presenta una recarga favorable a la cuenca de la jurisdicción del Distrito Capital, posteriormente favorecido por la inclinación de las capas el agua se percola a través de la Falla de Torca y fluye por los estratos permeables de la Formación Labor – Tierna hasta la Falla de Boquerón del Carbón.

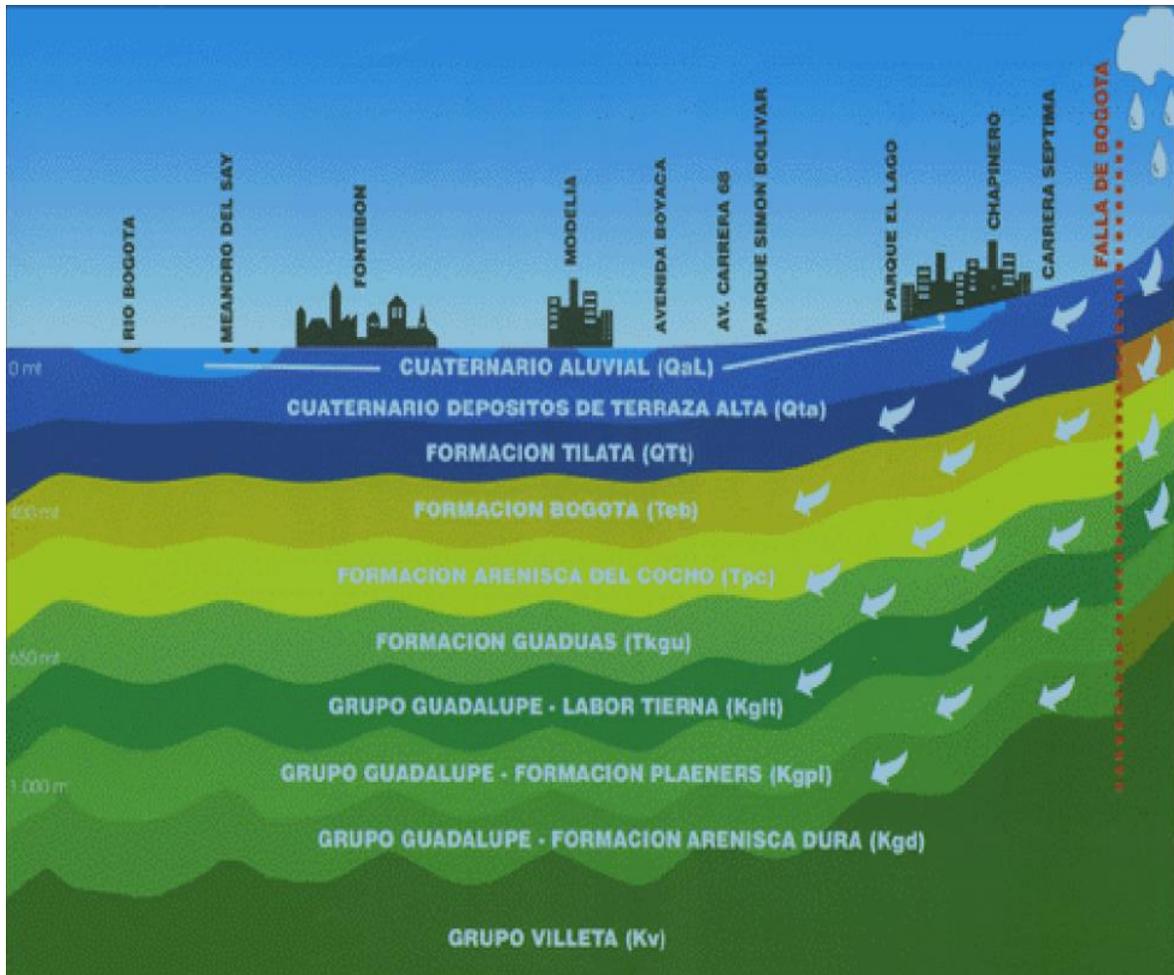


Figura 11. Perfil Hidrogeológico de Bogotá, **Fuente:** Análisis de los Parámetros Ambientales de Bogotá D.C.

El agua que proviene de la escorrentía y favorecida por el gradiente hidráulico se infiltra al oriente por la Formación Sabana y alimenta al Humedal Torca y Guaymaral. En el flanco oriental de la loma La Conejera el agua fluye por la Formación Guaduas conjunto medio a través de sus niveles permeables y alimenta a la formación Sabana con un extensión lateral limitada.

En el flanco Occidental de la loma La Conejera el agua favorecida por la pendiente topográfica se infiltra por los niveles arenosos de la Formación Sabana y tiene una dirección hacia el Oeste.

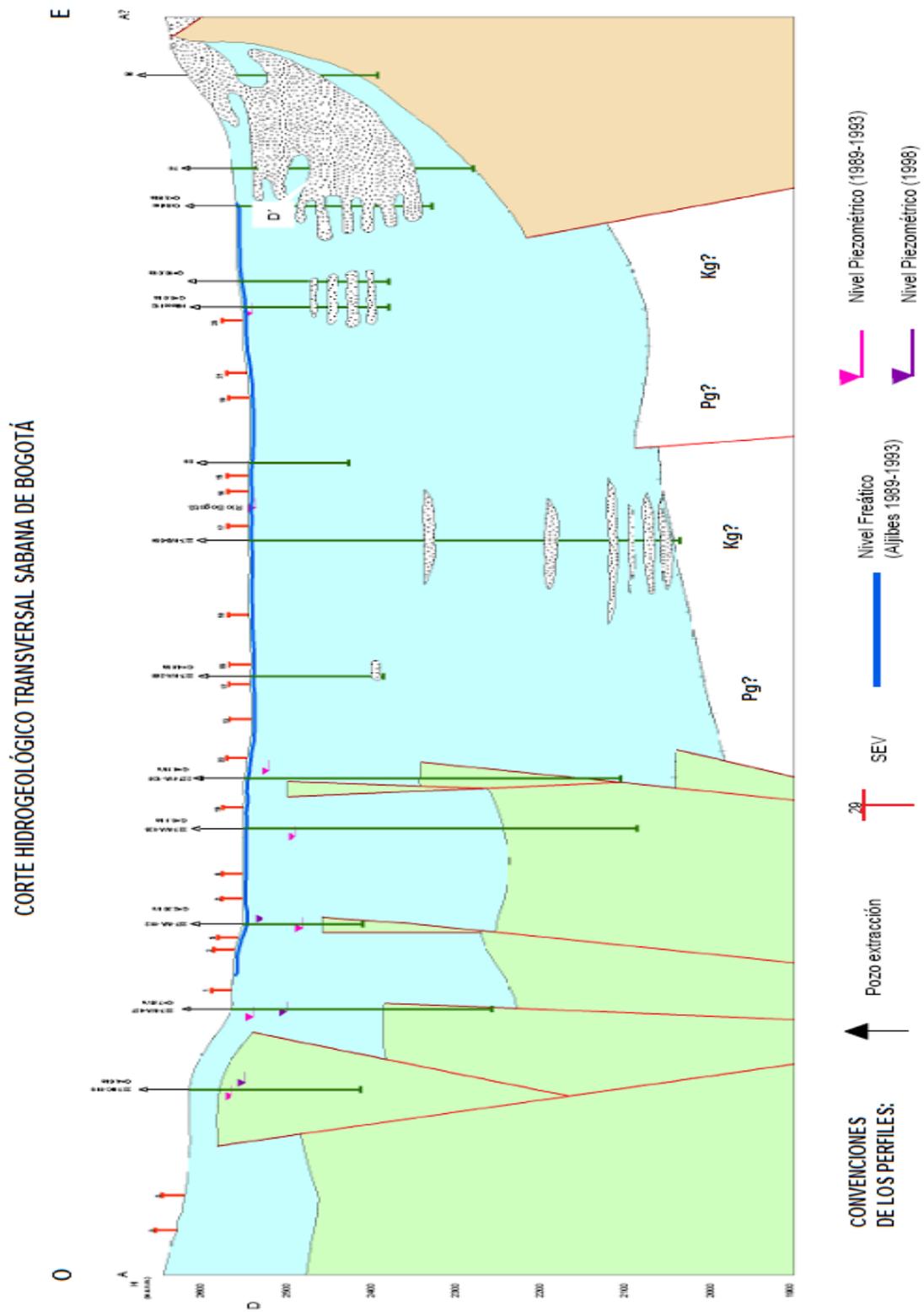


Figura 12. Corte Hidrogeológico transversal Sabana de Bogotá, **Fuente:** “Estudio de modelación geotécnica del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá D.C, Mayo de 2011

6.4.9 Recarga potencial de Bogotá

Se ha realizado la caracterización estructural para identificar las condiciones favorables para la recarga y almacenamiento de agua subterránea del Distrito Capital el cual ha determinado:

Hidrologicamente el área de estudio tiene un régimen de lluvias bimodal con valores máximos en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre, y un valor promedio del orden de 800 mm/año, lo que representa gran importancia para la recarga potencial de los acuíferos a nivel regional.

ZONAS-ÁREAS	RECARGA POTENCIAL (BALANCE HÍDRICO)
Zonas de mayor Recarga Potencial	Los Cerros Orientales, especialmente hacia las partes altas de las cuencas de los ríos Fucha y Tunjuelo donde los valores en algunos casos superan los 190 mm/año.
Zona de menor Recarga Potencial	Zona sur occidental, en las desembocaduras de los Ríos Fucha y Tunjuelo, cuyos valores se encuentran entre 0 y 50 mm/año. Como resultado general, para la zona de estudio se calculó que la recarga potencial promedio (Balance hídrico) es de 70 mm/año.
Cuenca de Salitre-Fucha-Torca	Los valores promedio anual de recarga potencial de la cuenca de Salitre es de 169.3 mm y Fucha de 225.6 mm respectivamente. Para el caso de la cuenca del río Torca el valor es igual a 92.38 mm.
Formaciones Arenisca Dura, Labor Tierna y Plaeners	El volumen de la recarga potencial estimada para formaciones Arenisca Dura, Labor Tierna y Plaeners es del orden de 18.332.841,3 m ³ /año dentro del área de la jurisdicción de la Secretaria Distrital de Ambiente.
Depósitos Cuaternarios	El volumen de la recarga potencial estimada para los depósitos cuaternarios es del orden de 39.108.856,8 m ³ /año dentro del área de la jurisdicción de la Secretaria Distrital de Ambiente.
Recurso Hídrico Subterráneo	Las reservas del recurso hídrico subterráneo en la unidades de Grupo Guadalupe son del orden de 24303*10 ⁶ m ³ y de 6453*10 ⁶ m ³ para los depósitos no consolidados en jurisdicción de la Secretaria Distrital de Ambiente.

Tabla 3. Recarga Potencial (Balance Hídrico). **Fuente:** VELOZA, Jairo Alfredo Sistema de moldeamiento hidrogeológico del Distrito Capital Bogotá. 2013. Pág. 118-119.

La recarga potencial a partir de datos hidroclimatológicos es del orden de 70 mm/año obtenida mediante el balance de masas.

6.4.10 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 metros a 8.0 metros) en la parte plana y generalmente se encuentran colgados y desconectados hidráulicamente de los principales horizontes acuíferos 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 Figura13.

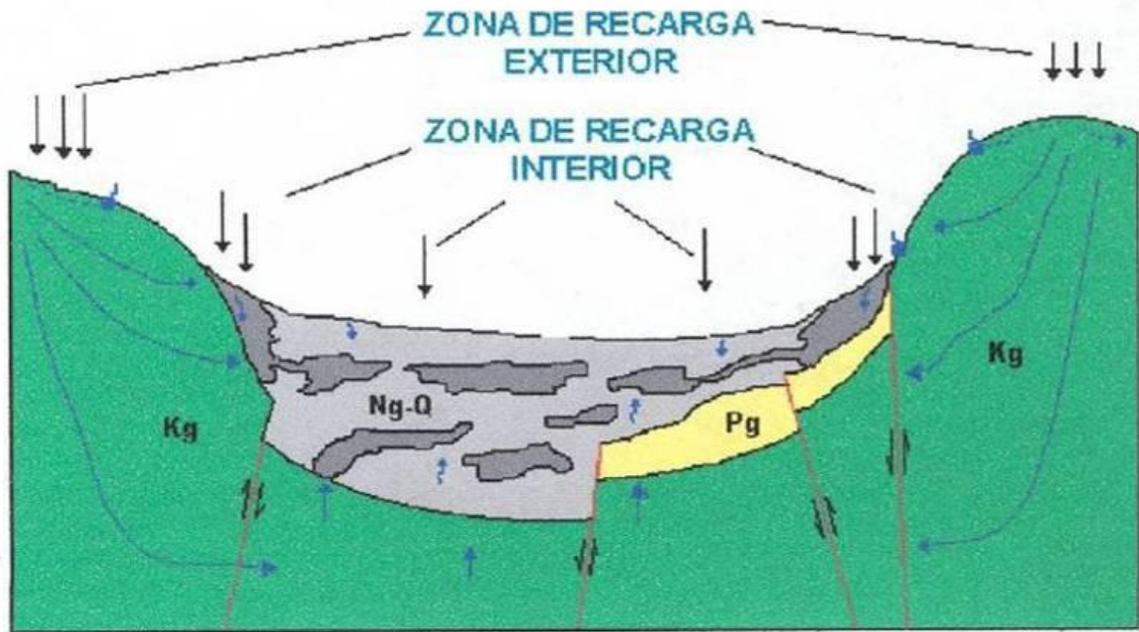


Figura 13. Esquema de la cuenca artesiana de la Sabana de Bogotá **Fuente:** (INGEOMINAS, 2002).

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.

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.

7 EXPLOTACIÓN Y GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

Las aguas pueden extraerse de manera natural o inducidas por el hombre. Por métodos naturales, están como ejemplo los manantiales o descargas subterráneas a lagos o al mar. Existen variadas formas como se explota el agua subterránea, dentro de estos métodos se encuentran la excavación de aljibes por medio de labores manuales, así mismo, “mediante la construcción de pozos lo cual se realiza el hincado de tuberías o la perforación con taladros, dichos pozos se dotan con sistemas de extracción”⁴⁰.

El Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA), en su momento elaboró en el año 1999 un modelo hidrogeológico para los Acuíferos de Bogotá. Esta herramienta tiene el objeto de “planificar la explotación del recurso y determinar los criterios técnicos para el otorgamiento de las concesiones dentro de la explotación del recurso hídrico Subterráneo”⁴¹. Como complemento la Secretaría Distrital de Ambiente regula la explotación de los pozos existentes en la ciudad, exigiendo las pruebas y ejecución de acciones que aseguren una explotación sostenible, como lo es:

- Verificación de los volúmenes concesionados y extraídos.
- Ejecución de Pruebas de Bombeo.
- Toma anual de niveles tanto estáticos como dinámicos de los pozos
- Muestreo Físicoquímico del Agua explotada.
- Implementación de un Programa de Ahorro y uso Eficiente del Agua.
- Instalación de sistemas de medición.

