

**SUBDIRECCIÓN DE PLANIFICACIÓN INTEGRAL**

**DETERMINACIÓN Y PROTECCIÓN DE LAS POTENCIALES ZONAS DE RECARGA EN  
EL NORTE DEL VALLE DE ABURRÁ.**

**INFORME FINAL**

**CONTRATO 405 DE 2011**

**SUBDIRECCIÓN DE PLANIFICACIÓN INTEGRAL**

**MEDELLÍN, SEPTIEMBRE DE 2012**

**Ejecuta:**



**Un proyecto de:**



**DETERMINACIÓN Y PROTECCIÓN DE LAS POTENCIALES ZONAS DE RECARGA EN  
EL NORTE DEL VALLE DE ABURRÁ.**

**INFORME FINAL**

**CONTRATO 405 DE 2011**

**SUBDIRECCIÓN DE PLANIFICACIÓN INTEGRAL**

**Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental. GIGA.  
Facultad de Ingeniería.  
Universidad de Antioquia.**

**Impresión: Universidad de Antioquia.**



[www.udea.edu.co/](http://www.udea.edu.co/)



[www.metropol.gov.co/](http://www.metropol.gov.co/)



**SUBDIRECCIÓN DE PLANIFICACIÓN INTEGRAL**

**DETERMINACIÓN Y PROTECCIÓN DE LAS POTENCIALES ZONAS DE RECARGA EN  
EL NORTE DEL VALLE DE ABURRÁ.**

**INFORME FINAL**

**CONTRATO 405 DE 2011**

**SUBDIRECCIÓN DE PLANIFICACIÓN INTEGRAL**

**MEDELLÍN, SEPTIEMBRE DE 2012**



## CRÉDITOS

Determinación y Protección de las Potenciales Zonas de Recarga en el Norte del Valle de Aburrá.

Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Director:	Carlos Mario Montoya S.
Subdirector:	Francisco Zapata B.
Autores:	Grupo GIGA UdeA
Equipo de trabajo:	
Directora:	Teresita Betancur V.
Asesora en áreas de recarga:	María Victoria Vélez O.
Asesor en área de geomorfología	Humberto Caballero A.
Hidrólogo:	Juan Camilo Villegas P.
Experto en SIG:	John Fernando Escobar M.
Hidrogeóloga:	Paola Andrea Palacio B.
Pruebas hidráulicas:	Catalina Blanco S.
Analista estructural:	Edwin García A.
Experta en bases de datos:	Angélica María Gómez
Medidas de protección	Miriam Benjumea H.
Coordinadora Operativa:	Orfely María Rueda G.
Ingeniero de campo:	Rodrigo Alonso Díaz C.
Auxiliares:	Vanessa García L. Cristina Martínez U. Esteban Hoyos Z. Sucy Valencia L. Angélica Vélez D. Gustavo Adolfo Cruz R.

Interventoría AMVA:

Teresa de Jesús Gómez C.

María Mercedes Quiceno V.

Olga Amparo Velásquez L.

Magda Marcela Restrepo H.

Interventoría externa:

Solidos S. A

Fotografía:

Paola Andrea Palacio B.

Gustavo A. Cruz R.

Fecha

21 de septiembre de 2012, Medellín

Nota de derechos reservados:

Está prohibida la reproducción parcial o total de esta publicación y mucho menos para fines comerciales. Para utilizar información contenida en ella se deberá citar fuente.

## INTRODUCCIÓN

Durante el Séptimo Dialogo Interamericano del Agua, realizado en Medellín en noviembre de 2011, el adjetivo de patrimonio fue propuesto para calificar al agua, queriendo connotar con ello un valor adicional al que le han impreso los calificativos de recurso, bien o derecho, entre otros. La valoración del agua ha ido evolucionando como resultado de dos circunstancias esenciales: la necesidad y el impacto; la necesidad que tenemos del agua al ser esta sustancia indispensable para el sostenimiento de la vida y el impacto que, como consecuencia de una extraña conciencia, amenaza con ponernos al borde de un cataclismo planetario. Las aguas subterráneas hacen parte -dentro de este territorio enmarcado sobre la cuenca del río Aburrá-Medellín de un único ciclo hidrológico que mueve el agua a través de los distintos compartimientos de un sistema complejo que involucra, además de los procesos naturales, los efectos e impactos de la actividad del hombre.

En 2004 INGEOMINAS, en cumplimiento de sus funciones como entidad del Estado, formuló el programa de “Exploración de Aguas Subterráneas” para evaluar el potencial del recurso hídrico del subsuelo colombiano y para la generación de conocimiento que aporte a la satisfacción de necesidades de la sociedad en cuanto agua potable especialmente. Por su parte las Autoridades Ambientales convencidas de que para gestionar un recurso hay que conocer el sistema en el que él está presente, han emprendido importantes proyectos mediante los cuales buscan contar con modelos hidrogeológicos conceptuales cada vez más ciertos. Dentro del Plan de Manejo de la Cuenca –POMCA- del río Aburrá (Artículo Séptimo párrafo 7.4. del Acuerdo No. 02 del 2007 de la Comisión Conjunta de la Cuenca del Río Aburrá), se planteó la necesidad de profundizar en el conocimiento de los acuíferos del Valle de Aburrá y en la determinación de las zonas de recarga, desde allí se vislumbró que este aspecto debía constituir un determinante ambiental dentro de la revisión de los Planes de Ordenamiento Territorial, y que en ese sentido la Comisión Conjunta de la Cuenca del río Aburrá debería intervenir a futuro una vez se tuvieran resultados producto de estudios relacionados .

Mediante la ejecución del estudio “DETERMINACIÓN Y PROTECCIÓN DE ZONAS DE RECARGA AL NORTE DEL VALLE DE ABURRÁ”, se logró obtener un modelo hidrogeológico conceptual del Norte del Valle de Aburrá y delimitar las zonas de recarga de acuíferos para establecer medidas de protección. Este documento da cuenta de los resultados alcanzados en este sentido.

Este informe se encuentra estructurado en cinco capítulos, a lo largo de los cuales se recorren, desde los elementos que motivan la realización del estudio, pasando por la descripción de las áreas de interés, hasta llegar a un seguimiento de las actividades metodológicas específicas que desembocan en la identificación de las zonas de recarga de los acuíferos del norte del Valle de Aburrá y a la definición de medidas para su protección.

En el capítulo 1, se contextualiza y se hace una breve síntesis acerca de las motivaciones para la realización de este trabajo, se enuncian los objetivos específicos que se pretendían cumplir, se incluye un resumen acerca del estado de conocimiento que se tenía del sistema hidrogeológico del Valle de Aburrá al momento de iniciar este proyecto y se esboza la metodología seguida hasta alcanzar las metas propuestas.



El capítulo 2 contiene una descripción detallada del área de estudio considerando las principales características de las regiones geográficas y los rasgos más relevantes del territorio incluyendo aspectos fisiográficos, socioeconómicos, abastecimiento de agua y problemática ambiental general.

Una síntesis geológica que involucra aspectos litológicos, estructurales y geomorfológicos, a escala 1:10.000 se expone en el capítulo 3. Como referencias para este apartado se tuvieron en cuenta: las memorias del mapa geológico del estudio de Microzonificación Sísmica (AMVA, 2007), procesamiento de imágenes de satélite y trabajo de control en campo.

Bajo el título: “Modelo Hidrogeológico y Zonas de Recarga”, se recogen, en el capítulo 4, los resultados de este estudio, dando cuenta del cumplimiento del objetivo general propuesto.

En el capítulo 5 se proponen medidas de tipo normativo, administrativo y técnico, para la protección de las zonas de recarga,

El texto termina con una serie de conclusiones y recomendaciones que orientan el trabajo a futuro.

Además, con el ánimo de que este documento pueda ser leído y comprendido por un amplio público, que no tenga necesariamente conocimientos técnicos previos en materia de hidrogeología se incluye al final de este informe un glosario de términos.

La información producto de este estudio se almacena en una base de datos espacial, diseñada siguiendo los estándares establecidos por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.



## CONTENIDO

1	GENERALIDADES.....	3
1.1	OBJETIVOS.....	7
1.1.1	Objetivo General.....	7
1.1.2	Objetivos Específicos.....	7
1.2	METODOLOGÍA .....	7
1.3	PRODUCTOS.....	11
2	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	13
2.1	MUNICIPIO DE BELLO.....	20
2.1.1	Generalidades .....	20
2.1.2	Aspectos Físicos.....	21
2.1.3	Aspectos socioeconómicos.....	22
2.2	MUNICIPIO DE COPACABANA .....	23
2.2.1	Generalidades .....	23
2.2.2	Aspectos físicos.....	24
2.2.3	Aspectos socioeconómicos.....	25
2.3	MUNICIPIO DE GIRARDOTA .....	26
2.3.1	Generalidades .....	26
2.3.2	Aspectos físicos.....	27
2.3.3	Aspectos socioeconómicos.....	28
2.4	MUNICIPIO DE BARBOSA.....	29
2.4.1	Generalidades .....	29
2.4.2	Aspectos físicos.....	30
2.4.3	Aspectos socioeconómicos.....	31
3	GEOLOGÍA.....	33
3.1	UNIDADES LITOLÓGICAS.....	33
3.1.1	Gneis de La Ceja (PRnLC) .....	36
3.1.2	Esquistos Anfibolíticos de Baldías (TReaB) .....	37
3.1.3	Anfibolita de Medellín (TRaM).....	38
3.1.4	Esquistos de Cajamarca (TReC).....	41
3.1.5	Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS).....	43
3.1.6	Dunita de Medellín (JKuM).....	44
3.1.7	Metabasitas del Picacho (JKmpP) .....	45
3.1.8	Gabros de Copacabana (KgC).....	46
3.1.9	Batolito de Ovejas (KtO) .....	47

3.1.10	Batolito Antioqueño (KcdA) .....	48
3.1.11	Cornubiana .....	50
3.1.12	Depósitos de vertiente (Qd, QFIV, QFIII, NQFII) .....	51
3.1.13	Depósitos aluviales (Qal, Qat).....	58
3.1.14	Depósitos antrópicos – Llenos (QII) .....	60
3.2	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	61
3.2.1	Sistema de Fallas NS a NNW .....	61
3.2.2	Sistema de Fallas NE.....	61
3.3	GEOMORFOLOGÍA.....	64
3.3.1	Valle de Aburrá Medio (VM).....	64
3.3.2	Valle de Aburrá Inferior (VI).....	66
4	MODELO HIDROGEOLÓGICO Y ZONAS DE RECARGA.....	69
4.1	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS .....	71
4.1.1	Aptitud hidrogeológica según litología .....	73
4.1.2	Potencial acuífero y geometría.....	74
4.1.3	Balance hídrico .....	107
4.1.4	Flujo de agua subterránea .....	124
4.1.5	Propiedades hidráulicas.....	128
4.1.6	Calidad del agua subterránea .....	132
4.1.7	Índice de calidad del agua subterránea.....	138
4.2	ÁREAS Y FUENTES DE RECARGA .....	142
4.2.1	Zonas de Recarga Directa .....	144
4.2.2	Zonas de Recarga Indirecta.....	144
4.2.3	Zonas de recarga al norte del Valle de Aburrá .....	145
4.2.4	Validación de Zonas de Recarga .....	159
4.2.5	Caracterización isotópica .....	164
4.2.6	Aproximación a la estimación de la recarga distribuida.....	169
5	MEDIDAS DE PROTECCIÓN DE ZONAS DE RECARGA DE ACUÍFEROS .....	179
5.1	METODOLOGÍA .....	180
5.2	MARCO NORMATIVO AMBIENTAL DE LAS ZONAS DE RECARGA EN EL ÁMBITO NACIONAL Y METROPOLITANO.....	183
5.2.1	Marco normativo y política nacional .....	184
5.2.2	La planificación y la ordenación ambiental en lo metropolitano .....	185
5.3	MEDIDAS DE MANEJO DE LAS ZONAS DE RECARGA DEL VALLE DE ABURRÁ. .....	189
5.3.1	Medidas de tipo normativo. ....	190



5.3.2	Medidas de carácter administrativo.....	208
5.3.3	Medidas de carácter técnico. ....	209
5.4	APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MANEJO EN LAS ZONAS DE RECARGA .....	211
5.4.1	MEDIDAS DE MANEJO GENERAL EN LAS ZONAS DE RECARGA.....	211
5.4.2	MEDIDAS DE MANEJO A APLICAR SEGÚN CONSIDERACIONES ESTABLECIDAS EN LA ZONIFICACIÓN DEL POMCA Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE LOS POT.....	212
5.5	EPÍLOGO.....	256
6	CONCLUSIONES .....	257
7	GLOSARIO .....	261



DETERMINACIÓN Y PROTECCIÓN DE LAS POTENCIALES ZONAS DE RECARGA  
EN EL NORTE VALLE DE ABURRÁ



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Unidades de interés acuífero en el Valle de Aburrá (las unidades A3 y C, no ha sido exploradas). (Fuente: UdeA-UNAL, 2011).....	5
Figura 1.2. Zonas de recarga según estudio de Zonas de Recarga y acuíferos del Valle de Aburrá (Fuente: UdeA-Integral-AMVA, 2002).....	6
Figura 1.3. Esquema metodológico para la obtención de un modelo hidrogeológico conceptual(Fuente: Betancur, 2010). .....	9
Figura 2.1. Modelo Digital de Elevación para el Valle de Aburrá.....	14
Figura 2.2. Municipios que conforman el Valle de Aburrá. ....	16
Figura 2.3. Usos del suelo en el norte del Valle de Aburrá.....	19
Figura 3.1. Geología al norte del Valle de Aburrá .....	35
Figura 3.2. Geomorfología de la zona de estudio.....	68
Figura 3.3. Localización geográfica de las Tomografías Eléctricas en el Norte del Valle de Aburrá.....	68
Figura 3.4. Geomorfología de la zona de estudio. ....	68
Figura 4.1. Esquema general de productos y métodos para la definición de los modelos hidrogeológicos y de recarga, y medidas de protección.....	71
Figura 4.2.Pseudosección de una Tomografía Eléctrica. ....	76
Figura 4.3. Arreglo dipolo-dipolo. ....	77
Figura 4.4. Localización geográfica de las Tomografías Eléctricas en el Norte del Valle de Aburrá.....	79
Figura 4.5. Sección estratigráfica interpretativa Be_GEO_0027 (Bello). ....	81
Figura 4.6. Sección estratigráfica interpretativa Be_GEO_0028 (Bello) .....	81
Figura 4.7. Sección estratigráfica interpretativa Be_GEO_0029 (Bello). ....	82
Figura 4.8. Sección estratigráfica interpretativa Co_GEO_0028 (Copacabana).....	82
Figura 4.9. Sección estratigráfica interpretativa Co_GEO_0029 (Copacabana).....	83
Figura 4.10. Sección estratigráfica interpretativa Co_GEO_0030 (Copacabana).....	83
Figura 4.11. Sección estratigráfica interpretativa Gi_GEO_0034 (Girardota) .....	84
Figura 4.12. Sección estratigráfica interpretativa Gi_GEO_0035 (Girardota) .....	84



Figura 4.13. Sección estratigráfica interpretativa Gi_GEO_0036 (Girardota) .....	85
Figura 4.14. Sección estratigráfica interpretativa Gi_GEO_0037 (Girardota) .....	85
Figura 4.15. Sección estratigráfica interpretativa Gi_GEO_0038 (Girardota) .....	86
Figura 4.16. Sección estratigráfica interpretativa Gi_GEO_0039 (Girardota) .....	86
Figura 4.17. Sección estratigráfica interpretativa Gi_GEO_0040 (Girardota) .....	87
Figura 4.18. Sección estratigráfica interpretativa Ba_GEO_0061 (Barbosa) .....	87
Figura 4.19. Sección estratigráfica interpretativa Ba_GEO_0062 (Barbosa) .....	88
Figura 4.20. Sección estratigráfica interpretativa Ba_GEO_0063 (Barbosa) .....	88
Figura 4.21. Sección estratigráfica interpretativa Ba_GEO_0064 (Barbosa) .....	89
Figura 4.22. Sección estratigráfica interpretativa Ba_GEO_0065 (Barbosa) .....	89
Figura 4.23. Sección estratigráfica interpretativa Ba_GEO_0066 (Barbosa) .....	90
Figura 4.24. Sección estratégica interpretativa Ba_GEO_0067 (Barbosa) .....	90
Figura 4.25. Perfil estratigráfico Aserrío Antioqueña de Estivas Copacabana. ....	96
Figura 4.26 Perfil estratigráfico Planta de Potabilización de Empresas Públicas de Medellín Barbosa. ....	97
Figura 4.27 Perfil estratigráfico Planta de Potabilización de Empresas Públicas de Medellín Barbosa. ....	98
Figura 4.28 Perfil estratigráfico COLGRASS Girardota. ....	99
Figura 4.29. Distribución espacial del Acuífero Aburrá Norte. ....	104
Figura 4.30. Puntos con información estratigráfica sobre el modelo de espesores del acuífero Aburrá Norte en tamaño de celda 10 m. ....	105
Figura 4.31. Espesores clasificados (Notar las zonas compuestas por los tres tonos de azul más intensos). ....	106
Figura 4.32. Localización de estaciones utilizadas en el cálculo del balance hídrico para la estimación de la recarga directa sobre los acuíferos libres del norte del Valle de Aburrá. ....	110
Figura 4.33. Serie anual del índice MEI (NOAA) para el periodo de estudio 2000-2010. Valores positivos indican condiciones Niño y valores negativos condiciones Niña. ....	111

Figura 4.34. (a) Valores totales anuales de precipitación (años hidrológicos entre 2000-2010) para las estaciones en que se calcula la recarga directa; (b) anomalías de precipitación (desviaciones con respecto al promedio) para las mismas estaciones.....	113
Figura 4.35. Dinámica temporal de los componentes de balance hídrico, calculado por el método SWB, para años típicos en estaciones del norte del Valle de Aburrá localizados sobre acuíferos libres. Los componentes son precipitación (P), evapotranspiración real (ET), escorrentía superficial (Es) y Recarga total (Rt).....	122
Figura 4.36. Valores totales anuales de los componentes del balance hídrico en tres años típicos para cuatro estaciones localizadas sobre el acuífero libre del norte del Valle de Aburrá. En las figuras se representan los valores totales de precipitación (P), evapotranspiración (ET), Escorrentía superficial (Es) y recarga potencial (Rt). .....	123
Figura 4.37. Tendencia del flujo subterráneo, Acuífero Aburrá Norte.....	127
Figura 4.38. Distribución de los valores de infiltración y conductividad obtenidos en campo. ....	131
Figura 4.39. Contenido de nitratos en la zona de estudio .....	136
Figura 4.40. Coliformes fecales en la zona de estudio.....	137
Figura 4.41. Valoración según el ICA-AS a los puntos del muestreo Hidrogeoquímico.....	141
Figura 4.42 Esquema pictórico sobre procesos de recarga directa e indirecta.....	143
Figura 4.43. Diagrama conceptual para la identificación de zonas de recarga. ....	143
Figura 4.44. Distribución de manantiales reconocidos en campo.....	146
Figura 4.45. Cortes topográficos para la identificación de zonas de recarga.....	148
Figura 4.46. Perfiles de los cortes topográficos.....	149
Figura 4.47. Disposición de estructuras en las anfibolitas de Medellín, margen derecha del río. ....	151
Figura 4.48. Disposición de estructuras en las anfibolitas de Medellín, margen izquierda del río. ....	152
Figura 4.49. Disposición de estructuras en el Batolito Antioqueño, margen izquierda del río. ....	154
Figura 4.50. Disposición de estructuras en el Batolito Antioqueño, margen derecha del río. ....	155
Figura 4.51. Disposición de estructuras en los esquistos de Cajamarca, margen izquierda del río. ....	156



Figura 4.52. Mapa de zonas de recarga a los acuíferos del Norte del Valle de Aburrá.. ....	158
Figura 4.53. Configuración de un diagrama Piper. ....	160
Figura 4.54. Facies del agua subterránea muestreada en octubre de 2011, norte del Valle de Aburrá.....	161
Figura 4.55. Muestras bicarbonatadas magnésicas localizadas en el municipio de Bello...162	
Figura 4.56. Distribución espacial de las facies hidrogeoquímicas.....	163
Figura 4.57. Distribución espacial de datos isotópicos obtenidos en este estudio.....	167
Figura 4.58. Composición isotópica por municipios del norte del Valle de Aburrá.....	169
Figura 4.59. Estaciones empleadas para la generación de superficies de precipitación en el periodo Abril de 2009 a Marzo de 2010. ....	171
Figura 4.60. Superficie de precipitación total anual para el periodo abril de 2009 - marzo de 2010.....	173
Figura 4.61. Superficie de recarga total del periodo abril de 2009, marzo de 2010. ....	177
Figura 5.1. Metodología seguida para la definición de medidas de protección de zonas de recarga. ....	180
Figura 5.2. Medidas de Manejo propuestas para las zonas de recarga de las aguas subterráneas del norte del Valle de Aburrá. ....	190
Figura 5.3. Intersección de las zonas de recarga directa con la zonificación ambiental del POMCA. ....	193
Figura 5.4. Intersección de las zonas de recarga indirecta de importancia alta con la zonificación ambiental del POMCA. ....	195
Figura 5.5. Intersección de las zonas de recarga indirecta de importancia media con la zonificación ambiental del POMCA. ....	196
Figura 5.6. Intersección de las zonas de recarga indirecta de importancia muy baja con la zonificación ambiental del POMCA. ....	197
Figura 5.7. Intersección de las zonas de recarga directa con la clasificación del suelo del componente general de los planes de ordenamiento territorial. ....	201
Figura 5.8. Intersección de las zonas de recarga indirecta de importancia alta con la clasificación del suelo del componente general de los planes de ordenamiento territorial.....	202





---

Figura 5.9. Intersección de las zonas de recarga indirecta de importancia media con la clasificación del suelo del componente general de los planes de ordenamiento territorial. ....	203
Figura 5.10. Intersección de las zonas de recarga indirecta de importancia muy baja con la clasificación del suelo del componente general de los planes de ordenamiento territorial. ....	204
Figura 5.11. Mantenimiento de las categorías existentes o modificación de áreas en la zonificación del POMCA. ....	214
Figura 5.12. Definición de determinantes ambientales para la clasificación del suelo de los planes de ordenamiento territorial.....	216
Figura 5.13. Control de las densidades de población en las áreas urbanas y rurales. ....	219
Figura 5.14. Distribución de medidas de carácter técnico del área de estudio. ....	222
Figura 5.15. Distribución de medidas de carácter técnico del área de estudio. ....	223



DETERMINACIÓN Y PROTECCIÓN DE LAS POTENCIALES ZONAS DE RECARGA  
EN EL NORTE VALLE DE ABURRÁ



## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Población 2005 y proyección en el 2011. ....	17
Tabla 2.2. Especificaciones de las definiciones en el mapa de Usos del Suelo para los municipios del Norte del Valle de Aburrá. ....	18
Tabla 2.3. Veredas del Municipio de Bello. ....	21
Tabla 2.4. Veredas del municipio de Copacabana. ....	24
Tabla 2.5. Veredas del Municipio de Girardota. ....	27
Tabla 2.6. Veredas del Municipio de Barbosa. ....	30
Tabla 3.1. Perfil de meteorización Gneis de La Ceja (PRnLC). ....	37
Tabla 3.2. Perfil de meteorización Esquistos Anfibólicos de Baldías (TReaB). ....	38
Tabla 3.3. Perfil de meteorización Anfibolita de Medellín (TRaM). ....	41
Tabla 3.4. Perfil de meteorización Esquistos De Cajamarca (TReC). ....	43
Tabla 3.5. Perfil de meteorización Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS). ....	44
Tabla 3.6. Perfil de meteorización Dunita de Medellín (JKuM). ....	45
Tabla 3.7. Perfil de meteorización Metabasitas del Picacho (JKmbP). ....	46
Tabla 3.8. Perfil de meteorización Gabros de Copacabana (KgC). ....	47
Tabla 3.9. Perfil de meteorización Batolito de Ovejas (KtO). ....	47
Tabla 3.10. Perfil de meteorización Batolito Antioqueño (KcdA). ....	50
Tabla 3.11. Perfil de meteorización Cornubiana. ....	51
Tabla 3.12. Fallas NS a NNW. ....	61
Tabla 3.13. Fallas con tendencia NE. ....	62
Tabla 3.14. Estructuras presentes en las unidades litológicas que floran al norte de Valle de Aburrá. ....	62
Tabla 4.1. Unidades hidrogeológicas del norte del Valle de Aburrá. ....	74
Tabla 4.2. Localización de las Tomografías Eléctricas en el norte del Valle de Aburrá. ....	78
Tabla 4.3. Resultados de las mediciones de Resistividad Eléctrica y espesores. ....	94



Tabla 4.4. Sitios recomendadosadelantar perforaciones exploratorias.....	95
Tabla 4.5. Estaciones seleccionadas para la estimación de los balances diario y mensual. .....	108
Tabla 4.6. Datos de precipitación y evaporación potencial mensual de las estaciones seleccionadas para el balance en milímetros (mm).....	112
Tabla 4.7. Valores totales anuales de precipitación para las estaciones seleccionadas medidos en mm de agua en milímetros (mm). ....	113
Tabla 4.8. Principales características de suelo y coberturas vegetales de las zonas donde se ubican las estaciones en las que se calculó el balance. (A partir de estos valores se definieron las características hidráulicas del suelo: Punto de Marchitez permanente (PMP) y capacidad de campo (CC) y el número de curva de escorrentía (NII)). ....	115
Tabla 4.9. Resultados del balance hídrico para el año húmedo. ....	117
Tabla 4.10. Resultados del balance hídrico para el año medio. ....	118
Tabla 4.11. Resultados del balance hídrico para el año seco. ....	119
Tabla 4.12. Dinámica temporal de los componentes de balance hídrico, calculado por el método SWB, para años típicos en estaciones del norte del Valle de Aburrá localizados sobre acuíferos libres (mm/año).....	124
Tabla 4.13. Niveles piezométrico tomados en octubre de 2011. ....	125
Tabla 4.14. Resultados de las pruebas de infiltración realizadas en campo.....	129
Tabla 4.15. Parámetros hidráulicos en el municipio de Bello. ....	129
Tabla 4.16. Valores de las pruebas hidráulicas de los piezómetros construidos durante el proyecto.....	130
Tabla 4.17. Síntesis de las normas Colombianas para la calidad del agua, según parámetros analizados. ....	132
Tabla 4.18. Distribución espacial de los puntos .....	133
Tabla 4.19. Valoración según resolución 2115 de los puntos monitoreados. ....	134
Tabla 4.20. Valoración según decreto 1594 de 1984, artículo 38 de los puntos monitoreados. .....	134
Tabla 4.21. Valoración según decreto 1594 de 1984, artículo 39 de los puntos monitoreados. .....	135
Tabla 4.22. Valores de Y y P para cada parámetro.....	139



Tabla 4.23. Calificación para los valores del ICA-AS. ....	139
Tabla 4.24. Calificación para los valores del ICA-AS a las muestras analizadas durante el proyecto.....	139
Tabla 4.25. Categorización de las zonas de recarga. ....	145
Tabla 4.26. Zonas de recarga a los acuíferos del Norte del Valle de Aburrá.....	157
Tabla 4.27. Datos isotópicos obtenidos en este estudio.....	165
Tabla 4.28. Valores de evaporación mensual obtenidos a partir de datos diarios en la estación Tulio Ospina. ....	174
Tabla 4.29. Capacidad de campo y Punto de marchitez permanente para las asociaciones de suelo presentes en la zona de estudio. ....	174
Tabla 4.30. Profundidad de raíces asumida según la cobertura terrestre presente en la zona de estudio.....	175
Tabla 4.31. Relación entre la recarga total y la precipitación para cada zona de recarga directa e indirecta. ....	178
Tabla 5.1. Principales estudios consultados y las medidas propuestas en los mismos.....	181
Tabla 5.2. Intersección de las zonas de recarga directa e indirecta con la zonificación del POMCA. ....	192
Tabla 5.3. Distribución de las zonas de recarga por municipio y clase de suelo según Artículo 30 de la Ley 388 de 1997.....	199
Tabla 5.4. Síntesis en relación al área de aplicación de las diferentes medidas de tipo normativo.....	218
Tabla 5.5. Medidas de manejo y tipos de uso aplicar en las diferentes categorías de la zonificación ambiental del POMCA y las clases de suelo de los planes de ordenamiento territorial.....	224



DETERMINACIÓN Y PROTECCIÓN DE LAS POTENCIALES ZONAS DE RECARGA  
EN EL NORTE VALLE DE ABURRÁ





## LISTA DE FOTOS

Foto 3.1. Autolitos presentes en el batolito antioqueño, vereda El Paraíso. ....	48
Foto 3.2. Afloramiento de QFII, vereda El Zarzal. ....	56
Foto 3.3. Afloramiento de NQFII, vereda El Noral. ....	56
Foto 3.4. Afloramiento QFVI, cerca al Hatillo. ....	58
Foto 3.5. Depósitos aluviales asociados al río Aburrá. ....	58



DETERMINACIÓN Y PROTECCIÓN DE LAS POTENCIALES ZONAS DE RECARGA  
EN EL NORTE VALLE DE ABURRÁ







## LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1.1. FICHAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXO 3.1. GEOLOGÍA DE CAMPO

ANEXO 4.1. NIVELACIÓN TOPOGRÁFICA

ANEXO 4.2. COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS DISPONIBLES DE ESTUDIOS  
ANTERIORES

ANEXO 4.3. GEOFÍSICA

ANEXO 4.4. PERFORACIONES EXPLORATORIAS

ANEXO 4.5. TABLA DE CORRELACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA

ANEXO 4.6. PRUEBAS DE INFILTRACIÓN

ANEXO 4.7. REPORTES HIDROGEOQUÍMICOS

ANEXO 4.8. INVENTARIO DE MANANTIALES

ANEXO 4.9. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

ANEXO 4.10. ISOTOPIA

ANEXO 4.11. MAPAS BALANCE DISTRIBUIDO

ANEXO 5.1. REVISIÓN BIBLIOGRAFÍA MEDIDAS PROTECCIÓN

ANEXO 5.2. MEDIDAS NORMATIVAS

ANEXO 5.3. BASE DE DATOS



DETERMINACIÓN Y PROTECCIÓN DE LAS POTENCIALES ZONAS DE RECARGA  
EN EL NORTE VALLE DE ABURRÁ



## RESUMEN

Frente a la perspectiva de expansión urbana hacia el norte del Valle de Aburrá y con el propósito de propender por un crecimiento en armonía con los principios de adecuada administración y gestión integral del recurso hídrico; mediante este estudio se logró definir un modelo hidrogeológico conceptual y con él, una caracterización detallada del acuífero libre del Norte del Valle de Aburrá, conformado por depósitos aluviales de edad Cuaternario y por depósitos de vertiente que datan del Neógeno y el Cuaternario. Este acuífero recibe recarga directa por exceso de precipitación pero también es recargado local y lateralmente desde las vertientes formadas por las Anfibolitas de Medellín, el Batolito Antioqueño y posiblemente por las Dunitas de Medellín. La presión urbanística sobre el Valle de Aburrá ha producido ya la urbanización de gran parte de las principales zonas de recarga, además importantes actividades económicas han perturbado las características naturales de la superficie a través de la cual se produce la infiltración y la recarga, en este sentido las medidas de protección comprenden propuestas de tipo administrativo, técnico y normativo, que en consonancia con el Acuerdo 02 de 2007 de la Comisión Conjunta de la Cuenca del río Aburrá, por el cual se aprueba el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Aburrá, y detectando algunas nuevas necesidades propendan por garantizar la sostenibilidad del recurso.

## ABSTRACT

The urban growth to the north of Valle de Aburrá should be looking for proper management and integrated management of water resources.

With the completion of this study was achieved to define a conceptual hydrogeological model and characterize in detail the unconfined aquifer of north of the Valle de Aburrá. This aquifer consists of Quaternary age alluvial deposits and slope deposits dating from the Neogene and Quaternary.

This aquifer receives direct recharge from excess rainfall and also receives local and laterally recharge from the slopes formed by the Amfibolita of Medellin, Batolito Antioqueño and Dunitas of Medellin.

Urbanization in the Valley of boredom has occupied much of the main recharge areas, as well as important economic activities have disturbed the natural characteristics of the surface through which there is infiltration and recharge, so protective measures proposals include administrative, technical and regulatory.



DETERMINACIÓN Y PROTECCIÓN DE LAS POTENCIALES ZONAS DE RECARGA  
EN EL NORTE VALLE DE ABURRÁ



## 1 GENERALIDADES

El conocimiento que a la fecha se tiene del recurso subterráneo en el Valle de Aburrá se ha logrado a partir de la ejecución de proyectos generales financiados por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, dentro de ellos se destacan:

- Inventario de aguas subterráneas en el Valle de Aburrá realizado por la firma (Hidrogema –AMVA 2001): estudio que aportó una primera aproximación para dimensionar el uso que del agua subterránea se hacía en el Valle y proporcionar una primera idea acerca de la localización de las principales unidades acuíferas.
- Estudio de zonas de recarga y acuíferos del Valle de Aburrá –EZRAVA- (UdeA-Integral-AMVA 2002): como producto de este proyecto se formuló el primer modelo hidrogeológico de la zona, dimensionando la geometría de los principales acuíferos, sus propiedades hidráulicas, red de flujo, determinación de recarga y condiciones de calidad del agua subterránea.
- Actualización inventario de puntos de agua subterránea (Unal-AMVA, 2008): este proyecto reveló la dimensión del crecimiento en cuanto a la utilización de las aguas subterráneas en el Valle de Aburrá y permitió ampliar el conocimiento sobre propiedades hidráulicas y de calidad del agua.
- Diseño Red de Monitoreo RedRío Fase III (UdeA-UNAL 2011): además de diseñar y operar durante seis meses la red de monitoreo hidrogeológico se proponen importantes lineamientos para la formulación de un Plan de Manejo Ambiental del Acuífero.

A partir de estos trabajos y del Plan de ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá-Medellín –POMCA-Acuerdo No. 02 del 2007 de la Comisión Conjunta de la Cuenca del Río Aburrá), se ha identificado que los municipios de la zona norte del Valle de Aburrá tienen una gran potencial en recarga del agua subterránea.

En los principios generales ambientales de la Ley 99 de 1993, se resaltan la necesidad de protección especial que se debe tener sobre las zonas de recarga de acuíferos (numeral 4, artículo 1 “Las zonas de páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial”).

Sin embargo, en los procesos de planeación de este territorio (concertación POT’s y de planes parciales), no se cuentan con determinantes ambientales para el ordenamiento del territorio relacionados con la protección de la zona de recarga de las aguas subterráneas del Valle de Aburrá, ya que no se tienen identificadas que áreas de estos municipios que efectivamente deberían ser catalogadas como de conservación para la protección de las aguas subterráneas (zonas de recarga de acuíferos), o restringir los tipos de actividades que se desarrollen en estos sitios.

Es importante resaltar que los estudios hidrogeológicos realizados a la fecha se han ejecutado a una escala 1:25.000, siendo necesario para los propósitos de este estudio lograr un mejor detalle - escala 1:10.000-, en este aspecto, la información cartográfica producto del estudio de Microzonificación Sísmica–EMSVA- (AMVA, 2007) proporciona una base cartográfica de la geología local con este nivel de detalle (1:10.000).



Dentro de la ejecución del proyecto Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Medellín-Aburrá en Jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, RedRío Fase III, que adelantó el AMVA con la Universidad de Antioquia y en convenio con otros centros de educación superior de la ciudad, se han identificado nuevas unidades hidrogeológicas de interés acuífero, sobre las cuales se debe adelantar un proceso de exploración convencional con el fin de actualizar el modelo hidrogeológico del Valle de Aburrá (Figura 1.1), esto incluye, además de la geometría de los acuíferos, la determinación de propiedades hidráulicas, redes de flujo y nueva evaluación de zonas, fuentes y magnitud de la recarga (Figura 1.2).

El proyecto RedRío Fase III, incluye dentro del programa 2 (Investigación para la Gestión de las Aguas Subterráneas) de los lineamientos técnicos para el Plan de Manejo Ambiental del Acuífero del Valle de Aburrá, las bases generales que pueden orientar la formulación y ejecución de dos proyectos que tienen una íntima relación con el objeto de esta propuesta: Proyecto 5: Ajuste y Validación del Modelo Conceptual y Proyecto 10: Refinamiento del Modelo de Recarga de los Acuíferos e Identificación de la Conexión Agua Subterránea - Agua Superficial.