⁴⁰ <http://ambientebogota.gov.co/aguas-subterranas>

⁴¹ <http://ambientebogota.gov.co/aguas-subterranas>

7.1 TRÁMITES ANTE LA AUTORIDAD

Para explotar las aguas subterráneas se debe contar con permiso de la autoridad ambiental competente, la cual que para el caso de Bogotá es la Secretaria Distrital de Ambiente. A continuación se detalla el procedimiento:

7.1.1 Permiso de exploración

Corresponde al trámite mediante el cual el usuario manifiesta su intención de explorar la existencia y la viabilidad de aprovechar en el futuro las aguas subterráneas ante la Autoridad ambiental, con el fin de obtener el permiso de exploración, el cual aun no le confiere concesión para su aprovechamiento. El procedimiento se describe a continuación:

- Diligenciar el “FORMULARIO ÚNICO NACIONAL DE SOLICITUD DE PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEAS”, radicarlo ante la SDA junto a los documentos que acrediten la personería jurídica del solicitante.
- La consignación realizada por concepto de evaluación de la solicitud del permiso.
- Estudio hidrogeológico de la zona
- Diseño preliminar del pozo.
- Relación y especificaciones del equipo a usar en la exploración.
- Plano del área dentro de un radio de 15 metros alrededor del pozo
- Profundidad y diámetro de la perforación planeada con profundidades no menores a 100metros.

7.1.2 Solicitud de Concesión de Aguas Subterráneas

Corresponde al trámite mediante el cual el cliente manifiesta su intención de querer aprovechar las Aguas subterráneas ante la Autoridad ambiental, con el fin

de obtener el permiso de usar el recurso una vez identifica que se hace la prospección. El procedimiento se describe a continuación:

Diligenciar el “FORMULARIO ÚNICO NACIONAL DE SOLICITUD DE CONCESIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS”, radicarlo ante la SDA junto a los siguientes documentos:

- Volumen diario de agua solicitado (m³/día) y régimen de bombeo.
- Documentos que acrediten la personería jurídica del solicitante.
- Original y copia del recibo de consignación realizada por concepto de evaluación de la solicitud del permiso.
- Informe de la evaluación y análisis de los resultados obtenidos en la prueba de bombeo.
- Permiso de vertimientos vigente de ser requerido.
- Programa de uso eficiente y ahorro del agua.
- Análisis físico y bacteriológico del agua cruda del pozo según resolución 250 de 1997.
- Georeferenciación y nivelación de cota del pozo.
- Materialización de la georeferenciación y nivelación mediante placa de bronce

7.1.3 Solicitud de Prórroga de Concesión de Aguas Subterráneas

Es el procedimiento mediante el cual el titular de la concesión vigente solicita a la Autoridad ambiental la prórroga de la concesión otorgada mediante resolución. El procedimiento se describe a continuación:

- Descargar y diligenciar el FORMATO DE SOLICITUD DE PRORROGA DE CONCESIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS , diligenciarlo, firmarlo y radicarlo con los siguientes documentos:
- Radicado de los formularios diligenciados del BANCO NACIONAL DE DATOS HIDROGEOLÓGICOS (FBNDH).
- Documentos que acrediten la personería jurídica del solicitante.
- Original y copia del recibo de consignación realizada por concepto de evaluación de solicitud del permiso
- Actualización del programa de ahorro y uso eficiente del agua
- Permiso de vertimientos vigentes en caso que las condiciones de operación así lo requieran.
- Análisis físico químico y bacteriológico de la agua cruda del pozo teniendo en cuenta la Resolución 250 de 1997.
- Niveles hidrodinámicos para el año de la solicitud, en el formato REGISTRO ÚNICO PARA MEDICIÓN DE NIVELES ESTÁTICO Y DINÁMICO de acuerdo al PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE NIVELES DEL AGUA SUBTERRÁNEA que se encuentran en la pagina www.ambientebogota.gov.co

7.1.4 Solicitud de Modificación del Caudal de Aguas Subterráneas Concesionado

Es el trámite mediante el cual el titular de la concesión vigente solicita a la autoridad ambiental la modificación del régimen de aprovechamiento en tiempo o en caudal al otorgado inicialmente con el fin de obtener el derecho de aprovechar el recurso extraído a través del pozo con un volumen mayor. El procedimiento se describe a continuación:

- Descargar y diligenciar y radicar el FORMULARIO DE SOLICITUD DE LA MODIFICACIÓN DE LA CONCESIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS POR AUMENTO DE CAUDAL O TIEMPO DE BOMBEO de la página www.ambientebogota.gov.co; junto con los siguientes documentos.
- Documentos que acrediten la personería jurídica del solicitante.
- Actualización del programa y uso eficiente del agua, según las necesidades del predio.
- Permiso de vertimientos vigente en aquellos casos las condiciones del solicitante así lo requiera
- Presentara análisis físico, químico y bacteriológico teniendo en cuenta los parámetros de la resolución 250 de 1997.
- Niveles hidrodinámicos para el año de la solicitud en el formato REGISTRO ÚNICO PARA MEDICIÓN DE NIVELES ESTÁTICO Y DINÁMICO de acuerdo al PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA que se encuentran en la página www.ambientebogota.gov.co.

7.1.5 Concesión para su explotación

Se solicita una vez construido el pozo, es el acto administrativo mediante el cual la autoridad ambiental autoriza el uso y aprovechamiento de un caudal de agua subterránea específico, con un plazo y condiciones determinadas.

7.1.6 Renovación de la concesión

La concesión se otorga por un plazo determinado y puede ser renovada elevando la respectiva solicitud antes del vencimiento de la concesión.

7.1.7 Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas de la construcción de un pozo deben incluir la descripción detallada y clara de las etapas, materiales, actividades, pruebas y parámetros a tomar en cuenta en la ejecución del proyecto.

7.1.7.1 Etapas de diseño

Las especificaciones técnicas deberán describir como mínimo las siguientes etapas:

- Movilización de maquinarias y equipos e Instalaciones provisionales
- Ante-pozo o ademe
- Perforación
- Columna litológica y descripción geológica de las muestras de material excavado.
- Registro eléctrico
- Revestimiento
- Colocación de filtro de grava
- Desarrollo y limpieza del pozo
- Prueba de verticalidad y alineamiento
- Prueba de aforo
- Análisis de calidad del agua
- Desinfección del pozo y sello sanitario
- Informe final
- Pre diseño del pozo

7.1.7.2 Características de diseño

Las características del pozo consideradas en el prediseño deberán obtenerse de la información, conclusiones y recomendaciones del estudio hidrogeológico y deberán ser tales que se adapten a condiciones hidrogeológicas que prevalezcan en el sitio de la perforación.

El pre diseño deberá contemplar como mínimo las siguientes características:

- Profundidad estimada
- Diámetro de perforación
- Diámetro y tipo de revestimiento (tubería ciega y rejilla)
- Diseño del filtro de grava
- Perfil litológico previsto y tipo de acuífero
- Caudal esperado
- Método de perforación
- Dimensiones mínimas del terreno que albergará la perforación.

7.1.8 Tarifas extracción agua subterránea

Para la extracción “El agua tiene un costo de \$ 40 pesos por m³ para uso industrial y \$35 pesos para uso doméstico”⁴² sin diferenciar estratos o áreas de extracción, generando un interés industrial por sus bajos costos de retribución tarifaria, comparado al valor por metro cuadrado, para el uso industrial de \$ 4619.78 y comercial es de \$5289.63.

En Bogotá, cada mes se extraen 522.528 metros cúbicos de agua subterránea de los 87 pozos que la Secretaría Distrital de Ambiente tiene concesionados en el

⁴² Consejo de Bogotá, Tasa retributiva. julio de 2012

área urbana. Pero estos no son los únicos, al existir personas que realizan extracciones fraudulentas, sin acogerse a las normas vigentes.

Recientemente, a finales del año 2012 la Secretaría Distrital de Ambiente, identificó 503 pozos, de los cuales 188 fueron sellados definitivamente y otros 133 suspendidos temporalmente, entre otras razones por sobreexplotación del agua, vencimiento de la concesión o desuso. Aun cuando el mayor número de pozos se halla en Suba (28,7 %), Fontibón (14,9 %) y Usaquén (13,7 %), en donde más agua se extrae del subsuelo es en Puente Aranda, Fontibón y Kennedy.

- Se tiene registros de 95 concesiones vigentes, con consumo de 7 millones de m³/año.
- En la sabana existen más de 5000 concesiones con consumos de 42 millones de m³/año.
- El 90% de los pozos se encuentran por fuera de la formación Guadalupe
- Se han detectado descensos en los niveles de acuíferos en las localidades de Fontibón, Kennedy y Puente Aranda, coincidentes con la industria.
- En el año 2006, la Universidad Nacional recomendó no otorgar más concesiones.
- El agua tiene un costo de \$ 40 pesos por m³ para uso industrial y \$35 pesos para uso doméstico

AÑO	VALOR FACTURADO
2011	\$134,847.997
2010	\$96,478.051
2009	\$70,994.824
2008	\$47,331.954
TOTAL	\$349,652.806

Tabla 4: Ingresos por concepto de consumo de agua subterránea, **Fuente:** http://www.concejodebogota.gov.co/concejo/site/artic/20120904/asocfile/20120904171320/acta_022__10_07_

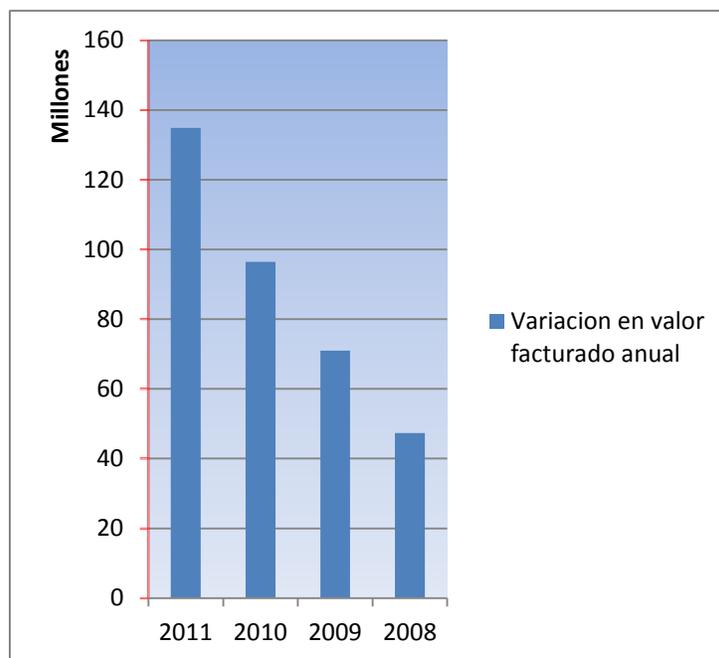


Figura 14. Aumento en el valor facturado de consumo aguas subterráneas. **Fuente.** Autores.

8 SISTEMAS DE REFERENCIA GEODÉSICO

Los sistemas de referencia Geodésico son básicamente “modelos matemáticos que permiten asignar coordenadas a puntos sobre la superficie terrestre”⁴³, están definidos por coordenadas geodésicas (latitud, longitud y altura). Se requiere diferentes actividades entre las cuales se encuentran el estudio de la geometría de la red, el establecimiento de líneas base, la señalización de puntos, la materialización de puntos y la determinación de señales de azimut. En la actualidad se utiliza el sistema de posicionamiento global (GPS) para obtener una red dinámica y versátil en zonas en las que el IGAC no tiene cobertura. Los sistemas más utilizados y conocidos en la actualidad se resumen en:

8.1 TELEDETECCIÓN ESPACIAL

Es aquella técnica que permite adquirir imágenes desde sensores instalados en satélites espaciales de la superficie terrestre, por reflexión de la energía solar o un haz de luz artificial, permitiendo distinguir varias escalas, desde la local hasta la global, se trata de una nueva forma de visualizar los procesos naturales cotidianos del planeta, permitiendo el conocimiento, investigación y desarrollo de análisis en ingeniería en las problemáticas globales por uso del suelo y sus entornos.

8.2 INTERFERÓMETRO DE APERTURA SINTÉTICA. (INSAR)

Es un instrumento usado en geodesia y en teledetección, este método geodésico usa imágenes de dos o más radares de apertura sintética (SAR) para generar cartas de deformación de superficie y de elevaciones digitales, usando diferencias en la fase de las ondas retornantes al satélite para medir cambios en escalas de centímetros de deformación en intervalos de tiempo, de días a años.

⁴³ CNUGGI (Comité Nacional de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional) (1999). Sistemas Geodésicos. Subcomité de Grupo de Trabajo Sistemas geodésico, Proyecciones nacionales. Pag. 96. /www.agrimensoreschubut.org.ar DANE (2007).

Entre los años sesenta y noventa, Bogotá contaba con aproximadamente 4000 vértices de los distintos tipos, en 1994 se materializan y reposicionan cerca de 800 puntos para reemplazar los vértices destruidos y actualizar la red existente; en el año 2003, por las constantes quejas de los usuarios dada la falta de vértices, el Instituto realizó un inventario con el cual se determinó el mal estado en el que se encontraba la red geodésica de la ciudad, por lo cual se hizo un convenio con Catastro Distrital para la construcción y georeferenciación de 20 vértices en Bogotá con las características de precisión de la red Magna (Marco Geocéntrico de Referencia Nacional) (Sánchez, 2005), que a su vez es la densificación del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) en Colombia .

Colombia adoptó desde el año 1999 el Marco Geocéntrico de Referencia Nacional Magna, que es la densificación del proyecto Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (Sirgas). Las estaciones BOGT y BOGA se encuentran ubicadas en predios del Instituto Geografico Agustín Codazzi.



Figura15. Ubicación de Estaciones BOGT-BOGA. Fuente: IGAC.

El proyecto Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) fue establecido en octubre de 1993 durante la Conferencia Internacional para la Definición del Datum Geocéntrico Sudamericano en Asunción, Paraguay, y es auspiciado por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG), el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) y la Agencia Nacional de Imágenes y Cartografía (NIMA) de los Estados Unidos (Souto et al., 2005).



Fotografía 4. Estación de referencia Magna-Sirgas. **Fuente:** Instituto Geográfico Agustín Codazzi (BOGA), Bogotá, Colombia.



Fotografía 5. Pilastra red Magna. Densificación de la red geodésica Sirgas en Colombia (Magna), vértice del Departamento Administrativo de Catastro Distrital (Bogotá 15), barrio San Pedro (Bosa); **Fuente:** Instituto Geográfico Agustín Codazzi (BOGA), Bogotá, Colombia..

El ingreso de la tecnología de GPS con estaciones permanentes en puntos y aéreas hace posible obtener la información continua de la posición y altura en los lugares donde se instalaron estos dispositivos, permitiendo “corregir o analizar en tiempo real los cambios que por efecto de la geodinámica sucedan”.⁴⁴

8.3 MÓDULOS MAGNA SIRGAS PRO

- Conversión y transformación de coordenadas entre datum y el Observatorio Astronómico de Bogotá y MAGNA-SIRGAS.
- Obtención de ondulaciones geoidales sobre el modelo GEOCOL2004.
- Cálculo de nivelación a partir de mediciones GNSS.
- Cálculo de velocidades a partir de Velinter (SIRGAS).
- Cálculo de azimuts, coordenadas y distancias entre pares de puntos sobre GRS80.

⁴⁴ Materialización de la Red Geodésica Principal. INGEOMINAS.

8.4 RED GEODÉSICA DISTRITAL

La evolución de la Red Geodésica Distrital se inició desde los años setenta, cuando el IGAC estableció en Bogotá una red de puntos topográficos de tercer orden los cuales fueron denominados T. Hacia el año 1986 se realizó una red geodésica de segundo orden, la cual fue materializada por el Instituto Geográfico a petición del Departamento Administrativo de Catastro Distrital y es conocida como la red de CD. Debido a la modernización de la infraestructura urbana, la inclusión de nuevas vías y la ampliación de otras, la red CD se vio muy afectada ya que una gran cantidad de puntos fueron destruidos a raíz de las construcciones. En 1996 se da al servicio una nueva red de CD actualizados y posicionados con GPS, la cual tuvo los inconvenientes mencionados anteriormente y aunque se pretendía ampliarla, algunos puntos se perdieron debido a que sus pares fueron destruidos.