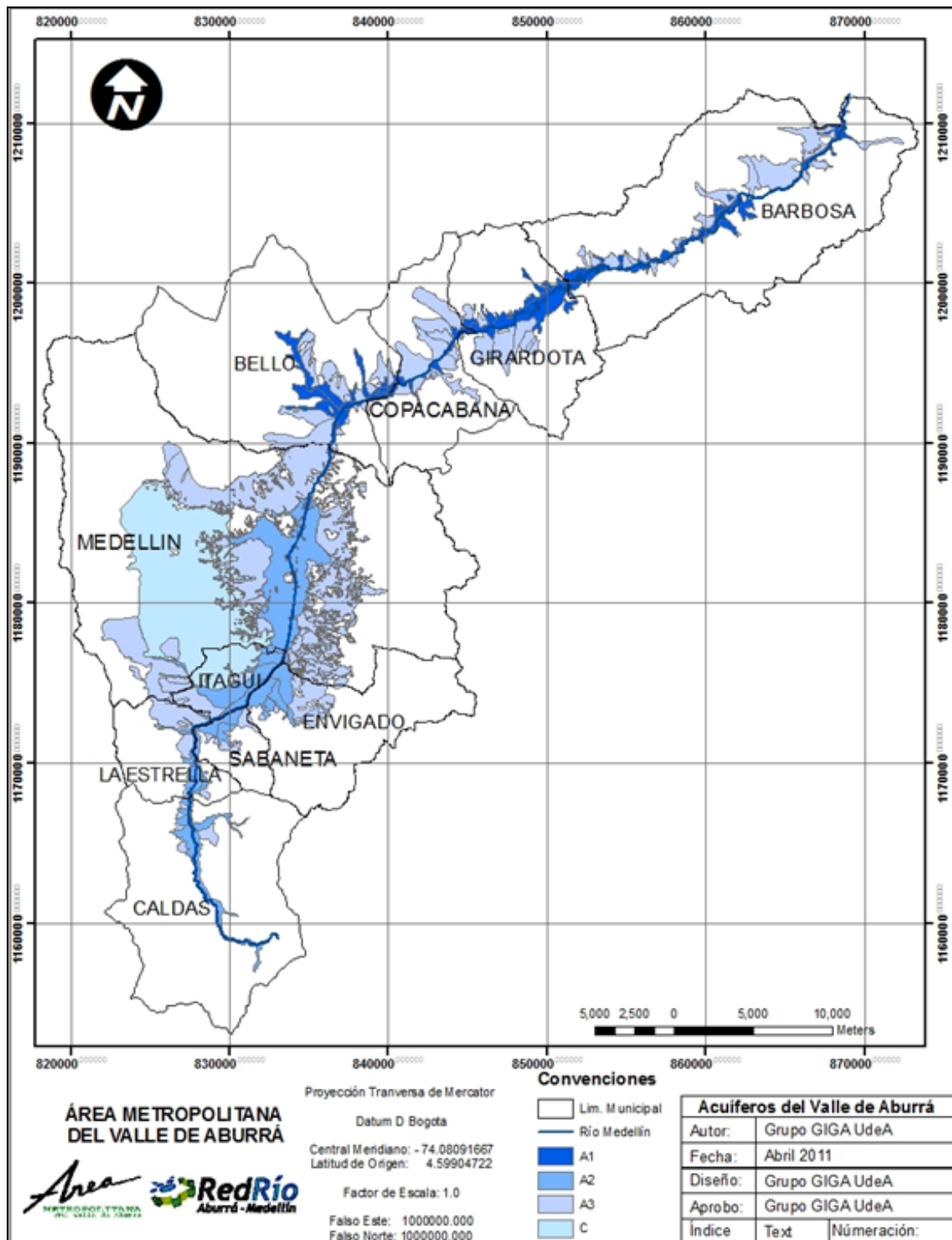


Figura 1.1. Unidades de interés acuífero en el Valle de Aburrá (las unidades A3 y C, no ha sido exploradas). (Fuente: UdeA-UNAL, 2011)

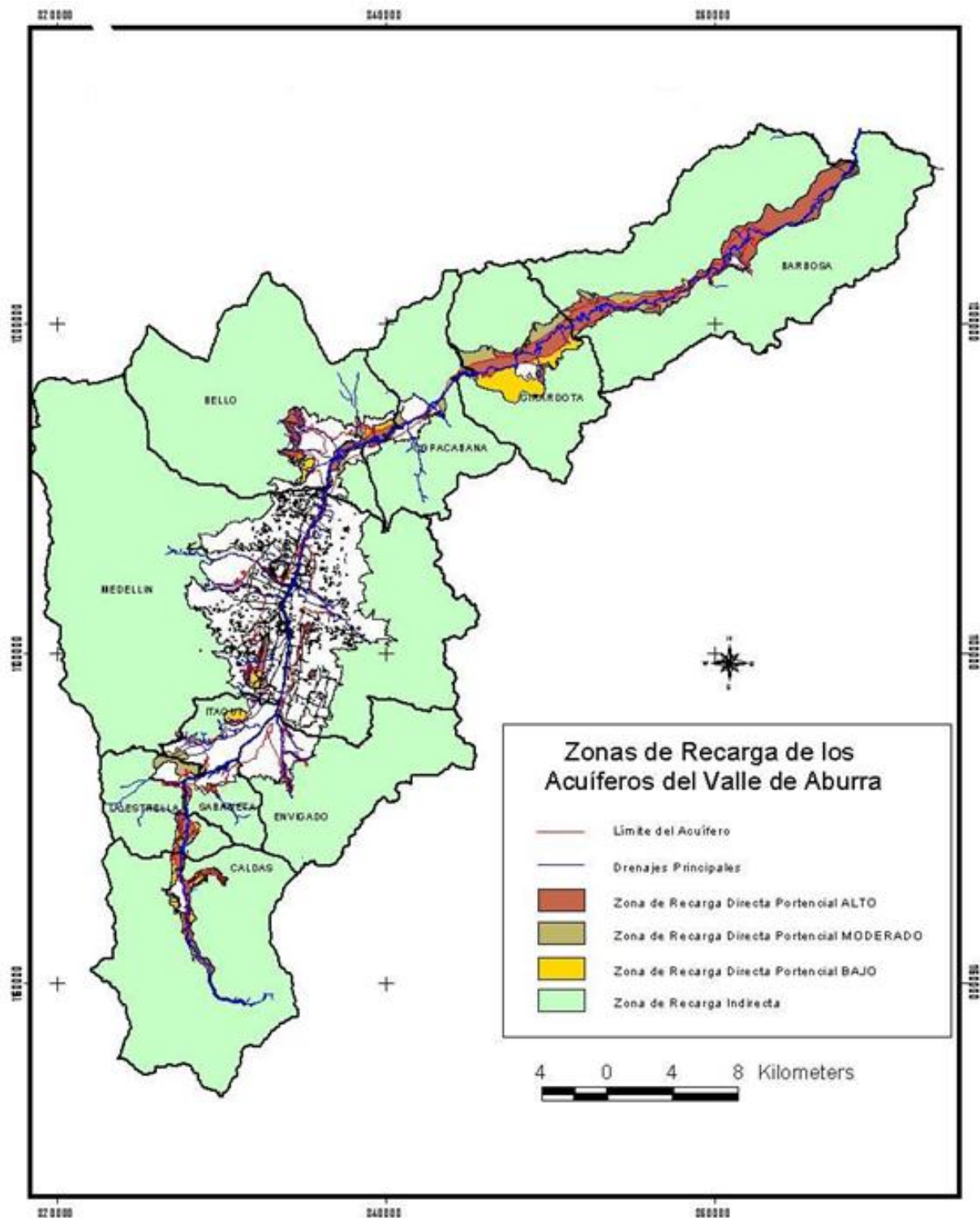


Figura 1.2. Zonas de recarga según estudio de Zonas de Recarga y acuíferos del Valle de Aburrá (Fuente: UdeA-Integral-AMVA, 2002).



Por todo lo anterior, se requieren estudios en donde se obtengan los determinantes ambientales para la ocupación del territorio en la zona norte del Valle de Aburrá relacionadas con la conservación de las aguas subterráneas, y servirán como base para la respuesta a solicitudes de ocupación del territorio así como las intervenciones. En dichos alcances se tendrían que identificar en mapas cuales zonas tendrían restricciones para el desarrollo, en una escala apta para los POT. La generación de dichos determinantes ambientales es competencia de la Comisión Conjunta de la Cuenca del Río Aburrá, de la cual hace parte el AMVA.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo General**

Realizar los estudios para la delimitación de las zonas de recarga de acuíferos de los municipios del norte del Valle de Aburrá.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Definir el modelo hidrogeológico conceptual que comprenda las unidades hidrogeológicas A1 y A3 en los municipios de Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa.
- Identificar y delimitar zonas de recarga directa o indirecta al sistema hidrogeológico dentro del dominio de interés.
- Establecer patrones de flujo de agua subterránea según áreas de recarga, tránsito y descarga.
- Definir las medidas de manejo y protección del sistema hidrogeológico considerando unidades acuíferas y zonas de recarga.

## **1.2 METODOLOGÍA**

En el esquema de la Figura 1.3 (Betancur, 2010), se sintetiza el conjunto de procedimientos que hacen parte de la exploración hidrogeológica, si bien la determinación de zonas, fuentes y magnitud de la recarga son solo una de estas actividades, su ejecución tiene sentido en el marco del conocimiento de un modelo hidrogeológico conceptual.

Para conocer la distribución y las propiedades de las unidades hidrogeológicas se hace exploración. La exploración hidrogeológica se define como “el conjunto de operaciones o trabajos que permiten la localización de acuíferos o embalses subterráneos de los que se puede obtener agua en cantidad y de calidad adecuada para el fin que se pretende” (Custodio y Llamas, 1997).

Las actividades de exploración inician con la recopilación de información disponible que permita una primera aproximación al conocimiento del medio tanto en términos geográficos como hidrológicos: cartografía básica, información hidrometeorológica, mapas y estudios geológicos, mapas de tipos suelos, cobertura vegetal y usos del suelo, estudios hidrogeológicos previos, fotos aéreas o imágenes de satélite, entre otros.

La recolección de datos denominada comúnmente inventario de puntos de agua (pozos, aljibes o manantiales), es el sistema más idóneo para empezar a conocer rápidamente las

características hidrogeológicas de una zona dada. Los datos reunidos se consignan en formatos previamente diseñados de manera que se puedan establecer en ellos diferentes elementos que proporcionen información útil para el conocimiento del sistema hidrogeológico: localización administrativa (municipio, vereda, barrio), aspectos técnicos del punto (naturaleza de la obra, modo de perforación, diámetro, materiales, profundidad, etc.), condiciones hidrológicas (niveles piezométricos en diferentes épocas, calidad química), entorno geológico (litología y geomorfología), usos que se hacen del recurso hídrico subterráneo, etc.

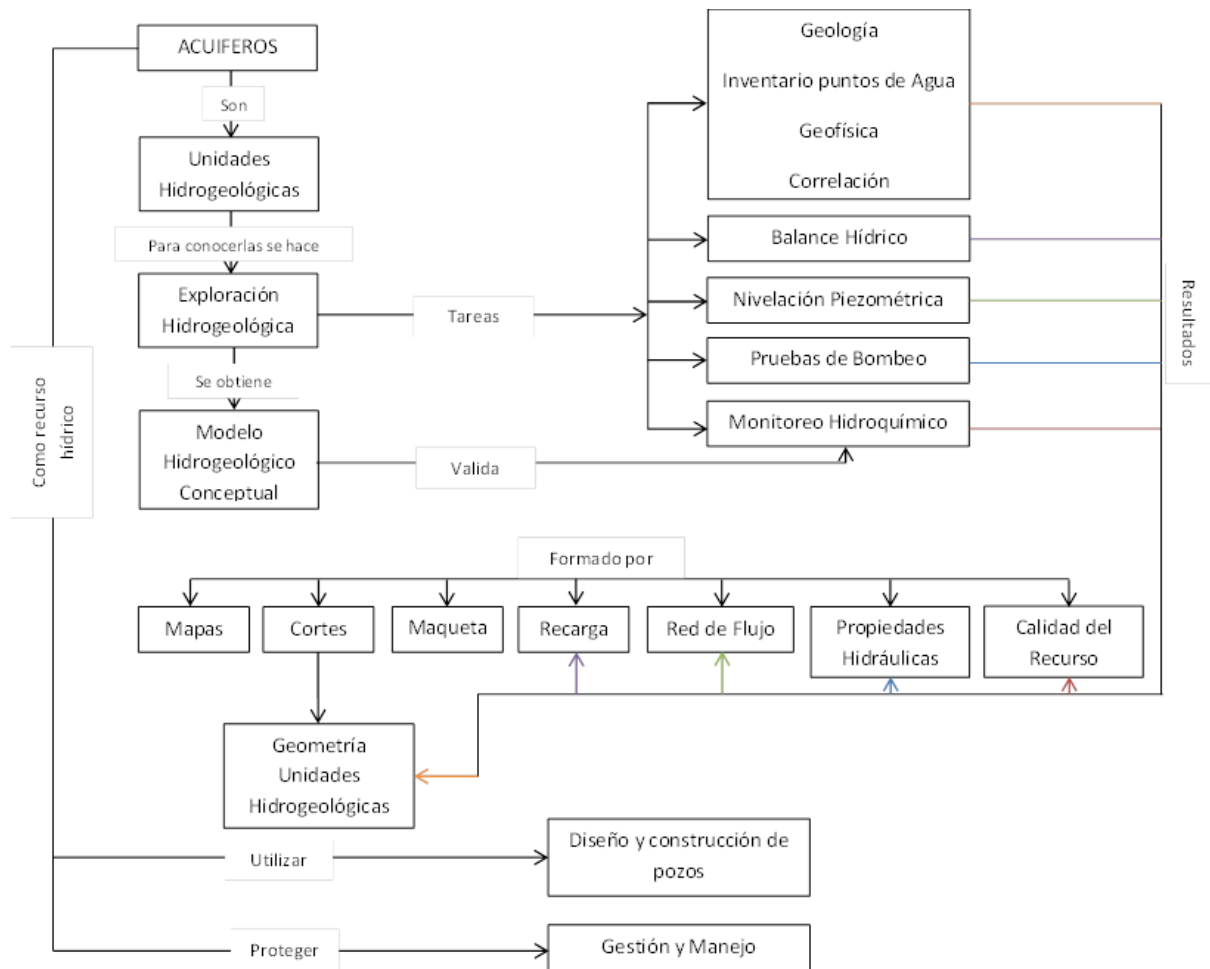
Para obtener un modelo geométrico del sistema hidrogeológico, representado mediante mapas, cortes y bloques diagrama; que muestren la distribución en superficie y profundidad de las unidades hidrogeológicas, se debe contar con una geología detallada del territorio, procesar la información recopilada durante el inventario y, es fundamental, refinar la prospección del subsuelo mediante la realización de pruebas geofísicas. Mientras más y mejor información se obtengan de las columnas estratigráficas, mejores resultados se lograrán con la tarea de correlación, que permite definir las unidades hidroestratigráficas. Correlacionar es establecer una correspondencia en carácter y posición estratigráfica. Para la correlación de las unidades hidrogeológicas se tienen en cuenta características texturales, granulometría, espesores, continuidad y posición relativa en profundidad de las unidades estratigráficas de cada columna.

La definición de la recarga hace referencia a dos elementos: la identificación de fuentes y áreas de recarga y la cuantificación de la misma, esta última se obtiene como resultado, normalmente, de un balance hídrico. De otro lado, la nivelación piezométrica permite la modelación de redes de flujo que indican las rutas de la escorrentía subterránea desde sus puntos iniciales, en áreas de recarga, hasta los sitios de descarga. Para obtener el mapa de recarga se tiene en cuenta las propiedades de las principales unidades de suelo que existen en la zona de estudio y, aplicando mediante criterios teóricos o pruebas de infiltración valores de conductividad hidráulica, se establecen habilidades para la infiltración desde la superficie.

Para la definición de las propiedades hidráulicas de los acuíferos se realiza pruebas de bombeo, durante las cuales se toman datos que permiten calcular mediante la relación caudal-tiempo-abatimiento-recuperación, los valores de conductividad hidráulica, transitividad y coeficiente de almacenamiento de las distintas unidades.

El modelo conceptual se completa con la evaluación de la calidad del agua subterránea y de la vulnerabilidad del acuífero.

El agua subterránea almacenada en los acuíferos constituye un recurso natural vital, como tal y en el contexto de las nuevas perspectivas frente al agua, representa un derecho. El agua subterránea se utiliza para abastecer las necesidades que el hombre tiene del líquido y se debe proteger. Este recurso debe utilizarse de forma adecuada y brindar sus beneficios bajo la construcción de captaciones técnicamente aptas y lineamientos de gestión sostenibles.



**Figura 1.3. Esquema metodológico para la obtención de un modelo hidrogeológico conceptual(Fuente: Betancur, 2010).**

A continuación se listan las tareas ejecutadas para lograr los resultados proyectados en los objetivos de este estudio:

### 1. Recopilación de información:

De los resultados del proyecto: “Diseño e Implementación de la Red de Monitoreo de Aguas Subterráneas en la Cuenca Hidrográfica del Río Aburrá”, Fase III (UdeA-UNAL, 2011), se retomaron los elementos que exponen el estado del arte del conocimiento acerca de las aguas subterráneas en el Valle de Aburrá. Ante la necesidad de trascender en la investigación hidrogeológica regional a una mayor escala, la cartografía básica y temática del proyecto “Microzonificación y Evaluación del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá”, (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2007), representa la mejor fuente de información espacial al momento de abordar las tareas de ajuste a la geología de la zona de estudio. Fueron también importantes las consultas efectuadas en el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá, (Acuerdo 02 de 2007 de la comisión Conjunta del Río Aburrá) y en algunos Planes de ordenación y manejo de microcuencas. Así mismo se tuvo en cuenta la

información consignada en los Planes de Ordenamiento Territorial vigentes y aquella publicada en los sitios web de cada administración municipal, en el Anexo 1.1 se consignan las fichas resúmenes de otros estudios y documentos consultados. Finalmente se obtuvo, analizó y utilizó información cartográfica, fotografías aéreas existentes e imágenes de satélite (USGS, LANDSAT ETM, 2011)

## **2. Caracterización geológica y geomorfológica:**

La exploración geológica es un elemento fundamental para la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual. A partir del análisis y procesamiento de la información recopilada, de la interpretación de foto imágenes aéreas e imágenes de satélite (USGS, LANDSAT ETM, 2011) y verificación en campo, Se sintetizó el mapa geológico del área de estudio a escala 1:10.000, también se efectuó una descripción de las unidades geomorfológicas (la geología y geomorfología se sintetiza en el capítulo 3). Este trabajo sirvió de base para la definición de las unidades hidrogeológicas con potencial acuífero.

## **3. Prospección geofísica y modelo geométrico:**

Por medio de la ejecución de tomografías eléctricas, se determina la variación de la resistividad en secciones de las rocas en el subsuelo y se identifican capas geoeléctricas; la interpretación de las curvas obtenidas en campo con parámetros teóricos y registros de columnas estratigráficas conocidas, permitieron determinar el comportamiento de las unidades hidrogeológicas en lugares donde no se cuenta con información detallada.

Se practicaron 20 tomografías en sitios donde las características topográficas y geológicas permitieron su realización, de este procedimiento y sus resultados dan cuenta este informe en el apartado 4.1.

Teniendo en cuenta los resultados de la exploración geológica, la prospección geofísica y la información que proporcionan algunos registros de perforaciones efectuadas en el Valle de Aburrá, se definió la geometría y la distribución espacial de las unidades hidroestratigráficas. Además de algunas columnas producto de perforaciones efectuadas dentro del proyecto de microzonificación sísmica, se incorpora a esta actividad las columnas obtenidas durante la realización de cuatro perforaciones que hicieron parte de este proyecto. La información obtenida después del proceso de correlación fue el insumo para la modelación espacial de los acuíferos, en un sistema de información geográfica (se utilizó ArcGis 9.2). En el numeral 4.1.2 de este informe se consignan los resultados de esta actividad.

## **4. Determinación de la Recarga:**

Utilizando criterios geológicos, geomorfológicos, hidráulicos y estructurales se delimitaron las zonas de recarga directa e indirecta del norte del Valle de Aburrá (apartado 4.2 de este informe). Para la cuantificación de este proceso se aplicó el método de balance hídrico por estaciones en el área de recarga directa (numeral 4.1.3 de este informe) y se aproximó un orden de magnitud mediante balance distribuido para las áreas de recarga indirecta (apartado 4.2.5 de este informe).

## **5. Determinación de direcciones de flujo del agua subterránea:**

Las actividades de nivelación piezométrica (numeral 4.1.4) y los análisis hidrogeoquímicos e isotópicos (numeral 4.2.4) se emplearon para determinar las direcciones de flujo que validan las áreas fuente, zonas de tránsito y áreas de descarga de las aguas subterráneas.

## **6. Actualización de base de datos y modelación geoespacial:**

La información utilizada y obtenida con la realización de este estudio fue almacenada en una base de datos espacial que se ajusta a los estándares del AMVA, esta base de datos hace parte de los entregables de este estudio.