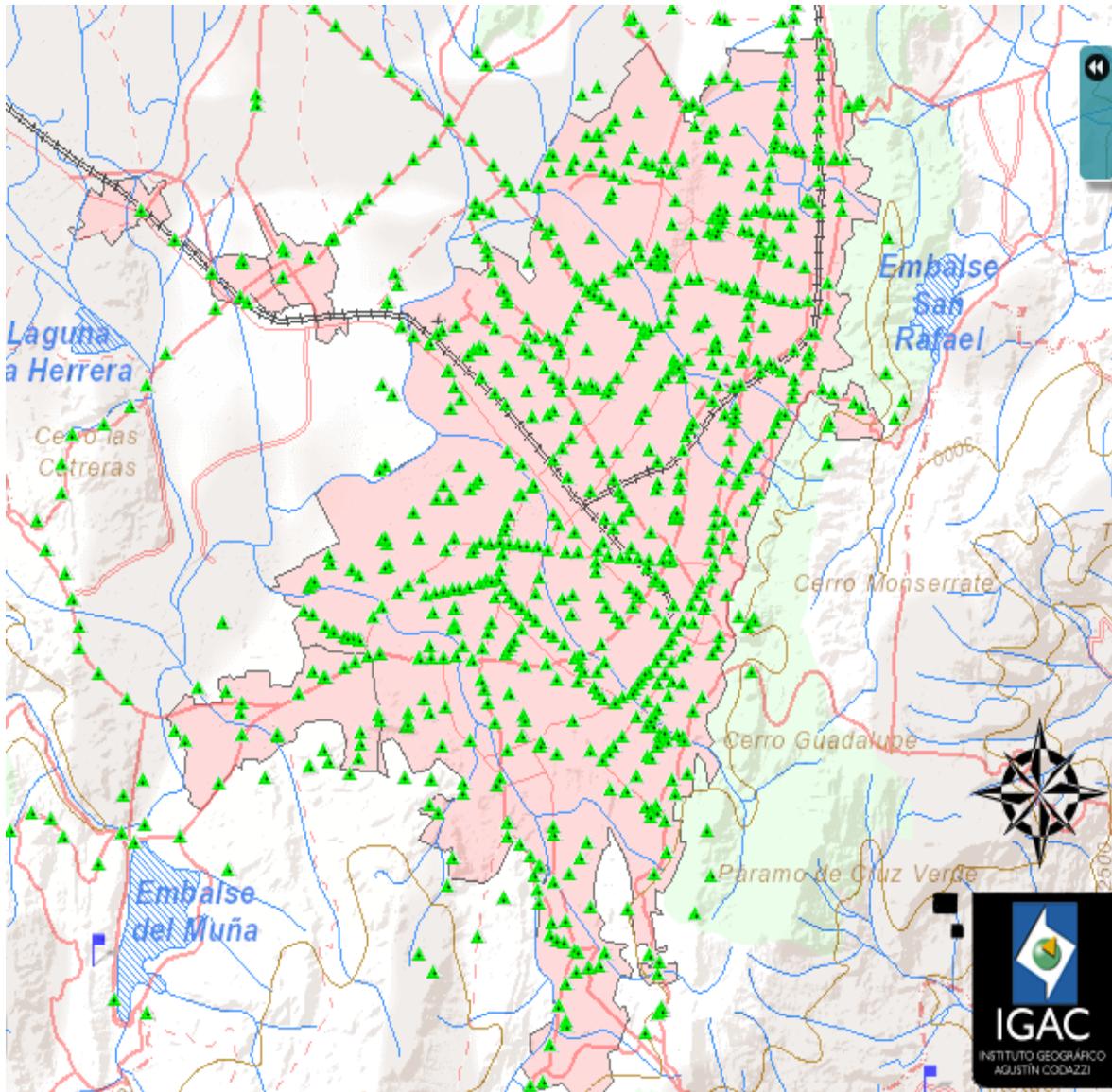


Figura 16. Red Geodésica de Bogotá. **Fuente:** <http://geoportal.igac.gov.co>

La red CD forma parte de GEORED que corresponde a la denominación corta adoptada para el proyecto “Implementación de la Red Nacional de Estaciones Geodésicas Satelitales GPS con propósitos Geodinámicos”, GEORED es un proyecto de investigación y desarrollo basado en instrumentación, el cual inició para ese entonces, el Instituto Colombiano de Geología y Minería-INGEOMINAS en el año 2007 bajo el marco de la Subdirección de Geología Básica de la Dirección Técnica del Servicio Geológico, como resultado de consideraciones de

pertinencia técnica, científica, social, económica y política, orientado a incrementar el grado de conocimiento de la geodinámica en la esquina noroccidental de Suramérica, la cual “es a su vez es fuente de información en la gestión del riesgo por procesos naturales”⁴⁵.



Fotografía 6. GNSS Estación de la Red MAGNA-ECO (Marco Geocéntrico Nacional de Referencia – Estaciones Continuas) Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Fontibón. **Fuente:** Autores

8.4.1 Estudio Interferométrico Diferencial (SAR) Bogotá

Se desarrollan mediciones satelitales en la ciudad de Bogotá con comparaciones en el tiempo para estimar de forma precisa la velocidad media de deformaciones

⁴⁵ https://spi.dnp.gov.co/App_Themes/SeguimientoProyectos/ResumenEjecutivo/0043000220000.pdf

durante todo el intervalo de los años 1992 a 2006 que se tienen imágenes satelitales, con un análisis mediante 16 imágenes de este periodo, adicionalmente calcula las componentes no lineales de deformaciones, con resultados finales de descripción temporal de las deformaciones presentadas en el terreno determinando zonas de máxima subsidencia que se encuentra en la zona centro y noreste de Bogotá, con movimientos de más de 7 cm/año.

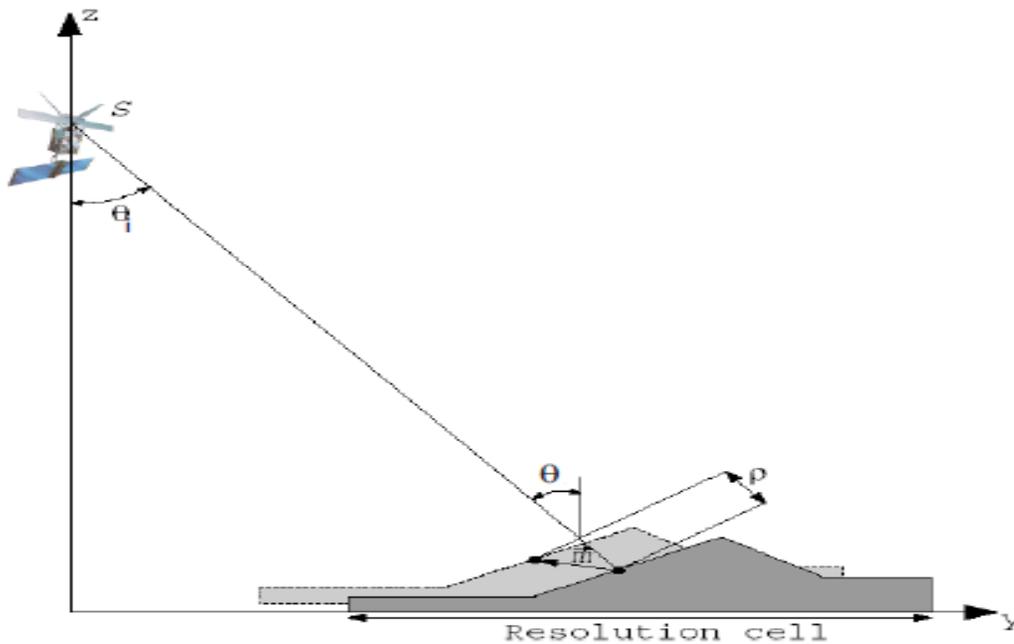


Figura 17. Medición a partir de imágenes satelitales. **Fuente:** www.icc.cat/.../12_ARTICULO%20Boletin%20Colombiano%20de%20G... Pg. 6.

Realizando los pasos y la metodología ya mencionada tiene importantes y contundentes conclusiones, entre ellas:

Mediciones 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, las cuales determinan 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.” Y aunque las observaciones de campo no muestran variaciones de altura tan notorias, si es importante efectuar las medidas que eviten consecuencias graves.

9 EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

Los efectos de las actividades antrópicas sobre el medio ambiente son susceptibles a ser caracterizadas, evaluadas cualitativa y cuantitativamente a través de la importancia y relevancia del impacto, De acuerdo con Conesa Fernández Vítora la importancia del impacto se mide “en función, tanto del grado de incidencia o intensidad de la alteración producida, como de la caracterización del efecto, que responde a su vez a una serie de atributos de tipo cualitativo tales como extensión, tipo de efecto plazo de manifestación, persistencia, reversibilidad, recuperabilidad, sinergia, acumulación y periodicidad”⁴⁶.

9.1 ATRIBUTOS DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES^{47,48}

Para la identificación de los factores ambientales del entorno susceptible de ser impactados por la subsidencia, se recurre a la recopilación de la información existente y visitas de campo, entrevistas a expertos y muestreos de las variables asociadas al estudio y los eventos asociados para el escenario encontrado. El análisis del sistema hacia el medio físico y socio-económico se desarrolla determinando los subsistemas y componentes ambientales del entorno con el objeto de evaluar e identificar las acciones relacionadas a las actividades antrópicas y sus impactos más importantes.

Los criterios se determinan en dos categorías principales Medio Físico o Natural y Medio Económico y Cultural, donde se relacionan mediante sistemas que contienen subsistemas y estos a su vez los componentes ambientales que son evaluados. A continuación se describen en este capítulo, las consideraciones y determinantes para ser evaluados.

⁴⁶ CONESA FERNANDEZ, Vítora.1997; Viladrich y Tomasini, 1999.

⁴⁷ CONESA FERNANDEZ, Vítora.1997; Viladrich y Tomasini, 1999.

⁴⁸ Viladrich y Tomasini (1999) Consideran la inclusión de un parámetro de certidumbre.

9.1.1 Consideraciones y criterios previos

Para la aplicación de la metodología de Evaluación del Impacto Ambiental se contempla en la clasificación del medio la división en sistema y sub-sistemas referenciados a partir de la información requerida para predecir posibles alteraciones y cambios en el medio ambiente, cada uno tiene comportamientos diferentes ante la problemática de extracción de agua subterránea, con la posibilidad de desarrollar efectos adversos o favorables en algunas circunstancias específicas, por estas circunstancias se identifican las categorías que nos permite caracterizar el impacto, asociando el medio natural con:

- Medio Físico o Natural
- Medio Económico y Cultural

9.1.2 Componentes Ambientales

En la valoración por afectación en el medio ambiente se identifica la matriz de Evaluación de Impacto Ambiental con diferentes categorías asociadas para facilitar la identificación de impactos, con el uso de parámetros adecuados de percepción sobre la interacción de elementos ambientales y relacionados con el entorno del área de estudio en el área urbana de Bogotá y las aéreas con mayor extracción de agua subterránea, buscando predecir y determinar efectos directos e indirectos, al igual que el área de influencia, en función del análisis por componente ambiental para determinar cualitativa y cuantitativamente cómo pueden éstos ser perturbados por las actividades humanas y naturales.

Los Componentes Ambientales son clasificados en:

1) Medio inerte

- Aire
- Tierra y Suelo
- Agua
- Procesos constructivos

2) Medio natural

- Ecosistema Terrestre
- Ecosistema Acuático

3) Medio Porcentual

- Paisaje

4) Medio Urbano

- Construcción y viviendas

5) Medio Socio-Económico

- Economía

9.1.3 Escenarios del riesgo

Para la determinación de los escenarios del riesgo se establece el área urbana de la ciudad como área inicial de estudio, a partir de las situaciones ambientales encontradas, en cada escenario valorado, que se caracterizan por tener comportamientos diferentes de modo y lugar dentro el conjunto de elementos que los conforman, estos territorios con distintos escenarios de riesgo son divididos por localidades para facilitar su valoración, el escenario de riesgo transformado y alterado por el ser humano es valorado cuantitativamente y cualitativamente según las condiciones ambientales y procesos antropicos que ha llegado a alterar la

atmosfera, la cantidad y calidad del agua, las condiciones biológicas de flora y fauna, algunos factores culturales y económicos de la ciudad entre otros.

La ciudad de Bogotá dividida en 19 localidades, es valorada en la matriz como instrumento de amplificación para la identificación de causa-efectos de las diferentes consecuencias y alteraciones desarrolladas, de la misma manera y en paralelo son evaluadas las localidades más afectadas por la incidencia de la subsidencia y su relación con el objetivo de estudio.

Por la información recopilada de las diferentes características en infraestructura, niveles sociales, uso del suelo, características geológicas, es imprescindible en este proyecto de investigación tomar todos los posibles escenarios de riesgo con descripción de la mayor cantidad de componentes ambientales, parámetros, análisis de causa-efecto y escenarios alterados en la ciudad de Bogotá, para determinar la incidencia en el entorno natural, posibles amenazas, variación del riesgo, transformaciones en el medio ambiente y determinar la importancia del impacto ambiental.

Escenarios:

- Área urbana de la ciudad de Bogotá.
- Localidad: Puente Aranda.

9.1.4 Causas

En la identificación de causas que acentúan el hundimiento del suelo y la alteración del medio ambiente se establecieron interrogantes para determinar el origen de la problemática, buscando valorar cuantitativa y cualitativamente a partir de:

- Los diferentes tipos de subsidencia que afectan y generan cambios al interior del suelo (Extracción de agua subterránea, Compactación)
- Sobre explotación de agua subterránea y disminución de los niveles freáticos.
- La construcción de viviendas, edificios e infraestructura en las regiones con mayores precipitaciones en la ciudad.
- Las características geológicas y las diferentes unidades que conforman el área urbana de Bogotá constituidas principalmente por suelos blandos de origen lacustre.
- La vibración generada por transporte vehicular.

9.1.5 Efecto-Consecuencias

Buscando dar respuesta a la baja gestión en la evaluación de impactos, prevención del riesgo y daños a la infraestructura física de la ciudad por el proceso de hundimiento y deformación del suelo, se evalúa los cambios en el medio ambiente ponderando la matriz para cada subsistema, fraccionado por componentes ambientales, en busca de identificar y determinar peligros y riesgos asociados al objetivo de la investigación.

La ausencia de estudios sobre subsidencia y su impacto ambiental en la ciudad, hace necesario verificar la mayor cantidad de información de alteraciones para el análisis de los impactos y efectos, daños a la naturaleza y al hombre que se interpretan a partir de cada sub-sistema establecido; sin desatender en la descripción del componente elementos o escenarios, desde el factor con menor relevancia para algunas aplicaciones y valoraciones, llevándonos a contener en la evaluación todos los posibles efectos o consecuencias, a través de los componente ambientales determinados, como la calidad del agua, cantidad del agua superficial y subterránea, flora-fauna acuática y terrestre y hasta el componente atmosférico o cualquier otro susceptible de interactuar con el medio

ambiente y los escenarios de riesgo descritos en la caracterización de los criterios previos.

Efectos o Consecuencias considerados:

- Impactos sobre el Medio Físico
- Emisión de gases e incremento de material particulado.
- Alteración de la calidad visual del paisaje.
- Cambios en la calidad de suelo.
- Impactos sobre el Medio Biológico
- Migración temporal de la fauna.
- Pérdida de cobertura vegetal.
- Perturbación del hábitat.
- Perturbación de la fauna.
- Impactos sobre el Medio Socioeconómico y Cultural
- Daño malla vial.
- Generación de empleo.
- Dinamización del comercio y servicios.
- Valoración Económica

El uso de matrices se basa en la predicción y evaluación de impactos, para lo cual en la investigación fue necesario analizar desde los escasos controles desarrollados en fuente, medio y receptores de la problemática, hasta la información satelital de los cambios generados en la geomorfología de la ciudad, con el fin de determinar las consecuencias y alteraciones al entorno; Se desarrolla y describen a partir de los sistemas del componente de medio Biofísico, económico y cultural, con el propósito de valorarlos a través de Importancia del Impacto Ambiental según Conesa Fernández Vítora.

9.1.6 **Carácter del impacto o Naturaleza**

Los impactos pueden ser beneficiosos o perjudiciales. Los primeros son caracterizados por el signo positivo, los segundos se los expresan como negativos.

9.1.7 **Efecto**

El impacto de una acción sobre el medio puede ser “directo” -es decir impactar en forma directa-, o “indirecto” –es decir se produce como consecuencia del efecto primario el que, por tanto, devendría en causal de segundo orden.

Efecto	Valor
Secundario	1
Directo	4

Tabla 5. Valoración del Efecto

9.1.8 **Magnitud/Intensidad**

Representa la incidencia de la acción causal sobre el factor impactado en el área en la que se produce el efecto.

Magnitud/Intensidad	Valor
Baja	1
Media Baja	2
Media Alta	3
Alta	4
Muy Alta	8
Total	12

Tabla 6. Valoración de la Magnitud/Intensidad

9.1.9 Extensión

A veces la incidencia del impacto está circunscrita; en otros casos se extiende disminuyendo sus efectos (contaminación atmosférica e hídrica) hasta que los mismos no son medibles. En algunos casos sus efectos pueden manifestarse más allá del área del proyecto y de la zona de localización del mismo. Para tal caso, los efectos secundarios sobre la atmósfera (CO₂ y su incidencia en el efecto invernadero) y los efectos de degradación de humedales o de contaminación de cultivos (disminución de áreas reproductivas o de alimentación de aves migratorias y la mortandad directa de las aves, y sus efectos en sistemas ecológicos de otros países).

El impacto puede ser localizado (puntual) o extenderse en todo el entorno del proyecto o actividad (se lo considera total).

Extensión	Valor
Impacto Puntual	1
Impacto Parcial	2
Impacto Extenso	4
Impacto Total	8

Tabla 7. Valoración de Extensión

Existen otras consideraciones que deben efectuarse en el momento de valorar la extensión. En efecto, debe considerarse que la extensión se refiere a la zona de influencia de los efectos. Si el lugar del impacto puede ser considerado un “lugar crítico” (alteración del paisaje en zona valorada por su valor escénico, o vertido aguas arriba de una toma de agua), al valor obtenido se le adicionan cuatro (4) unidades. Si en el caso de un impacto “crítico” no se puede realizar medidas correctoras, se deberá cambiar la ubicación de la actividad que, en el marco del proyecto, da lugar al efecto considerado.

9.1.10 Momento

Se refiere al tiempo transcurrido entre la acción y la aparición del impacto. Para poder evaluar los impactos diferidos en el tiempo se necesita de modelos o de experiencia previa. Por ejemplo, en el caso de los procesos de eutrofización de los cuerpos de agua, es posible disponer de modelos que nos muestren tales impactos a determinada cantidad de tiempo.

La predicción del momento de aparición del impacto, será mejor cuanto menor sea el plazo de aparición del efecto. Además, la predicción es importante en razón de las medidas de corrección de los impactos que deban realizarse.

Momento	Valor
Inmediato	4
Mediano plazo (1 a 5 años)	2
Largo plazo (más de 5 años)	1

Tabla 8. Valoración de Momento

Si el momento de aparición del impacto fuera crítico se debe adicionar cuatro (4) unidades a las correspondientes.

9.1.11 Persistencia⁴⁹

Se refiere al tiempo que el efecto se manifiesta hasta que se retorne a la situación inicial en forma natural o a través de medidas correctoras. Un efecto considerado permanente puede ser reversible cuando finaliza la acción causal (caso de vertidos de contaminantes) o irreversible (caso de afectar el valor escénico en zonas de importancia turística o urbanas a través de la alteración de geoformas o por la tala de un bosque). En otros casos los efectos pueden ser temporales.

⁴⁹ Algunos autores (Viladrich y Tomasini, 1999) proponen la posibilidad de considerar en forma conjunta la Persistencia y la Reversibilidad.

Persistencia	Valor
Fugaz	1
Temporal (entre 1 y 10 años)	2
Permanente (duración mayor a 10 años)	4

Tabla N° 9. Valoración de Persistencia

9.1.12 Reversibilidad

La persistencia y la reversibilidad son independientes. Este atributo está referido a la posibilidad de recuperación del componente del medio o factor afectado por una determinada acción. Se considera únicamente aquella recuperación realizada en forma natural después de que la acción ha finalizado. Cuando un efecto es reversible, después de transcurrido el tiempo de permanencia, el factor retornará a la condición inicial.

Reversibilidad	Valor
Corto plazo (menos de un año)	1
Mediano plazo (1 a 5 años)	2
Irreversible (más de 10 años)	4

Tabla 10. Valoración de Reversibilidad

9.1.13 Recuperabilidad

Mide la posibilidad de recuperar (total o parcialmente) las condiciones de calidad ambiental iniciales como consecuencia de la aplicación de medidas correctoras.

Recuperabilidad	Valor
Si la recuperación puede ser total e inmediata	1
Si la recuperación puede ser total a mediano plazo	2
Si la recuperación puede ser parcial (mitigación)	4
Si es irrecuperable	8

Tabla 11. Valoración de Recuperabilidad

9.1.14 Sinergia

Se refiere a que el efecto global de dos o más efectos simples es mayor a la suma de ellos, es decir a cuando los efectos actúan en forma independiente.

Sinergia	Valor
Si la acción no es sinérgica sobre un factor	1
Si presenta un sinergismo moderado	2
Si es altamente sinérgico	4

Tabla 12. Valoración de Sinergia

Si en lugar de “sinergismo” se produce “debilitamiento”, el valor considerado se presenta como negativo.

9.1.15 Acumulación

Se refiere al aumento del efecto cuando persiste la causa (efecto de las sustancias tóxicas).

Acumulación	Valor
No existen efectos acumulativos	1
Existen efectos acumulativos	4

Tabla 13. Valoración de Acumulación

9.1.16 Periodicidad

Este atributo hace referencia al ritmo de aparición del impacto.

Periodicidad	Valor
Si los efectos son continuos	4
Si los efectos son periódicos	2
Si son discontinuos	1

Tabla 14. Valoración de Periodicidad

9.1.17 Importancia del Impacto

Conesa Fernández Vítora expresan la “importancia del impacto” a través de la fórmula:

Importancia del Impacto

$$= \pm(3 \textit{Intensidad} + 2\textit{Extensión} + \textit{Momento} + \textit{Persistencia} \\ + \textit{Reversibilidad} + \textit{Sinergismo} + \textit{Acumulación} + \textit{Efecto} \\ + \textit{Periodicidad} + \textit{Recuperabilidad})$$

Los valores de Importancia del Impacto varían entre 13 y 100. Se les clasifica como:

- Irrelevantes (o compatibles): Cuando presentan valores menores a 25.
- Moderados. Cuando presentan valores entre 25 y 50.
- Severos: Cuando presentan valores entre 50 y 75.
- Críticos: Cuando su valor es mayor de 75.

9.2 GESTIÓN DEL RIESGO

9.2.1 Riesgo

Es usualmente vinculado a la probabilidad de que ocurra un evento no deseado. Generalmente la probabilidad de que ocurra dicho evento y algún asesoramiento sobre el daño que se espera de él deben ser unidos en un escenario creíble que combine el riesgo y las probabilidades. En el análisis de escenarios el "riesgo" es distante de lo que se llama "amenaza". Una amenaza es un evento serio pero de poca probabilidad.

9.2.2 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es la incapacidad de resistencia cuando se presenta un fenómeno amenazante, o la incapacidad para reponerse después de que ha ocurrido un desastre. Por ejemplo, las personas que viven en la planicie son más vulnerables ante las inundaciones que los que viven en lugares más altos.

9.2.3 Aspectos sociales

Los daños a edificios y casas son asimilados por los afectados, se rompen paredes y pisos y se colapsan los techos. Los esfuerzos a que son sometidas las estructuras deterioran paredes y suelo. El proceso no se detendrá y también afecta el precio de los terrenos generando, la pérdida del patrimonio, afecta la calidad de vida de los afectados y crea un problema social. Igualmente, los costos que deben de asumir la alcaldía y demás organismos estatales ante los efectos de la subsidencia son considerables. “Debido a que son movimientos a largo plazo no se tiene registros de asociados a desplazamientos, el desconocimiento de los mecanismos y factores hace que se aumente la vulnerabilidad por subsidencia, la identificación de las aéreas con mayor incidencia permite a futuro desarrollar investigaciones detalladas por regiones”⁵⁰.

⁵⁰ <http://www.bivapadcolombia.org/conceptos.shtml>

10 RESULTADOS

A continuación se hace una exposición de los principales resultados obtenidos fundamentalmente de la extracción del recurso hídrico subterráneo, el cual es la principal causa del proceso de subsidencia en la capital y así lo demuestran los comparativos entre la localización de los mayores volúmenes extraídos y la localización donde se presentan los hundimientos más significativos. También se tienen en cuenta los proyectos de construcción realizados desde 2003 a 2011, las áreas con periodos de mayor y menor precipitación de lluvias, las formaciones y el tipo de suelo y estudios de Geotecnia en constitución de estos mismos. Para finalizar se muestran los principales hallazgos de la matriz de Impactos Ambientales desarrollada.

10.1 REGISTRO HISTÓRICO DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA

En cuanto al volumen concesionado por la Secretaría Distrital de Ambiente entre el año 2000 y el 2009, en el "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 (\approx 52%) durante estos 10 años, si la velocidad de recuperación del nivel de agua es muy lenta.

Año	Volumen total Concesionado (m³)	Vol. concesión acumulado (m³)	Volumen total Consumido (m³)	Vol. consumido acumulado (m³)
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

Tabla 15. Volumen total de extracción de agua concesionado (SDA) y real consumido. **Fuente:** Estudio de modelación geotécnica del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá D.C."

Según estudios en el área de “Puente Aranda del año 2001 al 2010 se han venido presentando descensos del orden de 5 a 10 metros aproximadamente, debido a que las captaciones han aumentado las fluctuaciones en las zona más próximas al complejo industrial de Bogotá, como sucede en el sector de Kennedy que desde 1999 a 2010 se han presentado descensos del orden de 20 metros y en el sector de Fontibón descensos del orden de 12 metros con algunos ascensos en los últimos años”⁵¹.

10.2 EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA POR LOCALIDADES

En cuanto al volumen de agua subterránea extraída y clasificada por localidad, según lo reportado en el informe estadístico, el mayor volumen consumido son respectivamente: Fontibón con el 29,86 % equivalente a 5922,3 m³/día, seguida por Kennedy con un 18,35 % al extraer 3640.6 m³/día, la localidad de Puente Aranda representa el 17.88 % con 3546.7 m³/día, Suba con el 11.49 % al extraer 2339,2 m³/día y muy cerca Ciudad Bolívar con el 11.49 % al extraer 2279.5 m³/día.

⁵¹ Sistema de moldeamiento hidrogeológico del Distrito Capital Bogotá. Jairo Alfredo Veloza. 2013. Pág. 194

Esto lo que demuestra es 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%).

A continuación se presenta la información correspondiente, a las distintas localidad es con las concesiones otorgadas y volúmenes consumidos.

Localidades	Metros Cúbicos/día	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Relativa	Frecuencia Relativa Acumulada	Número de concesiones
Fontibón	5922,3	5922	29,86	29,86	15
Kennedy	3640,6	9563	18,35	48,21	4
Puente Aranda	3546,7	13110	17,88	66,09	8
Suba	2339,2	15449	11,79	77,88	26
Ciudad Bolívar	2279,5	17728	11,49	89,38	6
Tunjuelito	641,4	18370	3,23	92,61	4
Bosa	603,5	18973	3,04	95,65	6
Usaquén	445,5	19419	2,25	97,90	13
Teusaquillo	234,4	19653	1,18	99,08	2
Engativá	138,8	19792	0,70	99,78	7
Los Mártires	33,6	19826	0,17	99,95	2
Santa Fe	5,0	19831	0,03	99,97	1
Barrios Unidos	5,0	19836	0,03	100,00	1

Tabla 16. Concesiones con pozo con mayor extracción y localidades. **Fuente:** Secretaría Distrital de Ambiente Pozos Profundos MOCR.

Estas localidades por sobrepasar del 10% de extracción individualmente, son seleccionadas y utilizadas para el análisis tendencial en el estudio y se profundiza la investigación en estas áreas geográficas, siendo las de mayor probabilidad de afectación por subsidencia. Otros criterios de selección son el uso y el tipo de suelo por localidades para determinar los sectores con mayor relevancia para el análisis.

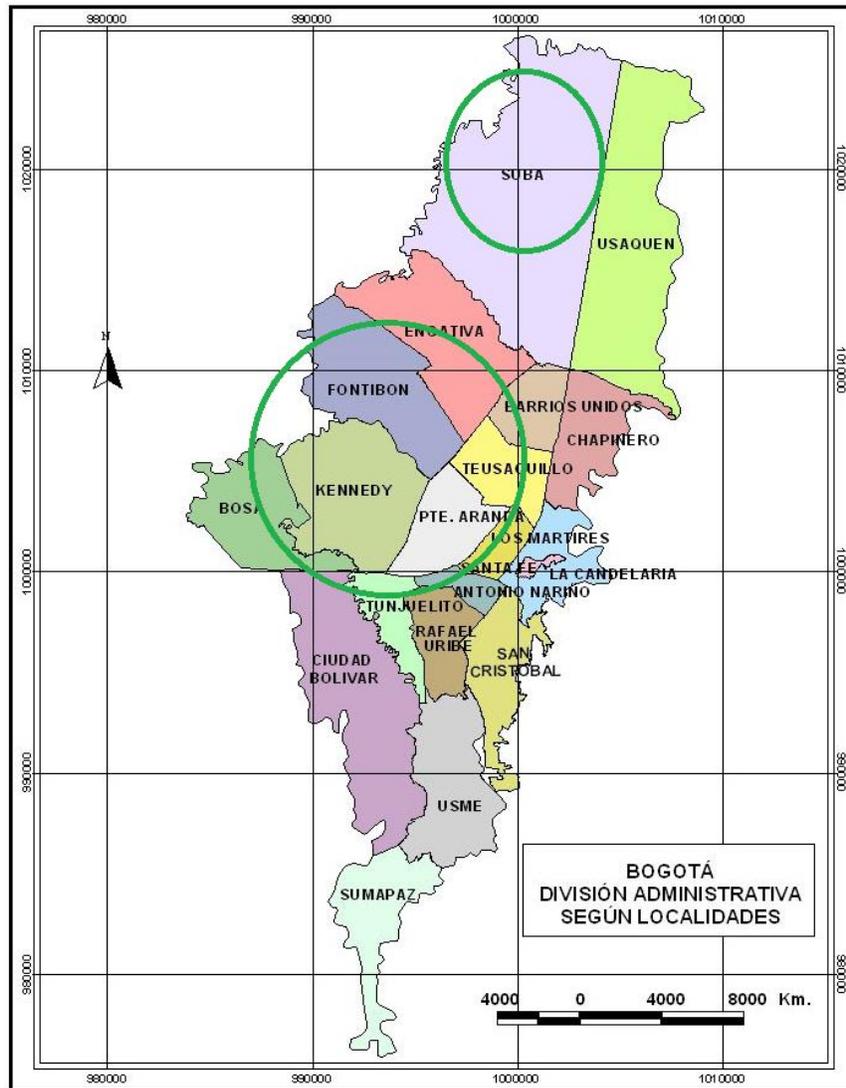


Figura 18. Ubicación de las localidades con mayor extracción de agua subterránea. **Fuente:** Autores

La SDA decidió no otorgar nuevas concesiones para exploración de pozos en Puente Aranda, Fontibón y Kennedy e inició la revisión de las aprobadas. Además, investigará si hay o no recarga hídrica en el subsuelo para adoptar otras medidas.