A partir de ejercicios de modelación geoespacial se obtuvieron los mapas que representan los diferentes elementos que conforman el modelo hidrogeológico conceptual.

Se entrega una base de datos espacial, siguiendo los estándares del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, con la información cartográfica recolectada y generada durante esta fase del proyecto, esta base de datos es compatible con ArcGis 9.2.

## **7. Determinación de medidas de protección de zonas de recarga:**

Se recolectaron una serie de documentos que permitieran aclarar conceptualmente las ideas a aplicar acerca de lo que son o pueden ser las medidas de protección a implementar en zonas de recarga de acuíferos, se consultaron también algunas experiencias al respecto. Luego considerando las particularidades de la zona de estudio se dieron una serie de discusiones encaminadas a definir cuales medidas pueden proponerse para el caso particular del que se ocupa este proyecto. En el capítulo 5 del presente informe, se recogen estos resultados.

## **8. Elaboración del informe final:**

Este informe final contiene los resultados de todas las actividades realizadas, para la determinación y definición de medidas de protección de las zonas de recarga a los acuíferos del norte del Valle de Aburrá. En este informe se leen claramente los resultados correspondientes a tres productos principales: un modelo hidrogeológico de detalle para el Norte del Valle de Aburrá, la delimitación de las zonas de recarga directa e indirecta al acuífero y la determinación de una serie de medidas de protección para estas.

El informe contiene 16 anexos con resultados parciales, logrados mediante algunas actividades particulares que eran fundamentales para el logro de los objetivos.

### **1.3 PRODUCTOS**

Dando cabal cumplimiento a los objetivos propuestos se logran los siguientes productos:

- a) Mapas y cortes que representen la geometría del sistema hidrogeológico entre Bello y Barbosa: Esta cartografía está representada en los mapas geológico y geomorfológico que se describen en el capítulo 3 y en los mapas y secciones registradas en el numeral 4.1 donde se describe el modelo hidrogeológico

obtenido con la ejecución de este estudio. El modelo tiene un nivel de detalle correspondiente a una escala 1:10.000.

- b) Mapas de propiedades hidráulicas del sistema hidrogeológico: Los métodos, procedimientos y resultados, para lograr este producto, se consignan en el numeral 4.1.5. de este informe.
- c) Red preliminar de flujo de aguas subterráneas: En el apartado 4.1.4 se presenta la descripción del flujo de aguas subterráneas, obtenida a partir de las campañas de campo efectuadas durante la ejecución de este estudio.
- d) Delimitación y caracterización de zonas de recarga: Los textos y figuras de la sección 4.2 dan cuenta de los resultados alcanzados en la delimitación y caracterización de las zonas de recarga directa e indirecta al acuífero norte del Valle de Aburrá.
- e) Medidas de manejo para las zonas de recarga: El capítulo 5 está dedicado, en su totalidad, a documentar este aspecto central del proyecto.

La calidad de estos productos esta soportada en la realización de las actividades metodológicas y el análisis de resultados orientados y a cargo, de profesionales especialistas en áreas de hidrogeología, geofísica y gestión ambiental. Tal y como estaba planeado se alcanzó a:

- a) Realizar una síntesis de la Geología en la zona de estudio (capítulo 3).
- b) Efectuar los análisis geofísicos, mediante 20 tomografías eléctricas, correlacionadas con informaciones y perforaciones que posibilitaron identificar y describir las unidades hidroestratigráficas.
- c) Definir un modelo hidrogeológico conceptual que sintetizó en el acuífero Norte del Valle de Aburrá, las unidades hidrogeológicas definidas en 2002 como unidades A1 y A3 en los municipios de Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa.
- d) Practicar cuatro perforaciones exploratorias y las correspondientes pruebas hidráulicas en los sitios seleccionados de acuerdo con el modelo hidrogeológico logrado.
- e) Identificar y delimitar las zonas de recarga directa o indirecta al sistema hidrogeológico dentro de los municipios de Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa.
- f) Establecer patrones de flujo de agua subterránea según áreas de recarga, tránsito y descarga.
- g) Definir las medidas de manejo y protección del sistema hidrogeológico considerando unidades acuíferas y zonas de recarga.

## 2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En este capítulo se presentan las principales características que describen la zona de estudio correspondiente a los municipios del norte del Valle de Aburrá (Bello, Copacabana, Girardota, y Barbosa) para el proyecto Determinación y Protección de Zonas de Recarga de los Acuíferos al Norte del Valle de Aburrá.

La base para este estudio corresponde a la revisión del POT vigente de Barbosa (acuerdo 019 de 2000), Girardota (acuerdo 092 de 2007), Copacabana (acuerdo 025 de 2000) y Bello (acuerdo 033 de 2009), a los datos de población para el año 2005 y su proyección al año 2010 (DANE, 2005), a la información institucional registrada en la página Web de cada municipio, y al Estudio de la Microzonificación Sísmica de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado, Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA, 2007).

### VALLE DE ABURRÁ

El territorio del departamento de Antioquia se caracteriza por tener un relieve variado, representado por áreas planas, con alturas que varían entre los 200 y los 1.300 m localizadas en el Valle del Magdalena y las zonas próximas al Chocó y el Urabá; y una extensa área montañosa que hace parte de las cordilleras Central y Occidental, con alturas que oscilan entre los 1.000 y los 4.080 m.s.n.m.

Dentro de este contexto fisiográfico, en medio de la cordillera Central de los Andes se encuentra la subregión del Valle de Aburrá, cuenca natural del río Aburrá-Medellín ubicada en el centro del departamento. El río recorre este valle de sur a norte, desde su nacimiento en el alto de San Miguel (Caldas) a unos 1.800 m.s.n.m., hasta puente Gabino donde desemboca en el río Grande llevando el nombre de río Porce. Las montañas y altiplanos que lo limitan tienen una altura promedio de 2.700 m.s.n.m., siendo el punto más alto el cerro del Padre Amaya con 3.100 m.s.n.m. (Figura 2.1).

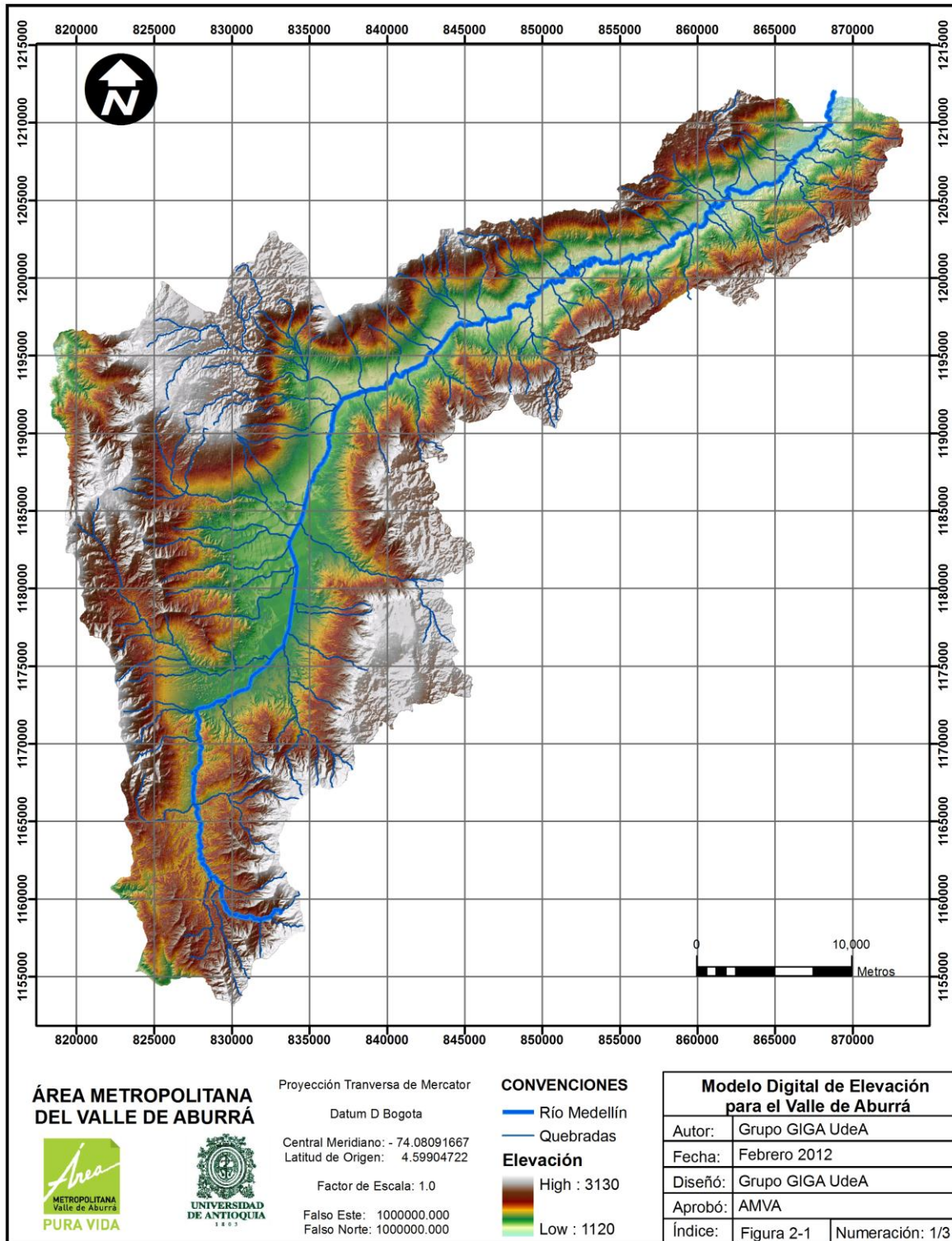


Figura 2.1. Modelo Digital de Elevación para el Valle de Aburrá.



El valle tiene una longitud aproximada de 60 km, se presenta en dos tramos: El primero tiene unos 30 km de longitud y va de sur a norte, desde el municipio de Caldas hasta el municipio de Bello, con un ensanchamiento máximo de unos 7 km a la altura de Medellín. El otro, más estrecho, está orientado hacia el noreste y va desde el municipio de Bello al municipio de Barbosa, con unos 35 km de largo. Está enmarcado por una topografía irregular y de pendiente, con alturas que oscila entre 1.300 y 2.800 m.s.n.m. La temperatura oscila entre los 16 y 29 °C y la humedad relativa es del 70%. La precipitación promedio es de 1.500 mm al año con máximos de 3.500 mm en algunas épocas. El régimen de lluvias es bimodal, con dos épocas de lluvia y dos relativamente secas.

Los municipios que conforman el Valle de Aburrá son diez (Figura 2.2): Caldas, La Estrella, Sabaneta, Itagüí, Envigado, Medellín, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa. Medellín es el municipio núcleo y la capital del departamento de Antioquia y se encuentra vinculado con los demás municipios aledaños por estrechas relaciones de orden físico, económico y social.

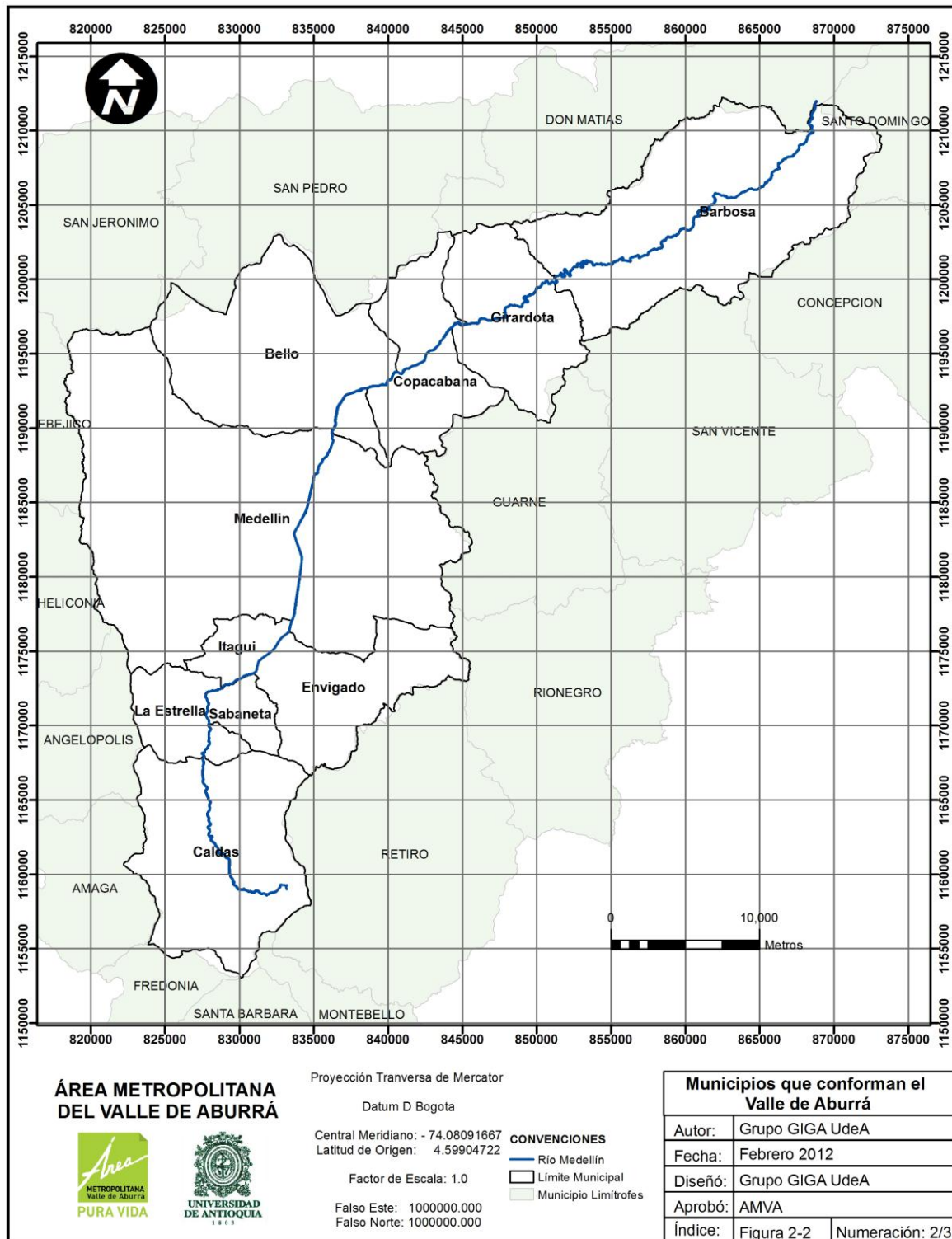


Figura 2.2. Municipios que conforman el Valle de Aburrá.

El área urbana del Valle de Aburrá concentra la mayor cantidad de habitantes del departamento. Municipios como Medellín, Bello, Itagüí y Envigado albergan la mayor densidad poblacional. En la Tabla 2.1 se registran los datos de población para el año 2005 y su proyección al año 2011 (DANE, 2005).

**Tabla 2.1. Población 2005 y proyección en el 2011.**

PROYECCIONES	POBLACIÓN (2005)	PROYECCIÓN POBLACIÓN (2011)
MUNICIPIO	TOTAL	TOTAL
Barbosa	42.453	46.954
Bello	371.625	421.576
Caldas	67.994	74.069
Copacabana	61.230	66.665
Envigado	174.150	202.354
Girardota	41.486	49.398
Itagüí	235.567	255.345
La Estrella	52.571	58.422
Medellín	2.214.494	2.368.282
Sabaneta	44.443	48.998

DANE, 2005.

Empresas Públicas de Medellín, EPM, brinda a la comunidad del Valle de Aburrá, los servicios de acueducto, alcantarillado, energía eléctrica y telecomunicaciones. Esta empresa registra coberturas de prestación de servicios del 100% para acueducto, 100% en alcantarillado y un 99.3% en energía eléctrica (EPM, 2011).

Las principales actividades económicas del Valle de Aburrá las constituye la industria textil, el turismo y el comercio (Gobernación de Antioquia, La Enciclopedia de Antioquia, 2008); otras están representadas en los sectores financiero, de construcción y de servicios. Medellín es sede anual de importantes eventos empresariales y se está posicionando como sede de eventos académicos gracias a la dotación en infraestructura que se vienen realizando para este fin.

Los usos del suelo en el norte del Valle de Aburrá pueden sintetizarse (Tabla 2.2 y Figura 2.3) según las clasificaciones de: agropecuario, agropecuario y forestal, expansión, minería, protección, retiros a corrientes, rural, suburbano y urbano.

**Tabla 2.2. Especificaciones de las definiciones en el mapa de Usos del Suelo para los municipios del Norte del Valle de Aburrá.**

<b>TÉRMINO</b>	<b>AGRUPA</b>
AGROPECUARIO	Usos agrícolas, pecuarios y agropecuarios, y actividades relacionadas con los cultivos en parcelaciones campesinas de cada municipio. usos transicionales que implicaban cultivos y uso pecuario por temporadas
AGROPECUARIO Y FORESTAL	Usos agropecuarios y forestales en un mismo espacio
CUERPOS DE AGUA	-
EXPANSIÓN	-
FORESTAL	Toda variedad de usos forestales: forestal, forestal protector, forestal productor, forestal con especies introducidas, forestal con especies nativas, forestal protector productor.
LLENOS ESCOMBRERAS Y BOTADEROS	-
MINERÍA	Minería y extracción de materiales
PROTECCIÓN	Usos de protección, conservación áreas protegidas, lo que son áreas preservadas, y áreas protegidas no recuperables, conservación
RECREATIVO	-
RECUPERACIÓN	-
RETIROS A CORRIENTES DE AGUA	Retiros a corrientes de agua, retiros a quebradas
RURAL	Parcelaciones de viviendas campestres, rural
SUBURBANO	Usos urbanos en áreas rurales, suburbano
URBANO	Usos urbanos, urbano, subcategorías de urbano como: residencial, industrial, comercial y servicios
ZONA VERDE	-

Fuente: Elaboración propia, 2012

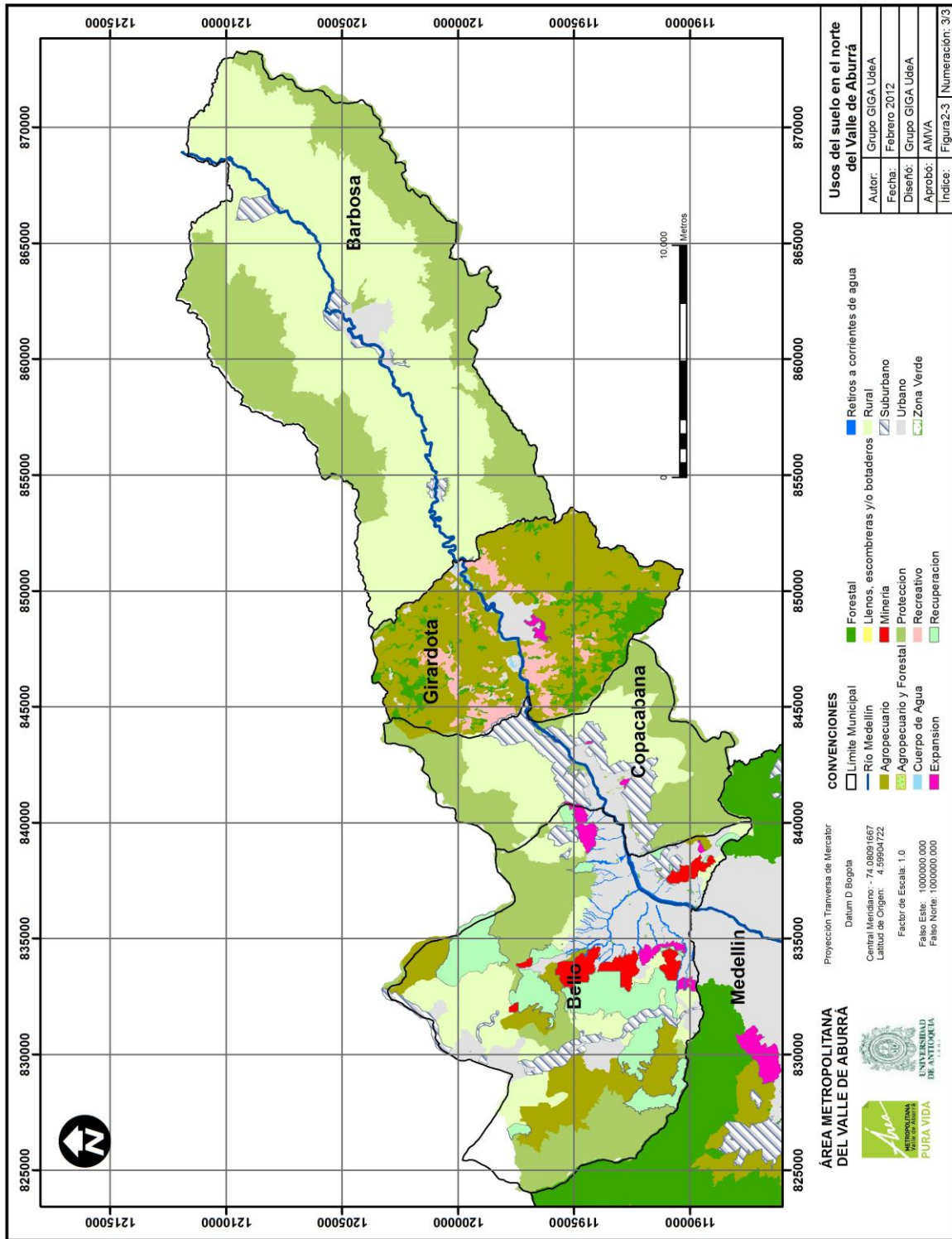


Figura 2.3. Usos del suelo en el norte del Valle de Aburrá.