Existen 95 concesiones vigentes en la ciudad de Bogotá al año de 2011, las cuales extraen 19.836 metros cúbicos/diarios en las áreas urbanas de la ciudad, con un consumo de más 7 millones de m³/año.

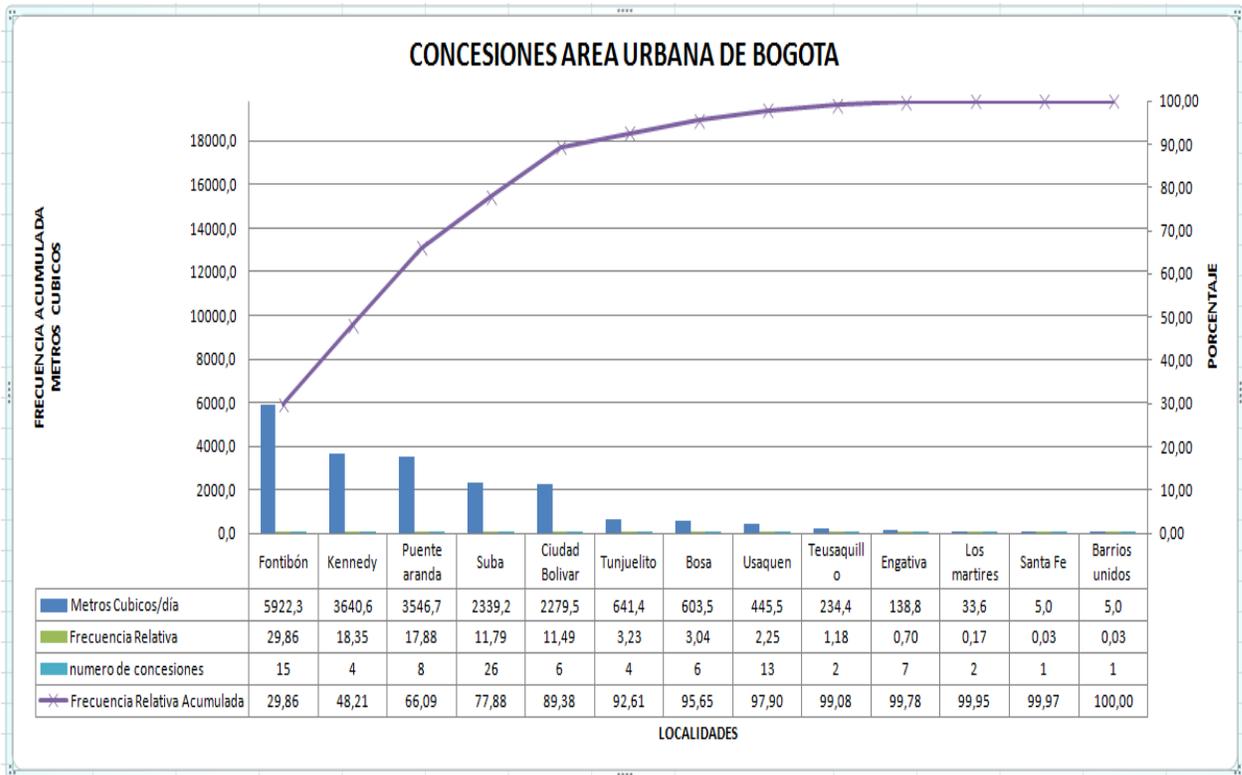


Figura. Extracción de Agua Subterránea Ciudad de Bogotá; **Fuente:** Autores.

Es bastante notable como en las localidades mencionadas encontramos una diferencia abismal con el resto que componen la ciudad, lo que permite deducir la estrecha relación entre las actividades comerciales e industriales con las demás que son básicamente residenciales y domesticas.

10.2.1 Relación de estaciones con puntos de hundimiento

Se realizaron en los años 2003-2004-2007 las mediciones de alturas por la Red Geodésica de Bogotá determinando el cambio de alturas mediante la comparación de 22 estaciones en los diferentes periodos, a continuación se realiza el análisis de los resultados arrojados en estos estudios.

ESTACIONES	COMPARACIÓN CAMPAÑAS 2003- 2004 (-Δh milímetros)	COMPARACIÓN CAMPAÑAS 2004- 2007 (-Δh milímetros)	COMPARACIÓN CAMPAÑAS 2003- 2007 (-Δh milímetros)
Bogotá 1	10,7	11,4	14,0
Bogotá 2	12,5	9,1	8,1
Bogotá 3	26,4	35,3	32,1
Bogotá 4	7,8	10,0	8,1
Bogotá 5	7,7	9,0	8,8
Bogotá 6	13,6	15,1	14,6
Bogotá 7	13,2	6,1	8,6
Bogotá 8	21,8	28,7	23,4
Bogotá 9	98,5	96,9	97,5
Bogotá 10	14,6	10,1	11,7
Bogotá 11	21,3	16,8	19,9
Bogotá 12	15,7	18,8	13,3
Bogotá 13	14,7	18,4	13,5
Bogotá 14	10,3	9,1	11,7
Bogotá 15	21,2	17,0	20,7
Bogotá 16	5,5	2,3	3,4
Bogotá 17	11,6	13,5	10,1
Bogotá 18	,+ 1,4	1,7	0,6
Bogotá 19	0,3	4,7	2,9
Bogotá 20	,+ 0,3	2,2	1,1
BOGA	48,9	58,2	54,9
BOGT	41,9	51,1	47,8

Tabla 17. Cambio en alturas derivado del estudio de GNSS- Estudios realizados 2003-2004-2007 Red Geodésica de Bogotá. **Fuente:** Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Con relación a las 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 (subsistencia 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).

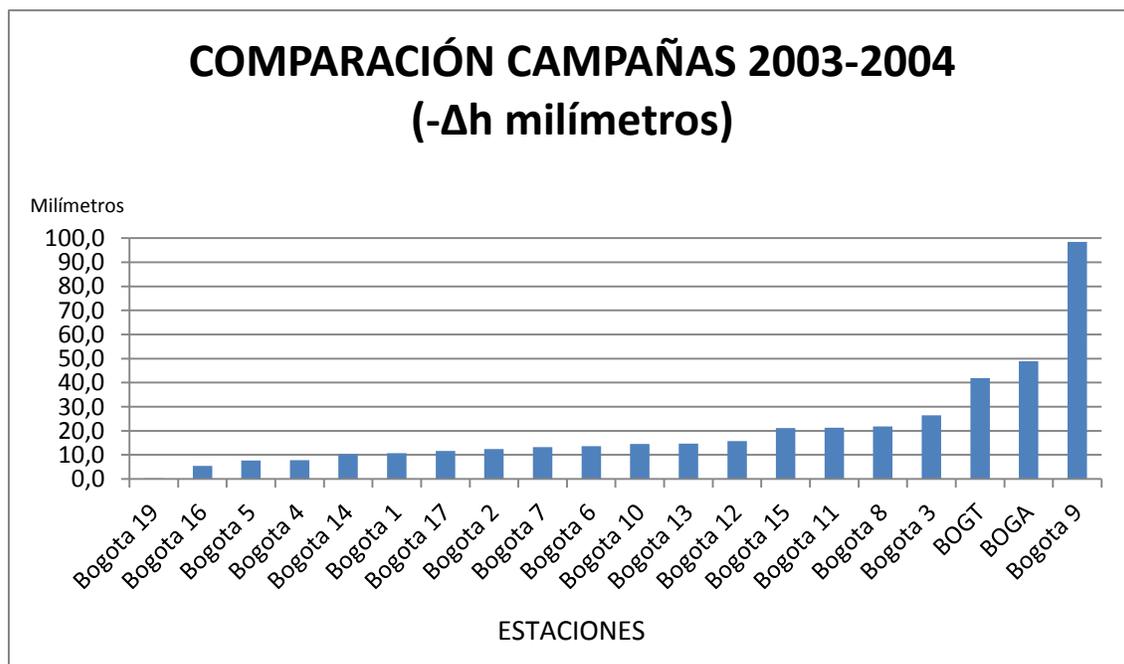


Figura N° 20: Puntos Geodésicos con hundimientos de suelo detectados 2003-2004. **Fuente:** Autores

Los puntos geodésicos con mayores niveles de hundimiento determinados en la campaña 2003-2004 realizada con la Red Geodésica de Bogotá por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, son respectivamente, Bogotá 9 área establecida en la localidad de Puente Aranda con un promedio de 10 cm/año de velocidad media de deformación y hundimientos en terreno, las estaciones BOGA y BOGT ubicadas en el servicio Geológico Nacional y el IGAC siguen con un promedio de 5 cm/año de hundimientos, Bogotá 3 ubicada al nor-occidente de la ciudad con un promedio de 2.5 cm/año de hundimientos y Bogotá 8 y 11 ubicadas en Fontibón al occidente de la ciudad con un promedio de 2 cm/año de hundimientos.

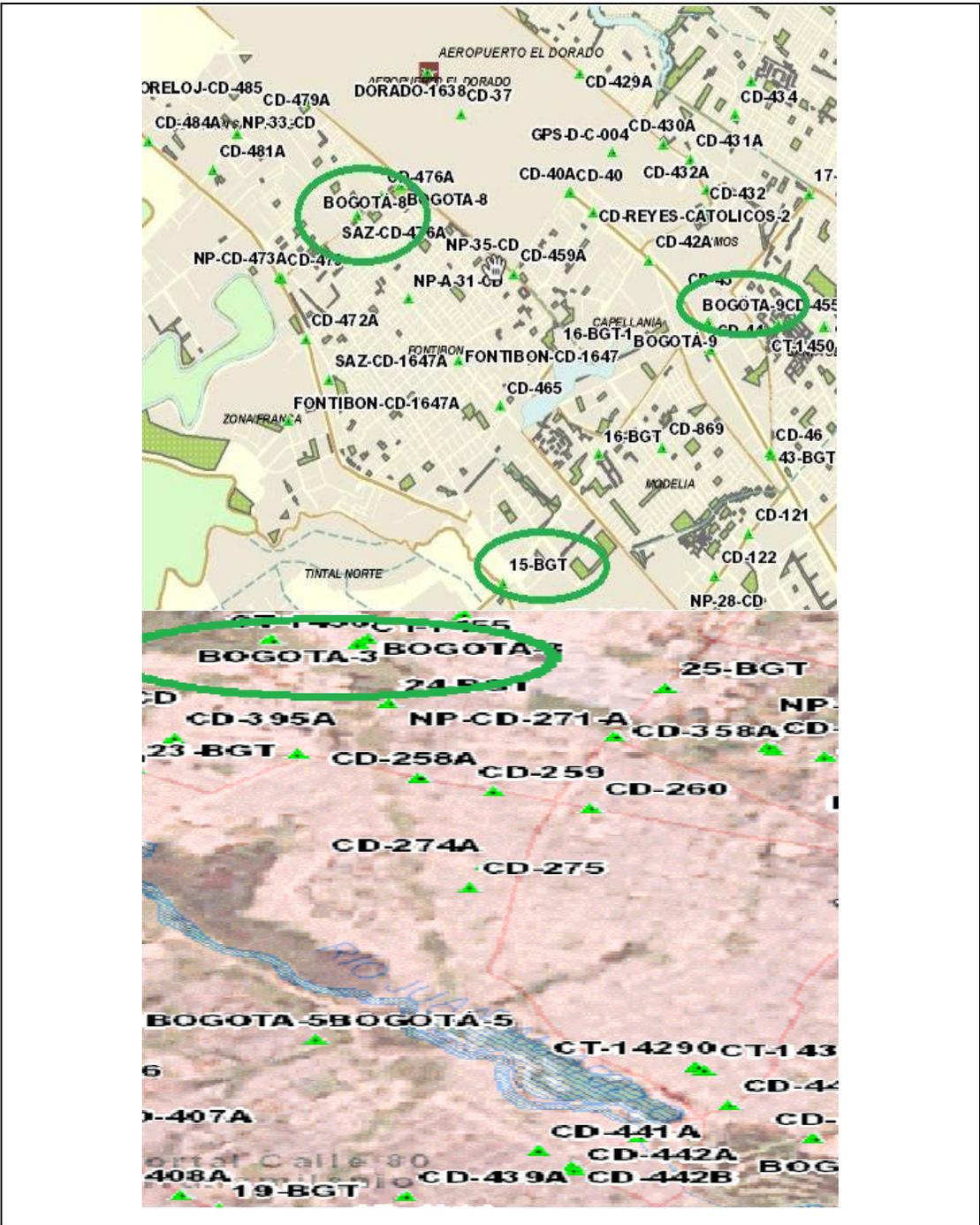


Figura 21. Estaciones Bogotá 9-8-15-3. Fuente: IGAC.



Figura 22. Puntos Geodésicos con hundimientos de suelo detectados 2004-2007.

Fuente: Autores

Para el periodo analizado 2004-2007 se mantiene la tendencia en la estación Bogotá 9 con un promedio de 9.7 cm/año desplazamiento vertical, la estaciones BOGA y BOGT tienen un leve aumento en sobrepasando el promedio de 5 cm/año de hundimiento, la estación Bogotá 3 pasa de 2.5 cm/año a 3.5 cm/año, Bogotá 8 se mantiene por debajo de los 3 cm/año de hundimiento.



Figura 23. Puntos Geodésicos con hundimientos de suelo detectados 2003-2007.
Fuente: Autores

Para el periodo 2003-2007 se mantiene la tendencia en la estación 9 con un promedio de hundimiento de 9.75 cm/año, BOGA y BOGT se mantiene entre 5.5 y 4.5 cm/año promedio de hundimiento de terreno, los cuales son los más representativos y significativos para el estudio según las campañas realizadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

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. 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 (FOPAE, 2012).

10.2.2 Monitoreo Subsistencia mediante Interferometría Diferencial DInSAR

El estudio DInSAR fue comparado en este proyecto de investigación con los datos obtenidos en dos campañas realizadas de estimación de subsidencia en mediciones llevadas a cabo en Abril del 2003 y el Julio- Agosto del 2007 con la red geodésica de Bogotá del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, luego se confrontó por localidades y volúmenes de extracción de agua subterránea relacionadas en figura 8. De Extracción de Agua Subterránea Ciudad de Bogotá, llevándonos a determinar y referirnos a las mismas zonas por datos con características homogéneas, la asociación de la presión sobre el recurso hídrico al extraerlo asociado a la ausencia de recargas en acuíferos por nuevas construcciones generadas por el crecimiento urbano de la ciudad que impide las infiltraciones del agua lluvias por las capas de concreto y asfalto en vías sobre el recurso suelo.