Con el propósito de ofrecer una descripción un poco más detallada de la zona de estudio que sirva de contexto para tener una visión general del territorio, se presenta a continuación una breve síntesis con las características generales de cada uno de estos municipios.

## 2.1 MUNICIPIO DE BELLO

### 2.1.1 Generalidades

*"Bello es también conocido como Imperio del Cacique Niquía, cuna de Marco Fidel Suárez, y Ciudad de los Artistas".*



A partir de la revisión del POT del municipio de Bello (Revisión y ajuste del Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Bello, acuerdo 033 de 2009), y de la información institucional registrada en la página web:

(<http://Bello.aredigital.gov.co/institucional/Paginas/institucional.aspx>) se realiza la siguiente síntesis:

El municipio de Bello fue habitado por los indígenas Niquías. Posteriormente, hacia el año de 1576, Gaspar de Rodas solicita el territorio a la Corona Española para el establecimiento de "Hatos de Ganado y Estancia de Comida", con lo que el territorio empezó a llamarse Hatoviejo. Hacia el año de 1883, su nombre cambia a Bello, en honor al escritor y jurista venezolano Don Andrés Bello. El 29 de abril de 1913 obtiene la distinción de Municipio.

Bello se encuentra localizado al noroeste del Valle de Aburrá, bajo las coordenadas 6° 20' 0" N, 75° 33' 0" W. Limita por el norte con el municipio San Pedro de Los Milagros, por el este con el municipio de Copacabana, por el sur con el municipio de Medellín y por el oeste con los municipios Medellín y San Jerónimo (Figura 2.2).

El municipio cuenta con una superficie total de 142,36 km<sup>2</sup>, de los cuales el 19,7 km<sup>2</sup> corresponde a la zona urbana y 122,66 km<sup>2</sup> a la zona rural, conformado por 15 veredas (Tabla 2.3) y el corregimiento de San Félix.

**Tabla 2.3. Veredas del Municipio de Bello.**

VEREDAS		
Potrerito	El Carmelo	La Palma
Guasimalito	La China	Cuartas
La Unión	Primavera	Tierradentro
Hato Viejo	Ovejas	Sabanalarga
Granizal	Cerezales	El Tambo

Según las proyecciones presentadas por el DANE para el 2011, Bello cuenta con una población de 421.576 habitantes en total (Tabla 2.1).

A nivel urbano, el municipio cuenta con una cobertura del 100% en acueducto y aguas residuales, presentando un número de usuarios de 93.340 y 90.713 respectivamente (EPM 2010, Cobertura de Aguas).

### 2.1.2 Aspectos Físicos

El municipio de Bello presenta un relieve de altiplano hacia el occidente del municipio (Corregimiento de San Félix), está limitado por un escarpe de nivel regional que constituye uno de los respaldos del Valle de Aburrá; al pie del escarpe, se localizan una serie de colinas las cuales, al igual que el altiplano y el escarpe, están modeladas en las rocas del Batolito de Ovejas. Consecutivamente, en dirección al valle, hay un despliegue de depósitos de flujo que se interdigitan con depósitos aluviales y aluviotorrenciales de quebradas como El Hato. Presenta una altura promedio de 1.600 m.s.n.m. en el casco urbano, sin embargo su máxima altitud alcanza los 2.880 m.s.n.m. en el Cerro Quitasol que es su principal accidente topográfico.

En el municipio de Bello se encuentran rocas de diferente tipo, entre las que se destacan: las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca en el cual se incluye el Grupo El Retiro con las Anfibolitas de Medellín (TRaM) y los Esquistos Anfibólicos de Baldías (TReaB); aflora también rocas ígneas como el Complejo Ofiolítico de Aburrá con la unidad de la Dunita de Medellín (JKuM) y las Metabasitas del Picacho (JKmbP) y los intrusivos cretáceos con el Batolito de Ovejas; finalmente, aparecen los depósitos recientes entre los que se presentan flujos de escombros y lodos además de depósitos aluviales y llenos antrópico (Estudio de la Microzonificación Sísmica de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado, Área Metropolitana del Valle de Aburrá –AMVA, 2007).

Bello está irrigado por numerosos afluentes en los que se destacan, a la margen izquierda del río Aburrá-Medellín las quebradas El Hato, La García, La Loca, Seca y Guasimal; y a la margen derecha las principales quebradas corresponden a La Gabriela y Rodas.

El índice promedio de precipitación es de 1.347 mm, y su temperatura promedio es de 22 °C durante todo el año, donde se intercalan períodos secos y lluviosos.

### 2.1.3 Aspectos socioeconómicos

La clasificación de las actividades económicas de Bello está determinada en tres grandes grupos: Industria, comercio y servicios; de los cuales el que tiene mayor participación a nivel contributivo es la industria, y por cobertura, según el número de establecimientos, el comercio.

El hito económico del municipio ha sido la fundación de la Fábrica de Hilados y Tejidos del Hato (Fabricato) en el año de 1923, esto ha caracterizado la actividad industrial textil de la población bellanita como obrera hasta los primeros años de la década de los 80. Sin embargo, a causa de actividades y trabajos ilegales como el narcotráfico de la época, se ocasionó un desempeño negativo en los sectores económicos afectando especialmente al sector textilero, lo cual ha incidido en la vocación económica del municipio que ha pasado de industrial a comercial y de servicios principalmente; a estas actividades también están asociadas el sector agrícola, la economía informal y la extracción y explotación minera.

Los usos del suelo que se desarrolla en el municipio de Bello son variados y depende de la actividad que se implemente en cada zona, es así como estos usos y el porcentaje de área que es destinado para ello se distribuye de la siguiente forma: Agropecuario (13,32%), expansión (2,02%), minería (4,10%), protección (21,68%), recuperación (15,80%), retiros o corrientes de agua (2,05%), rural (16,84%), suburbano (5,03%), urbano (19,13%) y zona verde (0,04%).

Uno de los problemas ambientales que se evidencian en el municipio de Bello hace referencia a la descarga de escombros de construcción, vidrio y basura sobre las zonas aluviales del río alterando la calidad de las gravas y las arenas. Es importante anotar que el 71% de las explotaciones de areneras, el 19% de las explotaciones de canteras y el 5% de las explotaciones aluviales del Valle de Aburrá se localizan en el Municipio de Bello, lo cual indica que esta actividad presenta un alto grado de saturación, que se traduce en innumerables impactos sobre los recursos naturales y el ambiente como procesos erosivos, contaminación del recurso hídrico y del aire. Paralelo a lo anterior, la erosión es un problema muy marcado en el municipio y se presenta por la falta de coberturas vegetales que protegen el suelo, el cual es enlodado fácilmente por la acción de la lluvia formando surcos y cárcavas, creando zonas altamente degradadas como las que se observan sobre el piedemonte del cerro Quitasol en la microcuenca de la quebrada La Señorita y en los alrededores de los barrios La Gabriela y Santa Rita.

Por otra parte, la intensidad del fenómeno de “El Niño” o “ENOS” 1997-1998 produjo en Bello no solo una inusitada oleada de incendios forestales, sino que redujo significativamente los caudales de las quebradas y produjo grandes pérdidas en la agricultura y la ganadería en la zona rural. La subsecuente llegada del fenómeno de “La Niña” con su régimen de lluvias fuertes y su correspondiente incidencia sobre las inundaciones, generaron grandes movimientos de masa, erosión del suelo, socavamiento de los cauces, proliferación de insectos, entre otros.



## 2.2 MUNICIPIO DE COPACABANA

### 2.2.1 Generalidades

*“Copacabana es conocida como la Fundadora de Pueblos. Su nombre viene del quechua Qupa (claro, alegre, sereno) qhawana (lugar donde se puede ver a los lejos)”*



De acuerdo con la revisión del POT del municipio (Municipio de Copacabana – diagnóstico, acuerdo No. 025 de 2000), de la información institucional de Copacabana (<http://Copacabana.aredigital.gov.co>) se realiza la siguiente síntesis:

El actual territorio de Copacabana se llamaba La Tasajera y comprendía los territorios de los actuales municipios de Don Matías, San Pedro de los Milagros, Belmira, Entreríos, Girardota, Barbosa y Santo Domingo. A finales del siglo XVI el lugar cambió de nombre a Real de Minas Don Juan de Espinosa. Una vez que la burguesía adquirió el derecho sobre todo el territorio de La Tasajera muchas fueron las personas que tuvieron que huir. Los nuevos desplazados decidieron formar un pueblo en frente de La Tasajera, lo que se conoció como Nuestra Señora de Copacabana de La Tasajera, actualmente Copacabana.

Copacabana se encuentra localizado al noreste de la capital del departamento de Antioquia y forma parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, está ubicado desde su cabecera municipal a 18 km de Medellín, bajo una latitud Norte 6° 20' 38" y una longitud al Oeste de Greenwich 75° 30' 48".

Limita por el norte con el municipio de San Pedro de los Milagros, por el este con el municipio de Girardota, por el sur con el Municipio de Guarne y Medellín y por el oeste con el municipio de Bello (Figura 2.2).

El municipio cuenta con una superficie total de 70 km<sup>2</sup>, de los cuales 4,86 km<sup>2</sup> corresponde a la zona urbana y 65,14 km<sup>2</sup> a la rural, conformado por 15 veredas (Tabla 2.4).

**Tabla 2.4. Veredas del municipio de Copacabana.**

VEREDAS		
Alvarado	Fontidueño	Peñolcito
Ancón	Granizal	Quebrada arriba
Cabuyal	La veta	Sabaneta
Convento	Montañita	Zarzal Curazao
El salado	Noral	Zarzal la luz.

Según las proyecciones presentadas por el DANE para el 2011, Copacabana cuenta con una población de 66.665 habitantes en total (Tabla 2.1).

A nivel urbano, el municipio cuenta con una cobertura del 100% en acueducto y aguas residuales, presentando un número de usuarios de 16.049 y 14.746 respectivamente (EPM 2010, Cobertura de Aguas).

### 2.2.2 Aspectos físicos

El municipio de Copacabana presenta un relieve montañoso de vertientes largas y escalonadas que descienden topográficamente generando una serie de quiebres y superficies aptas para la acumulación de depósitos. Desde la parte media de la vertiente hasta la base, es común observar depósitos asociados a geformas de abanicos y lomos escalonados de cimas ligeramente inclinadas. Algunas estribaciones inferiores de las vertientes rocosas presentan pendientes pronunciadas, como el Ancón Norte y el Alto de la Cruz. Las partes altas de las vertientes montañosas son escarpadas con cimas redondeadas que limitan con zonas de colinas que conforman altiplanos (Guarne y San Pedro). El municipio está a una altura promedio de 1.425 m.s.n.m. en el casco urbano, sin embargo su máxima altitud alcanza los 2.800 m.s.n.m., entre sus alturas más destacadas se encuentran el Cerro del Ancón a 1.600 m.s.n.m., el cerro del Umbí a 2.050 m.s.n.m., el Cerro de la Palma a 1.600 m.s.n.m., el Alto de Las Cruces a 2.550 m.s.n.m., el Alto de La Virgen a 2.550 m.s.n.m., el Alto Morrón a 2.500 m.s.n.m., el Alto de La Sierra a 2.450 m.s.n.m. y el Cerro de Las Lajas 2.550 a m.s.n.m.

En el municipio de Copacabana se encuentran rocas de diferente tipo, tales como: rocas metamórficas del Complejo Cajamarca con el Grupo El Retiro representado por las Anfibolitas de Medellín (TRaM) y el Gneis de La Ceja (TRgLC); dentro de las rocas metamórficas también afloran el Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS); dentro de las rocas ígneas afloran rocas del Batolito Antioqueño (KcdA) y los denominados Gabros de Copacabana (KgC). Finalmente, afloran los depósitos de vertiente y los materiales aluviales y aluviotorrenciales asociados a las corrientes que drenan los terrenos (Estudio de la Microzonificación Sísmica de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado, Área Metropolitana del Valle de Aburrá –AMVA, 2007).

Copacabana está irrigado por numerosas corrientes de aguas entre las que sobresale a la margen izquierda del río Aburrá-Medellín las quebradas La Tolda, La Beta, El Salto o Limonal; y a la margen derecha las principales quebradas corresponden a El Chuscal, El Convento y Piedras Blancas.

En cuanto al clima, el municipio tiene una temperatura promedio de 22 °C y una precipitación promedio anual de 1.350 mm.

### 2.2.3 Aspectos socioeconómicos

El municipio de Copacabana presenta características importantes para la dinámica, el crecimiento y el desarrollo de la industria, el comercio, los servicios y otras actividades productivas, debido a su localización geográfica estratégica. Ya que por su territorio cruzan vías tan importantes como la troncal occidental que va desde Rumichaca en el Ecuador hasta Cartagena que posibilita el transporte masivo de Productos a bajos costos a diferentes centros comerciales, industriales y turísticos como la costa y el centro del país.

En términos generales, el municipio de Copacabana presenta una tendencia al crecimiento industrial y de microempresas; se destaca por ser sede de industrias, con proyección nacional e internacional como Imusa y Haceb, también se ubican empresas y microempresas con tecnologías y procesos básicos, talleres, industrias de alimentos, prefabricados, productos químicos, entre otros; además de actividades del sector comercio y servicio. Por otra parte, la producción agrícola es incipiente y el sector de producción pecuario no es representativo en el nivel regional ya que se desarrolla como una actividad complementaria a las actividades agrícolas de subsistencia, aunque se encuentran algunas explotaciones importantes donde se manejan niveles de tecnología más que todo en avicultura o ganadería. De otro lado, la actividad minera que se desarrolla en el municipio está orientada a procesos de extracción de materiales para la construcción, dragado y extracción de material en el aluvión del río Aburrá-Medellín.

Los usos del suelo que se desarrolla en el municipio de Copacabana son variados y depende de la actividad que se implemente en cada zona, es así como estos usos y el porcentaje de área que es destinado para ello se distribuyen de la siguiente forma: Expansión (0,20%), protección (45,7%), rural (31,2%), suburbano (16,6%), y urbano (6,3%).

Uno de los problemas ambientales que se evidencian en el municipio de Copacabana hace referencia a la explotación no controlada de materiales aluviales que están produciendo una degradación prácticamente irreversible en la faja aluvial; el resultado de ésta son cauces excesivamente anchos que modifican la dinámica fluvial y una serie de lagos contaminados, generando problemas ambientales y sanitarios. Además, la explotación de los recursos naturales para satisfacer la creciente población conlleva al agotamiento del recurso, afectando los recursos agua, aire, flora, fauna y al hombre mismo, y con ello el encarecimiento de los costos de trabajo para su aprovechamiento. Por otra parte, se encuentra otro problema ambiental relevante relacionado con los usos del suelo, donde los suelos son afectados por procesos de expansión urbana y proyectos urbanísticos, por explotación de materiales para la construcción, por la inadecuada aplicación de técnicas agrícolas y pecuarias por vertimiento de sólidos y líquidos contaminados. Sumado a la ausencia de planeación y de conciencia que ha llevado a un continuo deterioro ambiental en detrimento del patrimonio ecológico y los recursos naturales, que es necesario aplicar procesos que permitan una mayor eficiencia en el uso del suelo, el agua, los animales, las plantas y los ecosistemas.

## 2.3 MUNICIPIO DE GIRARDOTA

### 2.3.1 Generalidades

*"Su nombre se dio en honor al prócer de la patria Atanasio Girardot; no se le quiso bautizar Girardot pues en el departamento de Cundinamarca ya existía una población con ese nombre, por lo que se modificó a Girardota. También se llamó Hato Grande en alguna época".*



Consultando las fuentes del POT del municipio (Revisión y ajuste del plan de ordenamiento territorial- municipio de Girardota, acuerdo 092 de 2007), de la información institucional de Girardota ([http:// Girardota.gov.co](http://Girardota.gov.co)) se realiza la siguiente síntesis:

La zona en la que hoy se encuentra Girardota fue habitada por los indios Nutabes y Yamesíes, que se dedicaban básicamente a la agricultura. En 1620 un grupo de colonos de Antioquia se ubicó en el paraje de San Diego y fundó el caserío, el cual quedó dependiendo de la ciudad de Santa Fe de Antioquia (capital del departamento en ese entonces), hasta 1675 que pasó a depender del caserío de la Villa de Medellín. A mediados del siglo XVII este territorio hacía parte de las haciendas San Diego y San Esteban, de sus tierras surge una tercera hacienda con una capilla alrededor de la cual se inicia el nuevo poblado.

Girardota es un municipio que se encuentra localizado al norte del Valle de Aburrá del departamento de Antioquia, está ubicado desde su cabecera municipal a 26 km de Medellín, bajo las coordenadas 6°22" Norte y 75°26" Oeste "".

Limita por el norte con los municipios de San Pedro de los milagros y Don Matías, por el este con los municipios de Barbosa y San Vicente, por el sur con el municipio de Guarne y por el oeste con el municipio de Copacabana (Figura 2.2).