Estos factores determinantes nos confieren resultados en datos de deformación del suelo por cambio de alturas en las mismas áreas y valores más altos de hundimiento. Concurriendo estos datos como la fuente de selección de las áreas más afectadas y de priorización en el estudio de subsidencia.

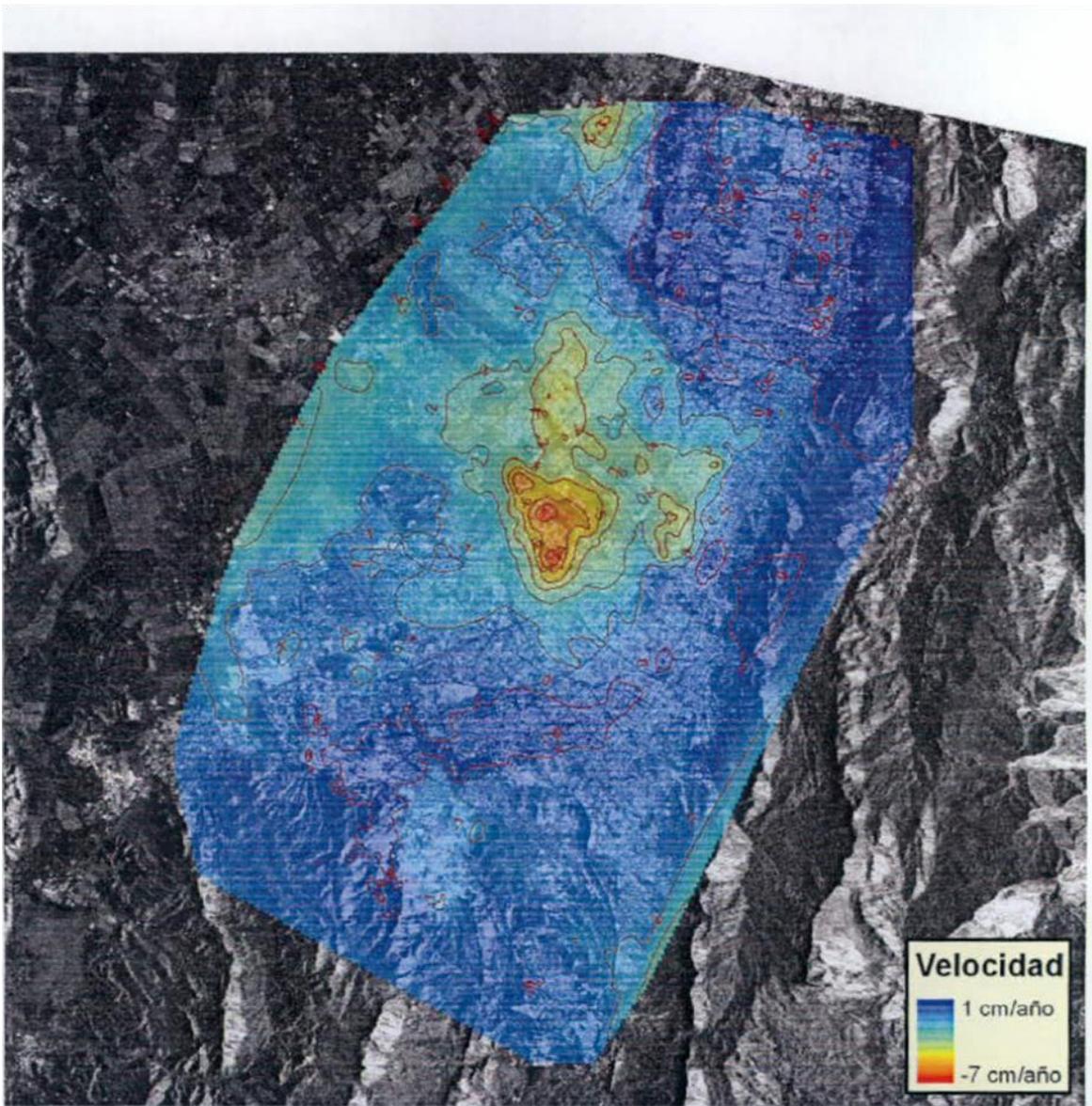


Figura 24. Deformación estudio 2007 **Fuente:** DinSAR

Los resultados del Convenio entre el Fondo de Atención y Prevención de Emergencias de Bogotá D.C. y el Instituto Cartográfico de Catalunya entregado el 27 de septiembre de 2007, determina que existen varias zonas con movimientos de 7 cm/año en distintas regiones de la ciudad de Bogotá, las cuales se encuentran en la zona centro y noroeste, en el estudio no se especifica mayor información de los resultados asociados a estos datos.

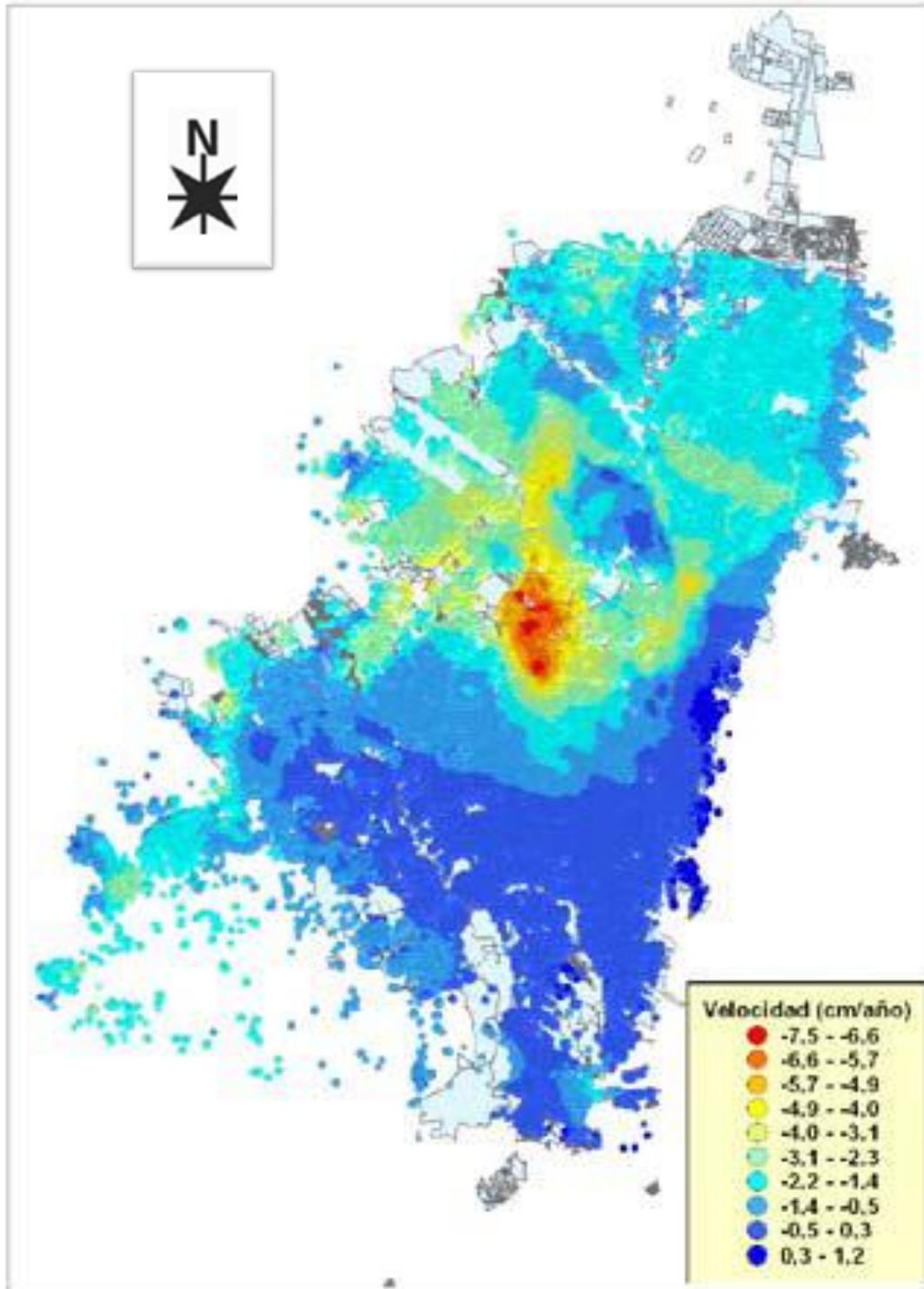


Figura 25. Resultados de la deformación estudio 2009 **Fuente:** La interferometría diferencial DinSAR – una técnica para el monitoreo de la subsidencia en Bogotá D.C. Pág. 9

En el año 2009 se realiza un nuevo estudio para determinar la evolución de la subsidencia durante el periodo 2006-2008 donde se presentan resultados con un “foco principal de subsidencia situado en la zona de Puente Aranda donde la magnitud del movimiento según éste análisis alcanza los 7.5 cm/año. Del mismo modo se distingue un gradiente de deformación con centro en dicha zona. En la parte norte de la ciudad también se localiza una zona de subsidencia significativa”.⁵²

En la disertación se analizaron los interferogramas generados a partir de las imágenes de 2008 y de marzo de 2009, Concluyendo como existe un manifiesto movimiento de deformación significativo en la zona de Puente Aranda. Se puede establecer que en este territorio se presentan características geológicas y extracción de aguas subterráneas que influyen en el hundimiento del terreno.

En Mayo de 2011 se entregó el Informe elaborado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional, contratado por el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias FOPAE denominado "Estudio de modelación geotécnica del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá D.C." el cual comprendió “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”⁵³.

Según los registros e información obtenida en el estudio se toman registros fotográficos para evidencias efectos en infraestructura y evidencias del proceso en terreno, los cuales son analizados utilizando como herramienta la matriz de Evaluación del Impacto Ambiental, metodología de Conesa Fernández Vítora y los componentes recomendados por la Guía Técnica Colombiana (NTC 104) para determinar la vulnerabilidad y susceptibilidad en el área de estudio.

⁵² DInSAR DIFFERENTIAL INTERFEROMETRY-ATECHNIQUE FOR SUBSIDENCE MONITORING IN BOGOTÁ D.C. Institut Cartogràfic de Catalunya – ICC. Germán Barreto Arciniegas y Dulfay Ortiz Abaunza. Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá – DPAE.2009. Pág. 9.

⁵³ Estudio de modelación geotécnica del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá D.C, Mayo de 2011.

10.2.3 Proyectos de construcción realizados desde 2003

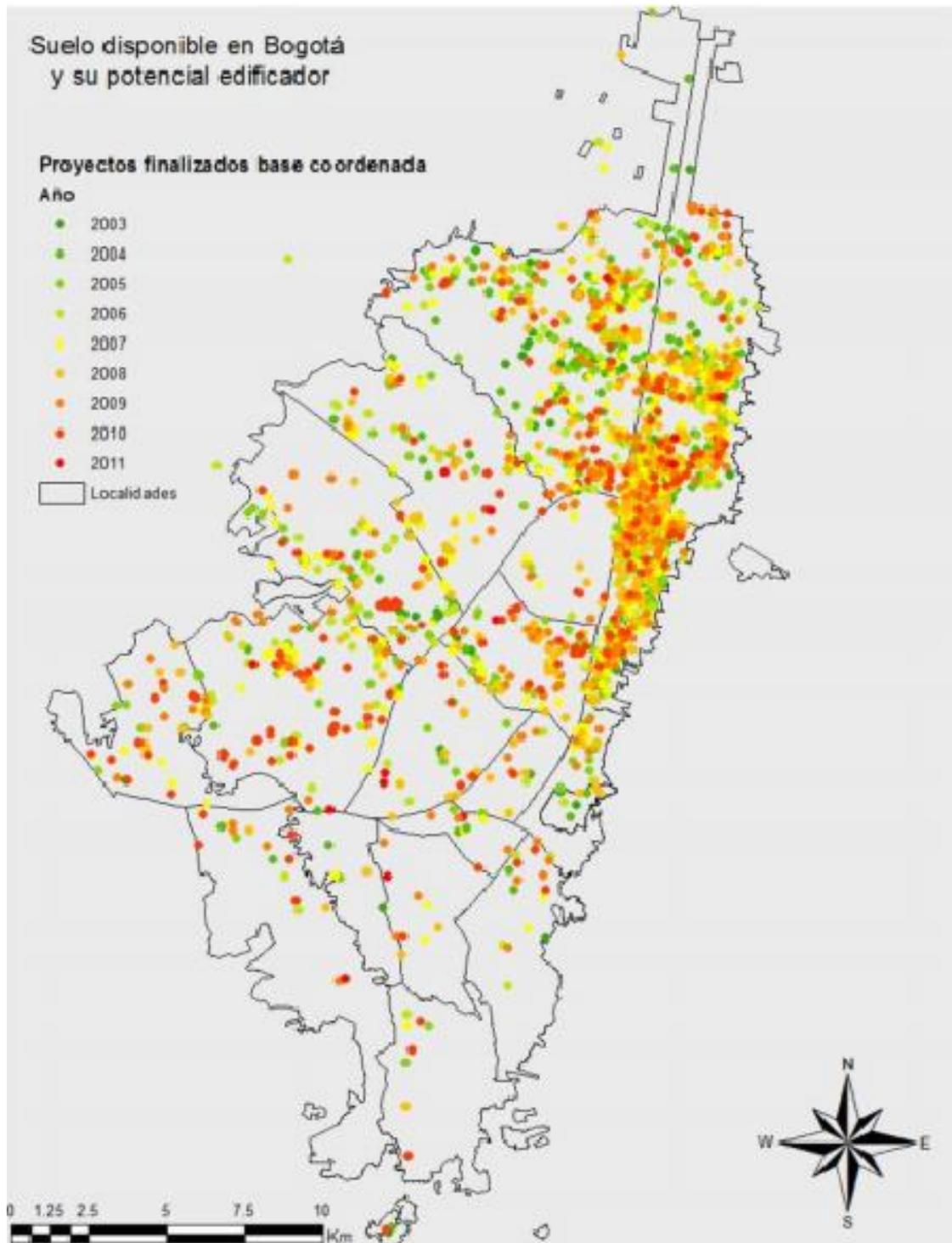


Figura 26. Proyectos de Construcción realizados en Bogotá en el periodo 2003-2011; **Fuente:** Camacol Bogotá - Coordenadas Urbana.

Las edificaciones y construcciones realizadas en el periodo 2003 al 2009 se realizaron especialmente en las regiones orientales y noroccidentales, refiriéndose al centro de la ciudad de Bogotá y su expansión en la última década, las áreas más construidas no se encuentran en el estudio como las zonas que han sufrido mayores procesos de subducción según los resultados generados reportados en los puntos geodésicos y estudio DIN SAR, por lo cual en este análisis los procesos de hundimiento del suelo no son asociados como factores determinantes para la subsidencia por el gran peso generado de estas nuevas edificaciones de las áreas más afectadas que se encontraron.

10.2.4 Microzonificación en la localidad de Puente Aranda

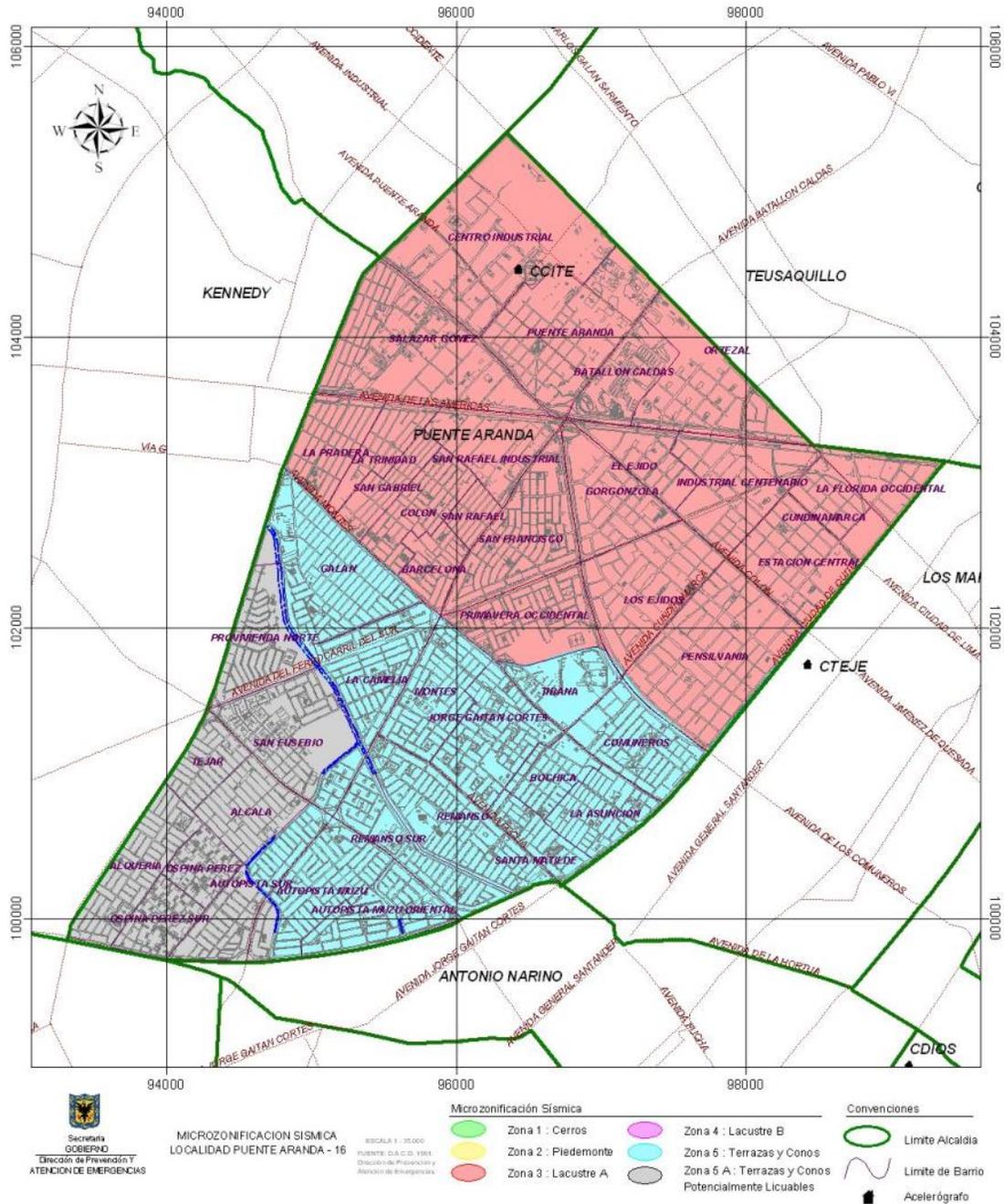


Figura 27. Microzonificación Sísmica Localidad de Puente Aranda. **Fuente:** http://www.fopae.gov.co/portal/page/portal/FOPAE_V2/Mapa%20Gestion%20del%20Riesgo%20Bogotá

De acuerdo al estudio de microzonificación la zona 4 y la zona 3 presentan las áreas con mayores deformaciones las cuales por sus características, se encuentran compuestas por suelos lacustres tipo A y B, conformadas por

depósitos de arcilla blandos, con arenas de espesor medio a bajo, los cuales presentan una capa superficial de arcilla de espesor variable no mayor de 10 a 50 metros de profundidad, la zona lacustre tipo B los 30 a 50 metros son más blandos que la zona 4 y la zona de profundidad de la roca base es próximo de los 200 metros a los 400 metros de profundidad.

Estos suelos que son parte del componente de la Formación Sabana y sus acuíferos presentan arcillas de origen lacustre con suelos de consistencias muy blandos, muy compresibles y de muy baja a media capacidad portante.

10.2.5 Modelo Hidrogeológico en las Localidades de Puente Aranda, Kennedy y Fontibón

Para el mes de noviembre y diciembre de 2012 la Secretaria Distrital del Medio Ambiente (SDA), realizo en los sectores de Puente Aranda, Kennedy y Fontibón, un estudio para verificar las condiciones de movimiento, dirección y descensos de niveles del agua subterránea del acuífero de la formación Sabana, (Guadalupe y Lobo Guerrero) dando como resultado un mapa de Isopiezas de esta área, el cual arroja efectos negativos, en relación al movimiento y dirección del flujo preferencial, el agua corre hacia el sector donde se ubican los pozos con mayor extracción de agua subterránea en la zona industrial de la ciudad.

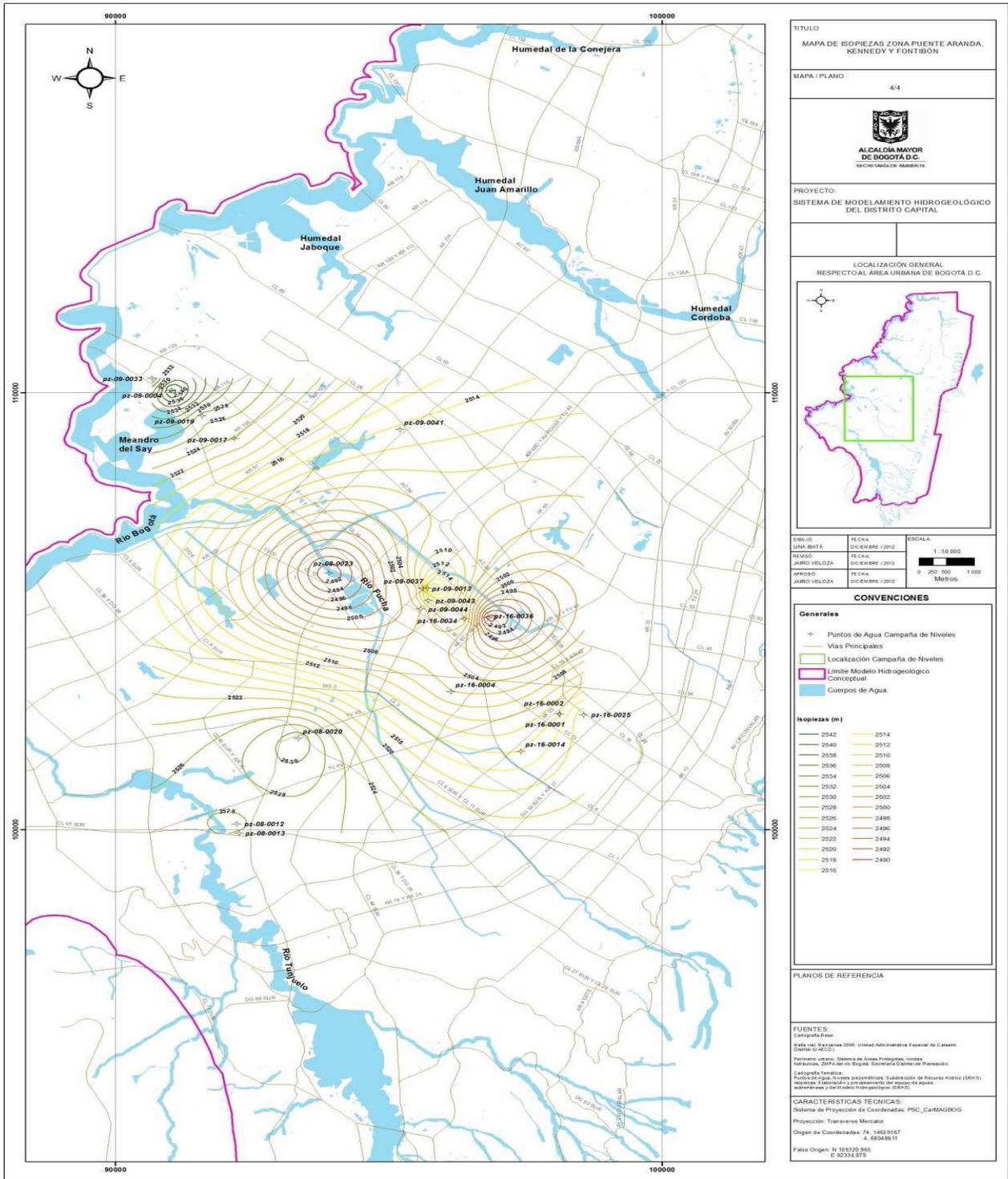


Figura 28. Isopiezas Zona Puente Aranda, Kennedy y Fontibón. **Fuente:** VELOZA, Jairo Alfredo Sistema de moldeamiento hidrogeológico del Distrito Capital Bogotá. 2013. Pág. 190

Los resultados arrojados nos indican que se presenta como consecuencia de la actividad de extracción de aguas subterráneas, la afectación por interrupción y cambio de dirección del flujo, lo que se interpreta como la modificación el ciclo del agua en los niveles subsuperficiales y del flujo de agua subterránea de esta área de estudio.

El cambio de dirección de flujo en el recurso hídrico subterráneo se concentra en el área con mayor cantidad de pozos explotados, obedeciendo el cambio de dirección principalmente a las actividades antrópicas desarrolladas y la no recarga de acuíferos en la Formación Sabana. El agua subterránea de la región tiene una dirección de desplazamiento general de este a oeste es decir de los cerros orientales hacia el Río Bogotá, recurso natural que se encuentra afectado por las actividades industriales de explotación y uso del recurso.

La extracción de acuíferos se realiza en formaciones del cuaternario, donde se presentan intercalaciones de arcillas y arenas del psoceno, siendo la Formación Sabana y Subachoque las intervenidas para el uso. Se ha dejado a un lado la mejor alternativa de extracción del recurso, al no realizar perforaciones a mayor profundidad para realizar la extracción de recurso por su costos económicos en equipos y obras de adecuación, dejando a un lado esta alternativa de prevención para este escenario formado por el complejo de formaciones del grupo Guadalupe y del Terciario con acuíferos con intercalaciones de Lutitas y Arcillolitas, donde es necesario para disminuir el efecto llegar más profundo para realizar la extracción.

10.2.6 Hallazgos en terrenos de estos hundimientos

Las características estructurales de las vías y construcciones son afectadas por la deformación del suelo de la Localidad de Puente Aranda, es de muy fácil la observación verificar las condiciones de oscilación en calles de esta localidad, con hundimientos no fuertes pero constantes en el terreno y entorno.



Fotografía 7. Hundimiento Calle 2A con Transversa 53. **Fuente:** Autores

Se aprecia y señala en la imagen las deformaciones en el andén y parte del césped, el hundimiento principal se observa no sobre la calle, la cual se mantiene en condiciones óptimas en el asfalto de la vía. Las deformaciones son recurrentes en andenes y vías de la localidad de Puente Aranda, intensificado por el tráfico de vehículos pesados de carga.



Fotografía 8. Hundimiento Calle 17 con Carrera 65. **Fuente:** Autores

A corto plazo estas deformaciones no constituyen una amenaza inflexible para la infraestructura de redes de servicios públicos, vías o edificaciones, a mediano y largo plazo, las anomalías pueden incrementarse por factores como el aumento de la explotación del líquido o construcciones en las partes altas de los cerros, región indispensable para la recarga de los acuíferos de la ciudad.



Fotografía 9. Hundimiento Carrera 5 con Diagonal 16. **Fuente:** Autores

El impacto generado adquiere cada vez una mayor importancia debido al costo de los daños que sufren las casas habitación, obras civiles e infraestructura urbana y elementos propios del paisaje como arboles y zonas verdes.



Fotografía 10. Calle 17 con Carrera 65. **Fuente:** Autores

Existen hundimientos progresivos bajo ciertas condiciones particulares de tipo de suelo y uso, que están asociados a los volúmenes de extracción del recurso natural por las industrias del sector. La estimación de las deformaciones en diferentes áreas y su evolución, depende de factores naturales como la capacidad de infiltración y recarga de acuíferos, generando posiblemente un mayor índice de deformación por subsidencia.

Se evidencian procesos de subsidencia local en recorridos por la zona oriental de la ciudad, específicamente por sectores que se localizan en las zonas geotécnicas Piedemonte y Lacustre.

En la sabana las Formaciones Geológicas del Cuaternario con suelos de origen Lacustres, constituidos por la Formación Sabana y Tilatá entre las más relevantes, presentan depósitos de cono aluviales y coluviales que están compuestos principalmente por arenas, gravas, limos y arcillas, asociados al relieve constituido por cerros y planicies que forman y establecen un flujo hídrico de oriente a occidente de la ciudad para alimentar la cuenca del Río Bogotá.

10.2.7 Evaluación del Impacto Ambiental

Los valores de importancia superiores a 50 proyectados por la Evaluación del Impacto Ambiental en Puente Aranda con relevancia de impacto severo se presentaron en orden.

Afectación en el medio físico por extracción del agua subterránea generando el cambio de la dinámica del agua “Ciclo del agua” al ser disminuir el nivel de los acuíferos de la Formación Sabana y Subachoque del orden de 5 a 20 metros en las en los sectores de las Localidades de Kennedy, Fontibón y Puente Aranda respectivamente, impacto directo generado por interrupción y cambio de dirección del flujo de la corriente subterránea interpretándose como la modificación el ciclo del agua en los niveles y de flujo de agua subterránea de esta área de estudio.

Igualmente en el medio físico se ve afectado por hundimientos de los terrenos y cambios en la Geomorfología, generando por compactación del suelo al disminuir los niveles freáticos de los acuíferos de las formaciones Sabana y Subachoque, desarrollando deformaciones en suelo las que afectan las infraestructuras de viviendas, industrias y la red vial.

Ver anexo: Matriz de Evaluación de Impactos Ambientales

11 MEDIDAS DE MITIGACIÓN TÉCNICO-ADMINISTRATIVAS.

Con el fin de evitar que dicha situación derive en problemas severos sobre la infraestructura de la Capital, se deben adelantar acciones tanto orden técnico como de orden administrativo (Hermelín, 2003). Son múltiples las medidas a tomar respecto a mitigar y reducir el impacto generado por la subsidencia. Estas se pueden clasificar de la siguiente manera:

11.1 MEDIDAS TÉCNICAS

Desde el punto de vista técnico, el descenso del nivel potenciométrico en la Sabana de Bogotá podría controlarse con las siguientes medidas:

- Determinar la extracción segura de la cuenca hidrogeológica
- Medir los caudales actualmente extraídos
- Controlar técnicamente la apertura de nuevos pozos
- Establecer una red de observación de niveles de agua subterránea
- Construir pozos de inyección y dársenas de esparcimiento para recargar artificialmente los acuíferos.