El municipio cuenta con una superficie de 78 km<sup>2</sup> de los cuales 1,5 km<sup>2</sup> corresponde a la zona urbana y 76,5 km<sup>2</sup> a la rural conformado con un total de 25 veredas (Tabla 2.5).

**Tabla 2.5. Veredas del Municipio de Girardota.**

VEREDAS		
Portachuelo	Mercedes Abrego	El Barro
La Holanda	San Andrés	El Cano
San Esteban	El Paraíso	El palmar
La Mata	El Totumo	El Yarumo
La Matica	Loma de los Ochoa	San Diego
El Socorro	Mangarriba	La Meseta
Potrerito	Las Cuchillas	Jamundí
La Palma	La Calera	Encenillos
	Juan Cojo	

Según las proyecciones presentadas por el DANE para el 2011, Girardota cuenta con una población de 49.398 habitantes en total (Tabla 2.1).

A nivel urbano, el municipio cuenta con una cobertura del 100% en acueducto y aguas residuales, presentando un número de usuarios de 7.335 y 6.704 respectivamente (EPM 2010, Cobertura de Aguas).

### 2.3.2 Aspectos físicos

El municipio de Girardota presenta un relieve montañoso de vertientes largas, escarpadas en las partes altas y con cimas agudas, las cuales limitan con zonas de colinas que conforman los altiplanos de: Don Matías al norte y de Rionegro al sur. Desde la zona media-alta, donde hay un marcado quiebre de pendiente, hasta el pie de la vertiente, la pendiente se suaviza a causa de la formación de abanicos asociados a depósitos de flujo. Hacia la base de las vertientes se observa como los depósitos, continuos a lo largo del abanico, en ocasiones se interdigitan con las terrazas aluviales del río Aburrá. El municipio está a una altura de 1.425 m.s.n.m. en el casco urbano, sin embargo entre sus alturas más destacadas se encuentran el alto de Las Cruces con 2.550 m.s.n.m., el alto de La Sepultura, el cerro El Morro, y el cerro El Salado.

En el municipio de Girardota se encuentran rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, representadas por los Esquistos de Cajamarca (TReC) y el grupo El Retiro con las Anfibolitas de Medellín (TRaM). Aflora además, haciendo parte de los intrusivos cretáceos las rocas del Batolito Antioqueño (KcdA) y los depósitos recientes, tanto de vertiente como aluviales (Estudio de la Microzonificación Sísmica de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado, Área Metropolitana del Valle de Aburrá –AMVA, 2007).

Girardota está irrigado por numerosas corrientes de agua entre las que sobresale, a la margen izquierda del río Aburrá-Medellín, las quebradas La Mota, La Correa y Caimito; y, a la margen derecha, las principales quebradas corresponden a El Salado, Juan Cojo, La Fulgencia y Ferrería.

En cuanto al clima, el municipio tiene una temperatura promedio de 22 °C y una precipitación promedio anual de 1.875 mm.

### **2.3.3 Aspectos socioeconómicos**

El municipio se define como una localidad de vocación agrícola, siendo ésta una de las principales actividades económicas del municipio y otras tales como el comercio, la industria y el empleo en instituciones del sector público.

El sector comercial es una de las fuentes de ingresos de los ciudadanos de Girardota. La agricultura en sí misma no constituye el sector económico más importante en cuanto a los ingresos municipales, esto se refleja en la gran cantidad de suelo que se encuentra destinado a este uso.

El sector industrial en el municipio se ha potencializado. Durante los últimos cinco años se han instalado empresas como Itacol (producción), Papeles Familia (almacenamiento) y recientemente se ha dado licencia a Incolmotos para instalar su planta. En la zona de acceso, junto a la doble calzada, se dio licencia para la localización de tanques de almacenamiento a la empresa Zeuss, la cual se asoció con Disolvan (ya existente). Se infiere por tanto, que el municipio sigue consolidando el renglón más importante de su economía.

Existen algunas zonas en donde se establece la actividad ganadera, conformada en su mayoría por ganado vacuno de doble propósito y en menor grado por ganado porcino, con los que se abastecen los municipios del Área Metropolitana. En los últimos años se ha aumentado el número de galpones para pollos de engorde y gallinas ponedoras, ampliándose sobre las fronteras agrícolas y disminuyendo su proporción en una pequeña medida.

Existen otros sectores asociados a la economía municipal, tales como la minería donde se destaca la explotación de minerales y explotación de material de playa; el turismo, concerniente a la visita al santuario del Señor Caído y zonas para fincas de recreo, los lagos de pesca también se han convertido en una importante actividad recreativa en el Área Metropolitana.

Los usos del suelo que se desarrolla en el municipio de Girardota son variados y depende de la actividad que se implemente en cada zona, es así como estos usos y el porcentaje de área que es destinado para ello se distribuye de la siguiente forma: Agrícola, agropecuario y pecuario (69%), cuerpos de agua (0,6%), expansión (0,6%), forestal (13,9%), recreativo (10,6%), y urbano (5,3%).

Uno de los problemas ambientales que se evidencian en el municipio de Girardota hace referencia a procesos de sobreexplotación de los recursos naturales identificados; como canteras, procesos de degradación y tala de bosques, sobreexplotación y mal manejo de recursos naturales como el agua y el suelo. En general, el municipio ha sobreexplotado sus recursos naturales y ha consumido el espacio mismo en el que se asienta, evidenciándose problemas como proceso de urbanización de tierras agrícolas y forestales, deforestación y contaminación del aire, que se hace más grave debido a la ocupación industrial, extracción minera y bajo índice de espacio público por habitante.

## 2.4 MUNICIPIO DE BARBOSA

### 2.4.1 Generalidades

*“Barbosa es conocido como El distrito con sabor a piña. Este apelativo, muy suyo, viene del hecho de que allí se celebran las fiestas de la piña. Su nombre se da en honor a Diego Fernández de Barbosa, antiguo capitán bajo el mando de Gaspar de Rodas, de quien recibió las tierras”.*



A partir de la revisión del POT del municipio (Capítulo I; Diagnostico síntesis – Municipio de Barbosa, acuerdo 019 de 2000), de la información institucional de Barbosa (<http://Barbosa.areadigital.gov.co/Paginas/inicio.aspx>) se realiza la siguiente síntesis:

El territorio que hoy forma el municipio de Barbosa lo descubrió, como todo el Valle de Aburrá, Jerónimo Luis Téjelo, enviado por el mariscal Jorge Robledo. Don Gaspar de Rodas fue el primer conquistador que pisó las tierras barboseñas, hacia 1574. A partir de 1640 se inicia en este distrito la búsqueda de oro.

El Capitán Nicolás Blandón recibió título como propietario de algunos terrenos concedidos por don Gaspar de Rodas a finales del siglo XV. El Capitán Blandón vendió sus propiedades al Capitán Diego Fernández de Barbosa. La región recibió los nombres de Llanos de Barbosa o Hatillo de Barbosa. Dos meses después, el 25 de agosto de 1795, el gobernador de la provincia de Antioquia, Don José Felipe Inciarte, decretó la fundación de un poblado en el sitio que hoy ocupa el municipio de Barbosa denominado Llanos de Barbosa.

Barbosa es un municipio situado en el extremo norte del Valle de Aburrá en una estribación de la cordillera de los Andes, el municipio de Barbosa hace parte del Área Metropolitana, está ubicado a 36 km de la ciudad de Medellín, con una latitud Norte 6° 26' 21" y una longitud Oeste 75° 20' 04" de Greenwich. Este territorio es un paso obligado hacia el noreste del departamento, Magdalena Medio, Santander, la Costa Norte, Venezuela y sirve como vía alterna con la capital del país.

Limita por el norte con el municipio de Don Matías, por el este con el municipio de Santo Domingo, por el sur con los municipios de Concepción y San Vicente y por el oeste con el municipio de Girardota (Figura 2.2).

El municipio cuenta con una superficie total de 206 km<sup>2</sup>, de los cuales 3 km<sup>2</sup> corresponde a la zona urbana y 203 km<sup>2</sup> a la zona rural, siendo conformado por 54 veredas (Tabla 2.6) y dos corregimientos El Hatillo y Popalito.

**Tabla 2.6. Veredas del Municipio de Barbosa.**

VEREDAS		
Aguas Claras	El Viento	La Tolda
Altamira	Filoverde	Las Lajas
Buenos Aires parte alta	Graciano	Las Peñas
Buenos Aires baja	Guayabal	Las Victorias
Buga	Isaza	Matasanos
Cestillal	La Aguada	Mocorongo
Chorrohondo	La Calda	Mocorongoito
Corrientes	La Cejita	Monte loro
Dos Quebradas	La Chapa Alta	Monterredondo
El Cortado	La Chorrera	Pachohondo
El Guayabo	La Cuesta	Pantanillo
El Hoyo	La Ese	Platanito
El Paraíso	La Gómez	Potrerito
El Salado	La Herradura	Quintero
El Tablazo Hatillo	La Montañita	San Eugenio
El Tablazo Popalito	La Montera	Tamborcito
El Tigre	La Playa	Ventanas
La Quebra	La Primavera	Volantín.

Según las proyecciones presentadas por el DANE para el 2011, Barbosa cuenta con una población de 46.954 habitantes en total (Tabla 2.1).

A nivel urbano, el municipio cuenta con una cobertura del 50% en acueducto y aguas residuales, presentando un número de usuarios de 5.515 y 4.703 respectivamente (EPM 2010, Cobertura de Aguas).

#### 2.4.2 Aspectos físicos

El municipio de Barbosa presenta un relieve montañoso que corresponde a la cordillera central colombiana (sistema montañoso andino), además está conformado por un respaldo montañoso de vertientes largas y empinadas, un relieve colinado hacia el pie de las vertientes montañosas y un valle aluvial amplio. El municipio se encuentra a una altura de 1.300 m.s.n.m. donde las principales alturas que se destacan hacia el norte del municipio son los altos La Montañita (2.400 m.s.n.m.), Matasano (2.100 m.s.n.m.), loma La Montera (2.350 m.s.n.m.) y la cuchilla Cestillal (2.400 m.s.n.m.). Al sur, las lomas El Guamal (2.500 m.s.n.m.) y Quintero (2.200 m.s.n.m.) y los altos El Rodeo (2.300 m.s.n.m.), Norrón (2.630 m.s.n.m.), La Gómez (2.200 m.s.n.m.), San Eugenio y El Águila (1.850 m.s.n.m.).

En el municipio de Barbosa se caracteriza por la presencia de los Esquistos de Cajamarca (TReC), rocas de contacto denominadas cornubianas y el Batolito Antioqueño (KcdA) (Estudio de la Microzonificación Sísmica de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado, Área Metropolitana del Valle de Aburrá –AMVA, 2007).



Barbosa está bañado por numerosas corrientes de agua entre las que sobresalen, a la margen izquierda del río Porce (Aburrá-Medellín), las quebradas Laureles, Arenales, Montera y Cestillal; y a la margen derecha, las principales quebradas corresponden a La López, Ovejas, Monteloro, Santo Domingo, Piedra Gorda, La Gómez.

En cuanto al clima, el municipio tiene una temperatura promedio anual de 22 °C con medias máximas y mínimas de 29°C y 16°C. La precipitación promedio anual varía de forma gradual hacia aguas abajo del río Aburrá-Medellín con valores que van desde 1.600 mm/año en el parque de las aguas hasta los 2.200 mm/año en la cabecera municipal.

### **2.4.3 Aspectos socioeconómicos**

La estructura del municipio de Barbosa está relacionada con los sectores económicos, es así como el sector primario de la economía comprende los centros agropecuarios, de minas y canteras. En el sector secundario predominan las industrias de los alimentos, bebidas y tabacos; seguidas de las empresas madereras, de químicos, plásticos y caucho; las textiles, confecciones y cuero; y las que se dedican a la fabricación de productos metálicos, maquinaria y equipos. El sector terciario está asociado al comercio al por menor y los servicios comunales, sociales y personales.

De acuerdo a lo anterior, el municipio presenta una actividad económica apoyada básicamente en los sectores secundarios y terciarios; el sector primario tiene una menor importancia en el municipio, lo cual confirma que el Valle de Aburrá es industrial, donde las actividades agropecuarias constituyen un sector de segundo orden. Por tanto, en el sector primario la principal fuente de producción proviene de la agricultura (café y caña) y la ganadería (leche), sin embargo, algunos productos agrícolas vienen tomando fuerza como la cebolla, la mora y los frutales. La industria que existe en el municipio, en su mayor parte corresponde a la industria química y de papel. La industria de tipo artesanal tiene una importancia muy insignificante. El sector terciario aporta al alrededor del 50% de la producción total, y dentro de éste se destaca el comercio con el 24%, su importancia se relaciona con el proceso de industrialización que ha tenido el Valle en las últimas décadas.

La dinámica de la estructura empresarial del Aburrá Norte no es tan significativa como la de Medellín y menos aún con respecto al desarrollo industrial del Aburrá Sur. La economía campesina es un sistema socioeconómico y cultural de producción-consumo fundamentado en el trabajo familiar, articulado de múltiples maneras al sistema socioeconómico y a los mercados, operando dentro de un modo de vida rural.

A nivel de la ganadería, la porcicultura y la avicultura, es importante la producción y comercialización que se realiza a nivel interno y externo de la economía del municipio. Los proyectos de ganadería, piscicultura, minería, silvicultura, avicultura, la producción agrícola, la siembra y la explotación racionalizada de la tierra, así como la ejecución de las demás actividades propias del sector primario, son inherentes a la explotación y al aprovechamiento óptimo de las actividades agropecuarias.

Los usos del suelo que se desarrollan en el municipio de Barbosa son variados y depende de la actividad que se implemente en cada zona, es así como estos usos y el porcentaje de área que es destinado para ello se distribuye de la siguiente forma: Zona de protección (35,32%), rural (61,13%), suburbano (1,60%), y urbano (1,96%).



Uno de los problemas ambientales que se evidencian en el municipio de Barbosa hacen referencia a la contaminación del aire y suelo por la actividad industrial generando residuos que afectan la calidad de los recursos naturales y del medio ambiente.

### 3 GEOLOGÍA

Este capítulo fue elaborado partiendo de la descripción geológica consignada en el Estudio de Microzonificación Sísmica de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, la Estrella, Caldas y Envigado (EMSVA) realizado en 2007 por el AMVA mediante contrato con el Consorcio Microzonificación. Este proyecto obtuvo como resultado, para todo el Valle de Aburrá, una cartografía geológica a escala 1:10.000. A partir de una revisión exhaustiva de este informe, del trabajo de interpretación de imágenes y del control de campo, se logró obtener una síntesis de las unidades geológicas presentes en los diferentes municipios del norte del Valle de Aburrá, se describen los principales rasgos estructurales y la geomorfología que conforma este segmento del Valle. Es importante recalcar que la información geológica representa un insumo fundamental para la realización de cualquier trabajo de exploración hidrogeológica, y que si bien se contó desde el principio con un mapa de detalle (1:10.000), considerando el objetivo específico de identificar unidades hidrogeológicas, se hizo necesario precisar límites y refinar descripciones de características texturales y estructurales. En el Anexo 3.1 se consigna la información levantada en campo a este respecto.

#### 3.1 UNIDADES LITOLÓGICAS

En el municipio de Bello afloran las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, dentro del cual se incluye el Grupo El Retiro con las Anfibolitas de Medellín (TRaM) y los Esquistos Anfibólicos de Baldías (TReaB). Afloran también rocas ígneas como el Complejo Ofiolítico de Aburrá con la unidad de la Dunita de Medellín (JKuM) y las Metabasitas del Picacho (JKmbP) y los intrusivos cretáceos con el Batolito de Ovejas (KtO); finalmente, aparecen los depósitos recientes entre los que se presentan flujos de escombros, lodos y deslizamientos (NQFII, QFIII, QFIV, QFa, Qd), además de depósitos aluviales, aluviotorrenciales y llenos antrópicos (Qal, Qat, QII).

Las unidades geológicas que se definen para el municipio de Copacabana corresponden a las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca con el Grupo El Retiro, representado por las Anfibolitas de Medellín (TRaM) y el Gneis de La Ceja (TRgLC). Dentro de las rocas metamórficas también afloran el Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS). Las rocas ígneas corresponden al Batolito Antioqueño (KcdA) y los denominados Gabros de Copacabana (KgC). Igualmente afloran los depósitos de vertiente (NQFII, QFIII, QFIV, QFa, Qd) y los materiales aluviales y aluviotorrenciales asociados a las corrientes que drenan el municipio y llenos de origen antrópico (Qal, Qat, QII).

Las unidades geológicas que afloran en el municipio de Girardota corresponden a rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, representadas por los Esquistos de Cajamarca (TReC) y el Grupo El Retiro con las Anfibolitas de Medellín (TRaM). Aflora además, haciendo parte de los intrusivos cretáceos las rocas del Batolito Antioqueño (KcdA); también se encuentran los depósitos de vertiente (NQFII, QFIII, QFIV, QFa, Qd) y depósitos aluviales y antrópicos (Qal, Qat, QII).

Para el municipio de Barbosa las unidades geológicas aflorantes corresponden a los Esquistos de Cajamarca (TReC), rocas de contacto denominadas cornubianas que no fueron cartografiadas en EMSVA, (AMVA, 2007), y el Batolito Antioqueño (KcdA).

Igualmente afloran, los depósitos anteriormente mencionados. En la Figura 3.1 se presenta la distribución espacial de éstas unidades litológicas en el norte del Valle de Aburrá.

A continuación se presenta una descripción de cada una de las unidades mencionadas en orden cronológico, acorde con EMSVA.