Los métodos para controlar la subsidencia inducida por explotación de aguas tienen por propósito al menos manejar el suministro y distribución general de aguas limpias de tal modo que los esfuerzos efectivos en el sistema de acuíferos no aumente más allá del nivel de esfuerzos ya existente. Dentro de las alternativas se consideran:

- Reducción del volumen de bombeo
- Recarga artificial de los acuíferos con aguas superficiales
- Aumento de la presión de los acuíferos a través de los pozos

11.1.1 MEDIDAS ADMINISTRATIVAS

En caso de afectación a los componentes social, económico y cultural (infraestructura o actividades individuales o colectivas), la compensación debe orientarse a la reposición, garantizando iguales o mejores condiciones de vida de las personas afectadas por:

- Desvalorización de terrenos e inmuebles
- Desplazamientos a nivel de personas y enseres
- Daños a nivel industrial y económico a nivel empresarial
- Afectación estructural como vías, puentes, edificios etc.

12 CONCLUSIONES

- Las mediciones confirman que sí hay subsidencia en Bogotá, las zonas de máxima hundimientos se encuentran en la localidad de Fontibón, Kennedy y Puente Aranda respectivamente. En un periodo de evaluación de aproximadamente ocho años; en algunos sectores se detectaron tasas de hasta 7,5 cm por año.
- La construcción de viviendas, vías y demás infraestructura urbana en las montañas de Bogotá, impiden la percolación del agua al subsuelo, impidiendo conservar la recarga de los acuíferos de la Formación Sabana, afectando su flujo y presión natural.
- Existen hundimientos progresivos bajo ciertas condiciones particulares de tipo y uso de suelo, que se asocian a la evolución de las deformaciones en diferentes áreas de Bogotá y las constituidas por suelos lacustres tipo A y B.
- Las localidades de Kennedy, Puente Aranda y Fontibón presentan cambio de dirección de flujo en el recurso hídrico subterráneo por su extracción; al disminuir los niveles de los acuíferos de la Formación Sabana interrumpe el flujo desde los cerros orientales hacia el río Bogotá, afectando el Ciclo Hídrico del Agua por alteración del medio y el escenario natural.
- Las medidas de mitigación y control a las concesiones no son las más adecuadas, desencadenado un aumento de la demanda en la explotación.

- La subsidencia no se puede detener mientras continúe la explotación de los sistemas acuíferos de la región, la medición en recarga y almacenamiento arroja altas diferencias con valores negativos, acentuado por el incremento exponencial de la población y la demanda del recurso natural. Se hace necesaria la búsqueda de alternativas para suplir las necesidades de la industrialización.
- La metodología de Conesa Fernández Vítora permitió identificar, evaluar, facilitar, interpretar y definir los principales aspectos que influyen en la problemática estudiada así como proponer medidas de mitigación y recomendaciones apropiadas para esta situación.

13 RECOMENDACIONES

- Evitar la construcción de viviendas y demás obras de infraestructura en los Cerros Orientales de Bogotá, por tanto estas edificaciones impiden que se filtre el agua y pueda llegar a las zonas más bajas, manteniendo la presión, recarga y el nivel de los acuíferos. Es de gran importancia prevenir el desarrollo y afectación en otras localidades, como en los cerros de Suba, que presenta un proceso de urbanización con características similares, las cuales pueden desencadenar en un nuevo proceso de subsidencia en esta localidad. Según el POT estas áreas no son permitidas para construcción, sin embargo se han presentado aumentos de edificaciones en las proximidades a las zonas montañosas aledañas a la capital y la remoción de la capa vegetal.
- La red de estaciones tienen una marcada variación en sus componentes verticales de medición y son ampliamente utilizadas en las aplicaciones de ingeniería, es importante para la continuidad del monitoreo el realizar las mediciones en ciclos frecuentes para determinar el grado de afectación al suelo y su evolución, disminuyendo la probabilidad de sucesos que afecten a los ciudadanos y estructuras.
- Control estricto en el otorgamiento de licencias y permisos de explotación, teniendo en cuenta volúmenes otorgados y su rango de tiempo ya que por los beneficios como bajo valor del metro cúbico y poco control en la medición de extracción, hace que esto se convierta en una tendencia, o en su defecto cancelar su otorgamiento, por lo menos mientras existe una recarga a mediano o largo plazo en el subsuelo.

- Exigir estudios y monitoreo en los suelos donde se proyecta la realización de obras e infraestructura, como edificios, puentes, vías etc., con el fin de tomar las medidas cautelares y de mitigación que estas puedan tener en el área de su desarrollo.
- Debe de existir una mayor divulgación de los peligros y efectos generados por este proceso, donde la educación ambiental sea una herramienta de prevención en la pérdida de bienes materiales y en algunas situaciones vidas humanas.
- Desarrollar estudios ambientales y monitoreo específicos con análisis de la problemática de suelos en donde se proyecta la realizar obras de infraestructura.
- Realizar las mediciones de estaciones en ciclos frecuentes para determinar el grado de afectación al suelo y su evolución.
- Generar condiciones y alternativas de recarga de acuíferos en áreas específicas de infiltración, con zonas de amortiguación y protección para la recarga de acuíferos.
- Realizar nuevos proyectos de investigación, profundizando en las causas de la deformación de suelos, debido al poco conocimiento e investigación de la subsidencia en la ciudad de Bogotá.

14 BIBLIOGRAFÍA

- VÁZQUEZ C, Jesús N. Cálculo de la subsidencia unidimensional debida los descensos del nivel piezométrico aplicado al caso urbano de Murcia y a los efectos sobre sus edificios. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, 2001.
- JORDA LOPEZ, Antonio. Manual de Edafología, 2005. W, Farmer. Propiedades Elásticas de las Rocas.1968
- GALAN, Carlos. Disolución y Génesis del Karst en Rocas Carbonáticas y Rocas Silíceas. 1991.
- Estudio de funcionamiento de la infiltración y recarga de acuíferos, Sabana de Bogotá. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA – CAR. Bogotá. Colombia. 2006.
- Estudio Interferométrico diferencial AR (DInSAR) para la monitorización de deformaciones del terreno en la ciudad de Bogotá- Instituto Cartográfico de Cataluña.2007. Pág. 24.
- GARDNER, Walter H. GARDNER, Wilford R. Física de Suelos. Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana. I. Primera Edición. México D.F., México. 1973. 529 Págs.
- VÉLEZ, María V., Hidráulica de aguas subterráneas, Tercera edición, Universidad Nacional del Colombia, Facultad de minas. 2004.
- GLYNN, Henry. HEINKE, Gary W. Ingeniería Ambiental. Editorial Prentice Hall. Segunda Edición México, 1999. 800 Págs.

- GONZALEZ DE VALLEJO, Luis I., FERRER, Mercedes., ORTUÑO, Luis., OTEO, Carlos. Ingeniería Geológica. Pearson Educación, Madrid España, 2002, 744 Págs.
- Introducción a la Mecánica de suelos. Sowers George B., Sowers George F., Editorial Limusa-Wiley s.a. México D.F. Primera Edición. 1972. 677 Págs.
- RESTREPO VILLALAS, Carlos. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. México: Limusa, 1979.
- Línea meteórica isotópica de Colombia. Meteorología Colombiana. No. 8. RODRÍGUEZ C. O., 2004. Págs. 43-51. Bogotá, D. C. Colombia.
- Modelo hidrogeológico conceptual para evaluar riesgos en acuíferos del sector Sisga-Embalse de Tominé – Sabana de Bogotá. CAMACHO R., Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. 1999. Bogotá. Colombia.
- Plan de manejo ambiental de agua subterránea en la sabana de Bogotá y Zona Crítica, CAR. Primera edición-Bogotá, D. C., Noviembre de 2008.
- Secretaría Distrital de Ambiente, Instructivo Para Trámites y Servicios Ambientales en el Distrito; Alcaldía Mayor De Bogotá; Edición Yineth Pinilla, Bogotá, Julio de 2010. Págs. 9-16.
- VELOZA, Jairo Alfredo. Sistema de moldeamiento hidrogeológico del Distrito Capital Bogotá, 2013.
- CONESA FERNANDEZ, Vitora.1997; Viladrich y Tomasini, 1999.

- CONESA FERNADEZ-VITORA. Vicente. Guía Metodológica Para La Evaluación Del Impacto Ambiental. Mundi-Prensa, 1993.
- BARRETO ARCINIEGAS, Germán., ORTIZ ABAUNZA, Dulfay., DInSAR DIFFERENTIAL INTERFEROMETRY-ATECHNIQUE FOR SUBSIDENCE MONITORING IN BOGOTÁ D.C. Institut Cartogràfic de Catalunya – ICC. Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá – DPAE, 2009.
- POLAND. Joseph F., Guidebook to Studies of Land Subsidence due to groundwater Withdrawal, UNESCO.1984.
- Zonificación Sísmica de Bogotá, Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE) Coordinación de Investigación y Desarrollo. 2010. 152 Págs.
- NUHFER, Edwar. Guía Ciudadana de los Riesgos Geológicos. 1997

NORMATIVA LEGAL

- Decreto N° 042 de 1999, por el cual se modifica la estructura orgánica del Departamento Administrativo de Catastro Distrital, establecida en el Decreto 028 del 15 de enero de 1997.
- Decreto N° 1541 de 1978, el cual define las regulaciones para la explotación de las aguas subterráneas y obliga a la obtención de concesión para la explotación del RHS.

- Resolución N° 250 de 1997 SDA, se obliga a la determinación anual de los niveles estáticos y dinámicos y el monitoreo fisicoquímicos de las aguas.
- Resolución N° 1391 del 2003 SDA, adopta los formatos que se deben diligenciar para adelantar trámites ante la SDA para obtención o prorroga de una nueva concesión de agua.

REFERENCIAS WEB

- <http://noticias.universia.net.co/enportada/noticia/2012/09/10/965109/suelos-arcillosos-bogota-proclives-hundimiento.html>
- http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol13/46_Subsidencia_Bogota_GPS_nivelacion_Martinez_et_al.pdf
- <http://www.sirgas.org/index.php?id=61>
- http://www.logemin.com/eng/Download/pdf/17_Descenso_niveles_agua_Sabana_Bogota.pdf
- <http://www.bogota.gov.co/ciudad/historia>
- <http://www.revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/UDGeo/article/.../5247>
- www.bdigital.unal.edu.co/.../1/victormanuelhewittvalbuena.2011.pdf

15 ANEXOS

15.1 MATRIZ DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Documento adjunto en CD.

15.2 ARCHIVO FOTOGRAFICO



DIRECCION: CARRERA33 N° 25 – 50 COSTADO OCCIDENTAL. Fuente: Autores



DIRECCIÓN: CALLE 24 CON CARRERA 36 A COSTADO OCCIDENTAL. Fuente: Autores



AVENIDA DE LAS AMERICAS CON TRANSVERSAL 32 C COSTADO NORTE. Fuente: Autores



DIRECCIÓN: CALLE 25 CON CARRERA 33 ESQUINA. Fuente: Autores

15.3 ZONIFICACION DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE BOGOTÁ PARA EL DISEÑO DE EDIFICACIONES

Nombre	Geotecnia	Geología	Geomorfología	Composición principal	Comportamiento geotécnico general	Espesor
Cerros A	Roca de arenisca	Formaciones de Areniscas	Cerros de alta pendiente	Areniscas duras	Rocas competentes y resistentes a la meteorización, eventuales problemas de estabilidad de taludes en excavaciones a cielo abierto, principalmente cuando estén fracturadas o con intercalaciones de arcillolitas blandas	
Cerros B	Roca de arcillolita	Formaciones de Arcillolitas	Cerros de moderada a alta pendiente	Arcillolitas blandas	Rocas de moderada competencia y susceptibles a la meteorización, problemas de estabilidad de taludes en excavaciones a cielo abierto, principalmente cuando estén fracturadas	
Piedemonte A	Suelo coluvial y aluvial norte	Coluviones y Complejo de Conos Aluviales	Piedemonte	Gravas arcillo arenosas compactas	Suelos de alta capacidad portante pero pueden presentar problemas de inestabilidad en excavaciones abiertas	< 50 m
Piedemonte B	Suelo coluvial y aluvial centro			Gravas areno arcillosas compactas		
Piedemonte C	Suelo coluvial y aluvial sur	Gravas areno arcillosas compactas				
Lacustre A	Suelo lacustre muy blando	Terraza Alta - Lacustre	Planicie	Arcillas limosas muy blandas	Suelos de muy baja a media capacidad portante y muy compresibles	20 - 500 m
Lacustre B	Suelo lacustre blando			Arcillas limosas blandas		
Lacustre C	Suelo lacustre - aluvial			Arcillas arenosas firmes		
Aluvial	Suelo aluvial grueso a medio	Terraza Baja - Aluvial y Complejo de Conos Aluviales	Planicie	Arenas arcillosas sueltas a compactas	Suelos de mediana a alta capacidad portante poco compresibles, susceptibles a licuación e inestables en excavaciones a cielo abierto	50 - 250 m
Llanura A	Suelo de llanura - lacustre	Llanura de Inundación	Llanura	Arenas sueltas y arcillas limosas blandas	Suelos de moderada capacidad portante y compresibles, susceptibles a licuación	200 - 500 m
Llanura B	Suelo de llanura - aluvial			Arenas sueltas y arcillas arenosas duras		
Cauce	Cauce activo o antiguo	Cauces Activos	Piedemonte y Planicie	Gravas arenosas sueltas a compactas	Suelos de baja a mediana capacidad portante, susceptibles a licuación y problemas de estabilidad de taludes	
Depósitos	Suelo de ladera	Depósitos de Ladera	Cerros	Gravas areno arcillosas compactas	Suelos de mediana capacidad portante susceptibles a problemas de estabilidad de taludes	5 - 15 m
Residual	Suelo residual	Suelo Residual	Cerros	Arcillas gravo arenosas firmes	Suelos de mediana a alta capacidad portante con posibles problemas de estabilidad de taludes en sectores de alta pendiente	5 - 10 m
Basura	Relleno de basura	Rellenos de Basuras	Piedemonte y Planicie	Basuras	Materiales heterogéneos, que acuerdo con su disposición pueden ser compresibles y susceptibles a problemas de estabilidad en taludes	
Relleno	Relleno de excavación	Rellenos de Excavación	Piedemonte y Planicie	Rellenos heterogéneos	Materiales heterogéneos, que acuerdo con su disposición pueden ser compresibles y susceptibles a problemas de estabilidad en taludes	
Excavación	Excavación especial	Excavaciones Especiales	Piedemonte	Gravas arenosas sueltas a compactas	Zonas de explotación de agregados en el Río Tunjuelo, susceptibles a problemas de estabilidad de taludes	

CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

UNIDADES HIDROGEOLOGICAS	CARACTERÍSTICAS DE LAS UNIDADES HIDROGEOLOGICAS	PARAMETROS HIDRAULICOS (característicos)	FORMACIONES GEOLOGICAS
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 varía de alta a baja.	Q: Depósitos sin diferenciar Qal: Depósitos Aluviales Qc: Depósitos Coluviales Qf: Depósitos Fluvio-glaciares Qaa: Depósitos de Abanico Aluvial Qta: Depósitos Terraza Alta NgQt: Formación Tiltatá
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.	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.	Kglt: Formación Areniscas Labor y Tierra Kgpl: Formación Plaeners Kgd: Formación Arenisca Dura Pgu: Formación Usme
Pg	Complejo Acuífero del Paleógeno	Complejo regional de rocas consolidadas con composición predominantemente arcillosa de origen continental, en general con muy baja productividad.	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.	Kch: Formación Chipaque

T: Transmisividad (m²/día)
CE: Capacidad específica (l/s/m) **S:** Coeficiente de Almacenamiento
K: Conductividad hidráulica (m/día)

Características de las Unidades hidrogeológicas; **Fuente:** "Estudio de modelación geotécnica del fenómeno de subsidencia en la ciudad de Bogotá D.C, Mayo de 2011