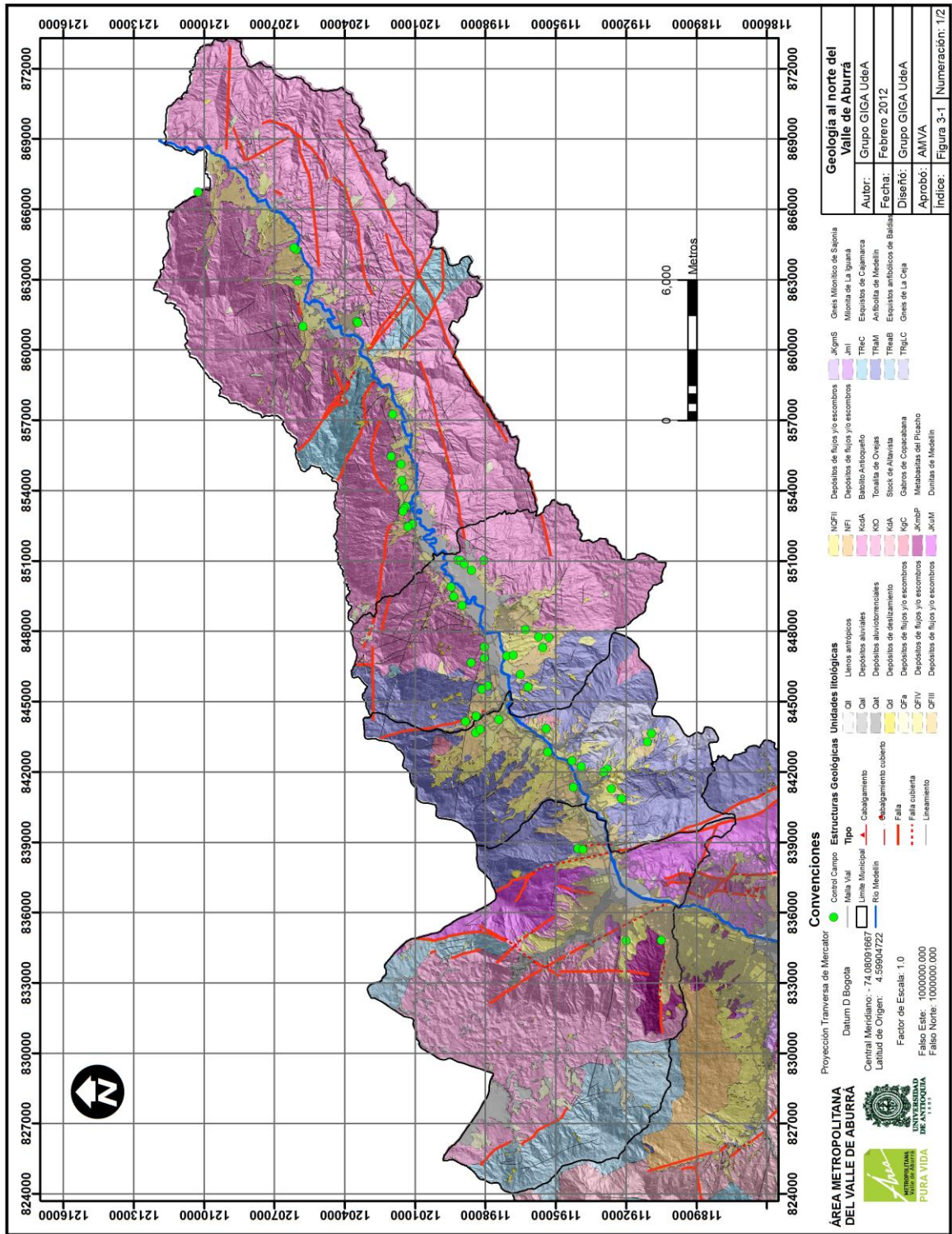


Figura 3.1. Geología al norte del Valle de Aburrá

### 3.1.1 Gneis de La Ceja (PRnLC)

Referenciado en la literatura como el Gneis de Las Peñas hace parte del Grupo El Retiro. En muestra de mano se observa el cuarzo, feldespato y biotita con variaciones a cuarzo, feldespato y anfíbol en cercanías al contacto con la anfibolita. Texturalmente presenta una buena foliación, en roca fresca, y un bandeamiento composicional de lentes de cuarzo y biotita. Localmente se observan algunos pliegues y micropliegues.

En el municipio de Copacabana, estas rocas, corresponden en gran parte con la geoforma de la cuchilla de Las Peñas; afloramientos representativos de esta unidad se encuentran hacia la margen derecha del río Aburrá, en la vía que conduce desde la vereda Cabuyal a la autopista Medellín – Bogotá, en la quebrada El Atajo en la vía que desde el barrio Santo Domingo conduce al municipio de Guarne. Otros afloramientos de menor envergadura se observaron en la vereda El Convento, margen derecha del río y en la vereda La Veta, margen izquierda del río, ambos afloramientos se encuentran como paquetes intercalados de gneis y anfibolita que dadas sus características petrográficas en muestra de mano, se consideran correlacionables con la unidad mayor gneis de La Ceja.

- **Perfil de meteorización**

El perfil de meteorización desarrollado por el Gneis de La Ceja, comprende principalmente los horizontes VI, V, II y I. Los horizontes intermedios III y IV, están pobremente desarrollados, limitados a zonas recientemente expuestas a los procesos de meteorización, en los taludes de corte de las vías, ver Tabla 3.1.

- **Contactos litológicos**

El Gneis de La Ceja se encuentra en contacto con el Batolito Antioqueño y las Anfibolitas de Medellín. El contacto intrusivo con el Batolito se observa en la autopista Medellín – Bogotá, a la altura del estadero La Panocha, algunas evidencias del carácter intrusivo son los abundantes xenolitos de rocas metamórficas en la roca granítica, venas y venillas de roca granítica en el Gneis, y efectos térmicos en ambas rocas.

Con las Anfibolitas de Medellín, los contactos son complejos, en general se observan como paquetes intercalados de ambas unidades, donde se evidencian cambios texturales y composicionales como es la gradación de la anfibolita de textura foliada y composición anfibólica a una textura gnésica, donde la composición es feldespato, cuarzo y anfíboles, lo anterior es seguido por leves cambios composicionales, donde gradualmente aparece biotita y la roca permanece con la textura gnésica, finalmente, el cuerpo de gneis predomina y los paquetes de textura anfibólica son menos frecuentes hasta desaparecer por completo.

En el caso de los cuerpos de gneis, que se observan en las veredas El Convento y La Veta, los cambios texturales y composicionales, descritos anteriormente, se observan como gradaciones de anfibolita a gneis y viceversa, debido a que en estas veredas la anfibolita predomina respecto a los paquetes de gneis y anfibolitas con textura gnésica, se incluyen dentro de las Anfibolitas de Medellín.

**Tabla 3.1. Perfil de meteorización Gneis de La Ceja (PRnLC).**

<b>Horizonte VI</b>	Desarrolla un suelo homogéneo, limo arenoso, con tonalidades rojas pálidas y es fácilmente disgregable. Alcanza espesores de dos metros.
<b>Horizonte V</b>	Su color es rojo a pardo pálido, con granulometría de arena media a fina. Es común observar delgadas bandas y lentes de cuarzo. En este horizonte, el suelo conserva la textura original de la roca, pero es fácilmente disgregable. el espesor máximo observado alcanza 1.5 m.
<b>Horizonte III y IV</b>	Corresponde a rocas masivas, donde la biotita se encuentra alterada y presenta un color rojizo a pardo rojizo y brillo vítreo. Los feldespatos se observan parcialmente alterados generando delgadas bandas de caolín, el cuarzo por su parte constituye bandas bien definidas. el espesor desarrollado por este horizonte no supera los cinco metros
<b>Horizonte II y I</b>	Es una roca bandeada, localmente plegada. El bandeamiento composicional en estado fresco, consiste de bandas negras (biotita) y bandas blancas (cuarzos feldespáticos). Es una roca muy competente.

Fuente: AMVA, 2007.

### 3.1.2 Esquistos Anfibolíticos de Baldías (TReaB)

Hacen parte del Grupo El Retiro, estas rocas presentan un avanzado estado de meteorización, pero alcanzan a definirse esquistos anfibólicos, gneises y anfibolitas en paquetes intercalados con amplia variación textural, cuya mineralogía implica un metamorfismo de medio a alto grado. Las características texturales exhiben un bandeo composicional marcado, con bandas claras de cuarzo y feldespatos y bandas oscuras correspondientes a los ferromagnesianos (biotita). Estas rocas aparecen intruídas por la tonalita del Batolito de Ovejas donde se observa el cambio del saprolito de una roca tipo granitoide a una esquistosa (Correa y Martens 2000).

Este cuerpo corresponde a una franja delgada, que aflora en la vertiente noroccidental del río Aburrá, con dirección N30°W, alcanza unos 34 km de longitud y su amplitud varía desde 9.1 km al sur hasta tres kilómetros al norte, aflora en el municipio de Bello, principalmente en la serranía Las Baldías, en la vereda La Empalizada y en la vía que conduce desde la vereda La Meneses a la vereda La Suiza.

- **Perfil de meteorización**

Estas rocas se encuentran en afloramientos rocosos y es poco frecuente el desarrollo de saprolitos y suelos residuales. Se encontraron los horizontes I y V del perfil de meteorización, ver Tabla 3.2.

- **Contactos litológicos**

El contacto de esta unidad con la anfibolita consiste de intercalaciones, tal como puede observarse en la serranía Las Baldías. El contacto con el Batolito de Ovejas es intrusivo, se muestran intercalaciones, como en la vereda La Empalizada, cerca de las marraneras.

**Tabla 3.2. Perfil de meteorización Esquistos Anfibólicos de Baldías (TReaB).**

<b>Horizonte V</b>	Suelo de color principalmente rojizo, aunque puede presentar variación en el color de gris oscuro y en diversas tonalidades de amarillo, debido al bandeamiento. esta roca alcanza un espesor máximo de 2.5 m.
<b>Horizonte II</b>	Roca de color blanco y gris oscuro, caracterizada por el bandeamiento composicional y tamaño de grano grueso. esta roca alcanza un espesor de 12 m.
<b>Horizonte I</b>	Son esquistos micáceos; en algunas zonas la textura varía de esquistosa a gnéisica, presentando en este último caso un bandeamiento composicional de bandas de cuarzo y biotita intercaladas.

Fuente: AMVA, 2007.

### 3.1.3 Anfibolita de Medellín (TRaM)

Hace parte del Grupo El Retiro, aparece como varios cuerpos de anfibolitas, paragneises, migmatitas y esquistos gráficas y moscovíticos en el Valle de Aburrá. Son unidades de dirección preferencial NW, las cuales afloran desde el municipio de La Ceja al sur, hasta el municipio de Belmira al norte (Correa y Martens, 2000). Son rocas constituidas esencialmente por hornblenda y feldespato, es una roca de grano medio a fino y de formas euhedrales, de textura por lo general isotrópica a bandeada, en ocasiones difícil de diferenciar de un gabro o una diorita; estas rocas han sufrido un metamorfismo de medio a alto grado. A nivel de afloramiento en el Valle de Aburrá, esta roca se encuentra profundamente meteorizada, con desarrollo de suelos residuales con espesores superiores a los 20 m, de carácter limoso, color amarillento a amarillo rojizo predominantemente, aunque en algunas partes presenta alteraciones superficiales que le imprimen una tonalidad verdosa (epidota) y son comunes las huellas de disolución. Estos suelos están cubiertos frecuentemente por los depósitos de vertiente derivados de estas mismas rocas. Es común un cambio gradual a un saprolitolimo-arenoso de color gris verdoso con láminas blancas, el cual presenta estructuras heredadas de la roca parental y donde se define la textura de la roca bandeada. Los afloramientos de los diferentes cuerpos de anfibolita se destacan por una morfología de cerros y pendientes fuertes a moderadas, cortas, con una zona donde la topografía es relativamente plana y las rocas presentan un avanzado estado de meteorización. La roca fresca in situ se observa en la parte alta de las vertientes montañosas escarpadas. Según comunicación verbal con Restrepo (en prensa) la sección tipo de estas anfibolitas estaría en cercanías de la quebrada Santa Elena y debería por tanto retomar este nombre, o sea “Anfibolitas de Santa Elena”.

En el municipio de Bello es un cuerpo de forma alargada orientado en sentido SE-NW que aflora en la vereda La Meneses, sobre la vía principal San Félix - San Pedro y en la vía hacia la serranía Las Baldías. En la vereda La Meneses a la altura de la hacienda Cerezales y sobre la carretera que conduce a Trucheras del Río.

En el municipio de Copacabana, este cuerpo se encuentra aflorando en ambas márgenes del río Aburrá. En la margen norte, desde la vereda Guasimalito y La Veta al occidente, hasta el límite con el municipio de Girardota, localizado en la parte alta de la vertiente montañosa escarpada. La anfibolita se observa con pocas variaciones composicionales, excepto por un afloramiento de roca de composición gabrónica, cuyos límites con la anfibolita no fue posible definir con claridad.



En el municipio de Girardota, los cuerpos de anfíbolita se localizan en ambos márgenes del río. En la margen izquierda, límite con el municipio de Copacabana, veredas Juan Cojo, Manga Arriba y El Totumo, el cuerpo de anfíbolitas se presenta como la unidad predominante. En la margen derecha, también hacia el límite con el municipio de Copacabana y en las partes altas de la vertiente, predominan los cuerpos de anfíbolita. Los afloramientos de mayor importancia se encuentran en: vereda El Totumo, en la vía que conduce a la finca Acacias; vereda Manga Arriba, cerca de la unidad básica; vereda San Esteban, entre el estadero Tres esquinas y la escuela rural San Esteban; vereda La Holanda Parte Alta y en la vía que conduce a los municipios de San Pedro y Don Matías, vereda María Paulina Vélez.

- **Perfil de meteorización**

En Bello no se encontró desarrollo de suelo residual, ni horizonte de meteorización IV. En Copacabana la unidad anfíbolita desarrolla los seis horizontes del perfil de meteorización propuestos por Dearman (1991); sin embargo, son predominantes los horizontes V y VI. En Girardota la unidad anfíbolita ha generado los seis horizontes de meteorización propuestos por Dearman (1991); estos horizontes pocas veces son continuos entre sí, por ejemplo, es común observar sobre un horizonte III o IV el desarrollo de un horizonte VI (ver Tabla 3.3).

- **Contacto litológico**

En el municipio de Bello esta unidad se encuentra limitada hacia el este por el cuerpo de Dunita de Medellín; la bibliografía reporta un contacto fallado, pero dicha relación no fue observada en campo. El contacto con el Batolito de Ovejas presenta una relación intrusiva, sin embargo no fue posible observarla directamente en campo. La relación más cercana entre ambas unidades se describió en la vereda La Meneses a la altura de Trucherías del Río, donde se exhiben ambas unidades limitadas por la quebrada principal.

En inmediaciones de las antenas del Periódico El Colombiano y de la Finca La Luna (vereda Las Huertas), ubicadas en la serranía Baldías, se encontraron pequeños paquetes de anfíbolita dentro de los esquistos. Las evidencias de campo muestran un contacto posiblemente fallado, pero también podría tratarse de pequeños lentes alargados de anfíbolita dentro de los esquistos.

En Copacabana la anfíbolita se encuentra en contacto con el Batolito Antioqueño, los Gabros de Copacabana y el Gneis de La Ceja. La relación con el gabro es de carácter intrusivo, cuyas evidencias se han detectado en la vía que conduce, desde Niquía al respiradero de la hidroeléctrica (vereda La Veta). Con el Gneis de La Ceja se presentan un cambio transicional en el contacto, el cual puede observarse en tres puntos específicos: en la margen izquierda, vereda La Veta, la anfíbolita cambia a un Gneis anfibólico, donde unos metros más adelante el gneis se encuentra con bandas de anfíbol, cuarzo y feldespato, con presencia de augen de cuarzo. En la margen derecha del río Aburrá, en la vía que desde el área urbana comunica con la vereda Cabuyal, los paquetes de gneis se intercalan con la anfíbolita. A la altura de la autopista Medellín – Bogotá, en el sector del Alto de Las Peñas se puede observar igualmente el contacto transicional entre estos dos cuerpos. En la vía que conduce de Santo Domingo a Guarne este contacto se observó como intercalaciones con anfíbolita a la altura del estadero Piedras Blancas. Es probable que la relación entre estos dos cuerpos, sea producto de las discontinuidades propias del protolito sedimentario.

El contacto de los gneises con el Batolito Antioqueño, se encuentra en la autopista Medellín - Bogotá, en el estadero La Panocha, donde se observan en ambas unidades evidencias de metamorfismo térmico, demostrando el carácter intrusivo del Batolito. Es notable también, la presencia de paquetes de gneis con espesores no mayores a cinco metros, a lo largo de diferentes caminos que comunican la zona urbana del municipio con la autopista Medellín-Bogotá, por ejemplo, vereda El Convento y el sector Cuenca Verde.

En Girardota el contacto de esta unidad con el Batolito Antioqueño se observa al norte en la vereda Juan Cojo, a la altura de la finca El Naranjal, donde una serie de cuerpos graníticos intruyen el cuerpo de anfibolita. En la vertiente sur, desde el oeste, límite con el municipio de Barbosa y en dirección este hasta la vereda San Esteban, se observan las rocas graníticas del Batolito Antioqueño; a partir de la vereda San Esteban hacia el límite con el municipio de Copacabana, se observa la anfibolita como unidad predominante. El contacto en esta zona se encuentra como un cambio litológico observado en la vía principal de la vereda San Esteban, entre el estadero Tres Esquinas y la escuela rural San Esteban. Adicional a los cuerpos de anfibolita, se han detectado una serie de diques gabroicos, grueso granulares, donde no se ha establecido su relación con el Batolito Antioqueño. Es decir, no es claro si estas intrusiones básicas corresponden a una fase temprana de cristalización del Batolito o son cuerpos independientes a este.

**Tabla 3.3. Perfil de meteorización Anfibolita de Medellín (TRaM).**

<b>Bello</b>	<b>Horizonte V</b>	Saprolito de textura arcillosa, de color variable entre pardo rojizo y amarillo pálido que le proporcionan al suelo un aspecto moteado cuyo espesor no supera los dos metros en zonas de pendientes moderadas a bajas.
	<b>Horizonte III,II y I</b>	Roca de color gris oscuro y blanco. Se observa la orientación de los minerales. Cuando ocurre en afloramientos que alcanzan hasta los 10 m de espesor se encuentran asociados a relieves montañosos de vertientes largas y de inclinación media. Es más frecuente encontrar estos horizontes en afloramientos de un metro asociados a relieves colinados bajos.
<b>Copacabana</b>	<b>Horizonte VI</b>	La granulometría varía desde limo, limo arcilloso hasta arcilla con diferentes tonalidades de amarillo rojizo y amarillo pardusco. Alcanza espesores hasta de cuatro metros.
	<b>Horizonte V</b>	Es un saprolito de granulometría arcillo limosa. El color característico es gris con motas blancas; donde se conserva la textura original de la roca por efecto de la meteorización del feldespatos. Se observaron espesores que alcanzan tres metros.
	<b>Horizonte IV</b>	Roca masiva, con foliación definida por anfíboles y feldespatos. El feldespatos está altamente alterado formando caolín e imprimiéndole a la roca una coloración blanca, conservando el núcleo de la misma fresco. Sobre las superficies de las diaclasas se han generado patinas de colores rojizos y negro. El máximo espesor observado es de 1,5 m.
	<b>Horizonte III</b>	En este horizonte la roca fresca predomina sobre la roca alterada. Son notables las patinas espesas de color negro y amarillo rojizo que se generan cerca a las discontinuidades de la roca ; este horizonte alcanza unos tres metros en espesor.
	<b>Horizonte II y I</b>	Se localizan generalmente en la parte alta de las vertientes montañosas. En estos horizontes la roca está en estado fresco, son masivas, de color oscuro. Sobre las superficies de los sistemas de diaclasas hay un leve cambio a un color rojizo o negro.
<b>Girardota</b>	<b>Horizonte V</b>	La granulometría en este horizonte varía desde limo hasta suelos arcillosos, con diferentes tonalidades de colores amarillo rojizo y amarillo pardusco. En algunos sectores son comunes las bandas de caolín, debido a la meteorización del feldespatos. La consistencia es moderada y alcanza espesores hasta de cuatro metros
	<b>Horizonte VI</b>	La granulometría consiste de arena fina y variaciones a limo. El color característico es gris con motas blancas; donde la meteorización de los feldespatos en el saprolito permite evidenciar la textura original de la roca. Los espesores de este horizonte alcanzan tres metros.
	<b>Horizonte IV</b>	Consiste en una roca masiva, con foliación definida por anfíboles y feldespatos. El feldespatos está altamente meteorizado formando caolín e imprimiéndole a la roca una apariencia o coloración blanca, conservando el núcleo de la roca fresco y de color gris. Sobre las superficies de las diaclasas se han generado patinas con colores rojizos y negro. El máximo espesor observado es de 1,5 m y en conjunto con el horizonte III puede alcanzar cinco metros.
	<b>Horizonte III</b>	La roca fresca predomina sobre la roca alterada, siendo notables los cambios de color en cercanía a las discontinuidades de la roca, donde se generan patinas espesas de color negro y amarillo rojizo. En algunos afloramientos este horizonte puede alcanzar 2,5 m de espesor.
	<b>Horizonte II y I</b>	Los horizontes I y II, se encuentran en general en la parte alta de las vertientes. En estos horizontes la roca está en estado fresco, es masiva, de color oscuro casi negro. Sobre las superficies delimitadas por los sistemas de diaclasas hay un leve cambio a un color rojizo o negro.

Fuente: AMVA, 2007.

### 3.1.4 Esquistos de Cajamarca (TReC)

Corresponden a esquistos de bajo grado, su composición principal es cuarzosericítica, clorítica y gráfitica. Están relacionados con cuerpos de anfibolitas sin granates y en general conforman topografías escarpadas. Los esquistos cuarzosericíticos presentan variaciones

transicionales a esquistos sericíticos y cuarcitas, pasando estas últimas a esquistos cuarzoscovíticos y cuarzobiotíticos (Patiño y Noreña, 1984). La roca más abundante corresponde a esquistos cuarzosericíticos, que microscópicamente presentan textura foliada, indicada por orientación paralela en láminas micáceas, brillo sedoso sobre superficies defoliación y bandeo composicional de sericita y cuarzo. Estos esquistos muestran un desarrollo disímil de suelo, variando entre material de grano fino y tamaño arena, dependiendo de la cantidad de cuarzo. El perfil de meteorización puede ser variable con un limo arenoso de color pardo rojizo, sin textura en superficie, seguido por un material que conserva la textura original, grafitoso, con abundantes micas pardas y gran cantidad de bloques rocosos frescos. Esta última capa puede tener un espesor cercano a los diez metros.

En el municipio de Girardota, sector el Totumo, en muestra de mano esta unidad corresponde a esquistos micáceos donde el principal mineral constituyente es la mica tipo moscovita que alcanza tamaños de tres a cuatro centímetros. Además aparecen cuerpos de gneis cuarzo-sericíticos, con abundantes micas, donde la textura está definida por lentes de cuarzo. En menor proporción se observan, frente a la finca Villa Isabel, paquetes delgados de esquistos negros. En este sitio, los esquistos negros están fracturados, altamente plegados, son intruídos por diques de cuarzo y se encuentran intercalados con esquistos micáceos y Gneis.

En la vereda María Paulina Vélez, vía a San Pedro, una compleja intercalación de rocas con textura esquistosa y gnéisica están afectadas por zonas de fallas frágil y dúctil. La roca predominante corresponde al gneis, el cual está constituido por cuarzo, y pocas cantidades de micas. Adicionalmente, se observa una roca con textura granítica, equigranular, constituida por hornblenda y feldespato. La presencia de estructuras tipo augen es común y en general las rocas con textura esquistosa siguen la dirección de la cizalla. En estas rocas son comunes algunas intrusiones y diques de cuarzo.

Al este del municipio de Girardota, en sitios puntuales como en la vertiente norte, entre las fincas Villa Isabel y Campo Verde, vereda El Totumo, predominan sobre el cuerpo de anfibolita, intercalaciones de esquistos micáceos y en menor proporción gneis cuarzo micáceo. En la vertiente sur, en la vereda San Esteban a la altura del estadero Tres Esquinas, se encuentra un paquete de gneis, intruído por diques básicos. En esta zona es notable también la presencia de delgados lentes de anfibolita. En la parte alta de la vía que de la vereda Portachuelo conduce al municipio de San Pedro, se observa una serie de paquetes de rocas con texturas gnéisica y esquistosa, además de rocas cuya composición y textura corresponden a un gabro.

La unidad de esquistos se encuentra en el municipio de Barbosa, como una franja alargada que atraviesa la cuenca en dirección N-W. Específicamente, estos esquistos se observan en la vereda La Chorrera; en la vía que conduce a Alejandría; en los límites con San Vicente y Concepción, en las veredas Quintero y Cestillal, Alto de Cestillal.

#### • Perfil de meteorización

Los esquistos micáceos de la vereda El Totumo (Copacabana) desarrollan horizontes de meteorización V y IV. En Barbosa los esquistos desarrollan principalmente los horizontes IV, V y VI, de acuerdo a Dearman (1991). Ver Tabla 3.4.

- **Contacto litológico**

El contacto entre los esquistos y el Batolito es fallado, como puede observarse en el Alto de Cestillal, además se observan efectos de la intrusión previa al evento tectónico que los dispuso en contacto fallado.

**Tabla 3.4. Perfil de meteorización Esquistos De Cajamarca (TRcC).**

Copacabana	Horizonte V	Corresponde a un saprolito con intercalaciones de color gris, amarillo y blanco. Posiblemente debido a intercalaciones del esquisto con anfibolita. Conserva la textura esquistosa y son abundantes las micas. En general desarrolla espesores hasta de un metro.
	Horizonte IV	Esta roca conserva la textura esquistosa son abundantes las micas (moscovitas) que alteradas toman un color rojizo. El color se presenta con intercalaciones rojas y amarillas. Este horizonte puede alcanzar 3.5 m de espesor. Las intercalaciones de gneis y esquisto observadas en la vereda María Paulina Vélez, presentan variaciones en el color entre rojo y amarillo rojizo. Son rocas altamente fracturadas con presencia de milonita y se han clasificado como horizonte IV de perfil de meteorización.
Barbosa	Horizonte VI	Material de granulometría limosa, generalmente se presenta en colores rojizos y cuando los esquistos son muy grafitosos el color es gris plateado oscuro. Una característica distintiva, es la presencia de segregaciones de cuarzo, formando estructuras continuas, sugiriendo la dirección de la foliación. Este horizonte alcanza espesores de hasta dos metros.
	Horizonte V	Este horizonte presenta características similares a las del horizonte VI, pero conservando parte de la textura original de la roca. Puede alcanzar espesores hasta de tres metros.
	Horizonte IV	Los esquistos grafitosos, en este horizonte del perfil de meteorización son de color gris oscuro. En los planos de foliación tiene pátinas de color pardo rojizas. La alteración en los esquistos, puede formar una apariencia abigarrada de colores rojo pardusco, gris oscuro, rojo y negro.

Fuente: AMVA, 2007.

### 3.1.5 Gneis Milonítico de Sajonia (JKgms)

Puede corresponder a esquistos miloníticos formados a partir de gneises y gneises miloníticos, localmente con intercalaciones de anfibolitas deformadas. En Copacabana la roca está intensamente cizallada, deformada, localmente plegada y fallada, y son frecuentes augen de grafito y pequeños poliedros de deformación, se presenta por lo general como un saprolito arcillo-arenoso rico en micas.

Estas rocas presentan una textura gnéisica, caracterizada por un bandeamiento composicional de cuarzo, feldespato y biotita, los cuales al alterarse generan coloraciones rojizas, blancas y amarillas. Es común la presencia de estructuras tipo augen y la presencia de venas de cuarzo lechoso y andesitas porfídicas.

- **Perfil de meteorización**

La meteorización de esta unidad incluye los horizontes III, IV, V y VI, ver Tabla 3.5.

- **Contactos litológicos**

En la literatura se reporta un contacto fallado con la Dunita de Medellín.

**Tabla 3.5. Perfil de meteorización Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS).**

<b>Horizonte VI</b>	Con granulometría arenosa, de color pardo amarilloso. Puede alcanzar cuatro metros de espesor
<b>Horizonte V</b>	Se caracteriza por bandeamiento de colores rojizos, amarillo, gris y pardo; tiene una granulometría arenosa y presenta venas de cuarzo. Las arenas de los augen sobresalen en la matriz más fina permitiendo diferenciar la textura. Puede alcanzar seis metros de espesor
<b>Horizonte IV</b>	Al igual que el horizonte V, presenta bandeamiento de colores rojizos, amarillo, gris y pardo. Puede alcanzar espesores hasta de 15 m
<b>Horizonte III</b>	Tiene las características texturales como estructuras tipo augen y un bandeamiento composicional muy definido. Comúnmente, se encuentra plegado.

Fuente: AMVA, 2007.

### 3.1.6 Dunita de Medellín (JKuM)

Hace parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá, se caracteriza por ser una roca de textura afanítica, de color verde oliva a verde oscuro en estado fresco, que se aclara tomando tonalidades verdosas según su grado de meteorización. Está compuesta predominantemente por olivino, con contenidos menores de cromita y magnetita, además presenta diferentes grados de serpentización. La roca presenta un color negro, verde oscuro o café cuando está meteorizada, se observa un intenso fracturamiento, que se hace más fuerte en las cercanías de las zonas de contacto. La dunita conforma un cuerpo de forma tabular en dirección SE-NW, que se encuentra localizado hacia la parte nororiental del municipio de Bello. La meteorización de estas rocas genera suelos residuales que dependiendo de factores tales como el grado de fracturamiento del macizo, inclinación de la vertiente, geformas presentes y condiciones hidrológicas, presentan condiciones y características muy diversas.

Los afloramientos representativos de esta unidad, en el municipio de Bello, se encuentran localizados, de sur a norte, en la vereda La Meneses en cercanías a las fincas El Onasis, Los Lagos, El Mecateadero La Fondita y la escuela Darío Londoño Cardona, en la vereda Cuartas a la altura de la finca La Pinera, en la vereda Cerezales cerca al sector La Manga de Juan Sierra y en la vereda Quitasol, cerca de la finca Buenavista.

- **Perfil de meteorización**

El perfil de meteorización desarrollado en la dunita en este sector lo constituyen afloramientos rocosos de los horizontes I, II y III, que desarrollan suelos residuales de poco espesor, ver Tabla 3.6.

- **Contacto litológico**

Esta unidad se encuentra limitada hacia el oeste por el cuerpo de Anfibolita y de acuerdo con la literatura, consiste de un contacto fallado, relación no observada en campo en el municipio de Bello. El contacto de este cuerpo con los esquistos se supone fallado, pero tampoco fue observado en campo.

**Tabla 3.6. Perfil de meteorización Dunita de Medellín (JKuM).**

<b>Horizonte VI</b>	El suelo residual asociados a zonas de pendientes moderadas a suaves, se caracteriza por el color pardo rojizo en una textura limosa; son frecuentes los nódulos de hierro. Este horizonte es variable entre 0.3 hasta 1.5m
<b>Horizonte IV</b>	Aparece como núcleos de roca fresca inmersos en una matriz limosa del horizonte VI. Se presentan en espesores que no superan un metro, asociados a las partes altas del relieve colinado que se desprende del cerro Quitasol.
<b>Horizonte II, II, I</b>	Se diferencian entre sí por el grado de serpentinización y fracturamiento que presenten. El color de la roca es negro con alteraciones verdosas, dependiendo del grado de serpentinización. Los espesores no superan 1.5 m de espesor, asociados a la geoforma de cerros (parte alta y media).

Fuente: AMVA, 2007.

### 3.1.7 Metabasitas del Picacho (JKmpP)

Hace parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá, corresponden a metagabros con textura ígnea, gabros miloníticos y anfibolitas de varios tipos asociados a una secuencia de piso oceánico (ofiolita) que incluye las Dunitas de Medellín; dicha secuencia se emplazó sobre el continente y ha sufrido procesos de metamorfismo. Se trata de una unidad que ha sufrido dos eventos metamórficos, uno dinámico y otro regional, sin llegar a convertirse estrictamente en una anfibolita. Son frecuentes los cantos y bloques en los depósitos de vertiente del tipo flujos de escombros y sólo afloran en forma de ventanas erosivas de extensión variable. Estas rocas son de color gris moteado de blanco, con variaciones texturales, desde bandeada con alternancia de franjas claras y orientación de los minerales máficos. Generalmente, tanto las anfibolitas como el metagabro que lo conforman, se encuentran como suelo residual sin conservar estructura alguna de la roca original y como saprolito muy meteorizado. En pocas ocasiones se logra observar la roca en estado fresco. El suelo residual desarrollado por esta unidad de roca es de color variable sobresaliendo el gris claro, ligeramente moteado de blanco, el amarillo y el amarillo rojizo, con una granulometría limo arcillosa.

Afloran en el cerro El Picacho de Medellín y se extienden hasta el municipio de Bello. Aparecen sobre las laderas como cantos y bloques en depósitos de vertiente y algunos depósitos aluviotorrenciales y en forma de ventanas erosivas.

- **Perfil de meteorización**

Se observa como saprolito altamente meteorizado (horizontes IV y V de la Tabla 3.7); en muy pocas ocasiones se logra observar la roca en estado fresco.

- **Contacto litológico**

Las metabasitas se encuentra en contacto intrusivo, en la parte alta de la ladera occidental, con el Batolito de Ovejas y contacto fallado con la Dunita de Medellín, donde presenta una estrecha relación, ya que a lo largo de la zona donde se encontró aflorando, es común encontrar algunas exposiciones superficiales de dunita foliada.

**Tabla 3.7. Perfil de meteorización Metabasitas del Picacho (JKmbP).**

<b>Horizonte VI</b>	Suelo residual, con aproximadamente un metro de espesor.
<b>Horizonte V</b>	Suelo altamente meteorizado, con aproximadamente tres metros de espesor; color gris claro a blanco, textura limosa, consistencia muy baja, de baja plasticidad, cementación débil.
<b>Horizonte IV</b>	Suelo altamente meteorizado, con un espesor de dos metros, color gris claro con variaciones a ocre claro, exhibe una consistencia baja, baja plasticidad y una cementación moderada, se observa la textura de la roca.
<b>Horizonte III</b>	Roca moderadamente meteorizada, de color crema, brillo opaco, composición de plagioclasa, hornblenda, cuarzo segregado. Textura limosa, consistencia firme, baja plasticidad, cementación moderada.

Fuente: AMVA, 2007.

### 3.1.8 Gabros de Copacabana (KgC)

Son cuerpos menores de gabro que pueden variar texturalmente, pasando de gabros a dioritas hornbléndicas y microdioritas. El tamaño del grano varía de fino a grueso con un promedio entre uno y dos milímetros; algunos presentan una ligera foliación posiblemente protoclástica y el eje mayor del cuerpo tiene una dirección paralela al rumbo regional de los cuerpos de anfibolita a los cuales se encuentran intruyendo. La textura predominante es hipidiomórfica granular y la composición es plagioclasa, hornblenda, clinopiroxeno y opacos con cuarzo accesorio en algunas muestras.

Hacen parte de los cuerpos intrusivos cretáceos. Están compuestos por hornblenda y feldespato, donde la longitud mayor de los cristales de hornblenda puede alcanzar tamaños de unos ocho centímetros. La relación hornblenda/feldespato es variable, concentrándose la hornblenda de tal manera que en ocasiones constituye casi el 100% de la roca.

Aflora en ambas márgenes del río Aburrá-Medellín. En la izquierda, aflora en la vereda La Veta, en los taludes de una antigua vía que conduce a la zona de un respiradero de la hidroeléctrica Niquía - La Tasajera. Además, en esta margen del río, en los depósitos del pie de la vertiente, se encuentran bloques con tamaños métricos de gabro. En la margen derecha, algunos afloramientos se pueden observar en la vereda Alvarado, vía al Ancón Norte (municipio de Copacabana).

- **Perfil de meteorización**

En los afloramientos donde fue observado este cuerpo se describen los horizontes I, II y V. En términos generales esta unidad se ha observado en estado fresco, Tabla 3.8.

- **Contacto litológico**

En la vereda La Veta el cuerpo se observa en roca fresca y es posible detectar el carácter intrusivo de este en la anfibolita. El gabro se encuentra rellenando fracturas o en forma de diques en el cuerpo de anfibolita.



**Tabla 3.8. Perfil de meteorización Gabros de Copacabana (KgC).**

<b>Horizonte V</b>	En este horizonte es notable la textura del gabro, con una granulometría limo arcillosa, las coloraciones son blancas y sobresalen las formas tabulares negras de la hornblenda. Puede alcanzar espesores de dos metros.
<b>Horizonte I y II</b>	Estos horizontes, se encuentran en la parte alta de las vertientes montañosas y como bloques que conforman las quebradas de la vereda La Veta. En estos horizontes la roca está fresca, masiva, de color moteado blanco y negro, predominando el color negro de la hornblenda.

Fuente: AMVA, 2007.

### 3.1.9 Batolito de Ovejas (KtO)

Hace parte de los cuerpos intrusivos cretáceos, tiene una extensión de 165 km entre los municipios de Bello y Sopetrán. En el municipio de Bello, corresponde a la unidad litológica más sobresaliente del altiplano y corresponde a una tonalita. El tamaño de grano varía de medio a grueso, la textura es equigranular, compuesta principalmente por cuarzo, plagioclasa, hornblenda y biotita.

Los Afloramientos importantes de esta unidad pueden observarse en: la vía que desde San Pedro conduce al cerro Quitasol, cerca de la finca Santa María de la Cumbre, en la vereda Cerezales cerca a la unidad básica; en la vereda La Empalizada; en la vía principal que desde San Pedro comunica con el corregimiento de Ovejas; en el corregimiento de San Félix; en la vereda Cuartas.

- **Perfil de meteorización**

Algunas características geomorfológicas estables, como es un relieve de altiplano, favorecen el desarrollo de un perfil de meteorización espeso y de horizonte tipo V (saprolito). En la parte alta de la vertiente occidental del Valle de Aburrá, perteneciente al municipio de Bello, en las pendientes altas (superiores a 45°) el perfil de meteorización es me nos espeso, con presencia de horizontes tipo I y II. En contraste, en zonas de menor pendiente, predomina el horizonte V (saprolito arenoso tipo gruss) (ver Tabla 3.9).

- **Contacto litológico**

El contacto con los esquistos es intrusivo y puede observarse a lo largo de la vereda La Empalizada, cerca de las marraneras. Este contacto se encuentra como intercalaciones de ambas unidades. El contacto Anfibolita – Batolito de Ovejas presenta una relación intrusiva, sin embargo, no fue posible observarla directamente en campo.

**Tabla 3.9. Perfil de meteorización Batolito de Ovejas (KtO).**

<b>Horizonte VI</b>	Granulometría de limo a arena fina, de tonalidades amarillosas en la parte superior a tonalidades rojizas en la parte inferior. Las zonas de mayor espesor se encuentran hacia la cima de las colinas, aunque no supera los 1,5 m.
<b>Horizonte V</b>	Saprolito arenoso, color moteado entre amarillo, blanco y rojizo con alto contenido de cuarzo y micas. Ocupa un espesor superior a los 10 metros en relieves colinados. Hacia la base de estas colinas cerca del cauce de los drenajes, el horizonte V es muy arenoso color blanco y negro, desarrollando un gruss.
<b>Horizonte IV</b>	Roca moderadamente alterada, color blanco y negro, se observa hacia la parte baja de la vertiente de las colinas, con espesores que alcanzan cuatro metros.
<b>Horizonte I</b>	Roca fresca, se presenta únicamente en zonas escarpadas de la parte alta de la vertiente occidental del Valle de Aburrá. Afloramientos de más de 10 metros de espesor.

Fuente: AMVA, 2007.

### 3.1.10 Batolito Antioqueño (KcdA)

Este cuerpo que está localizado en la parte central del departamento de Antioquia, es el más grande y septentrional en la cordillera Central, aflora en un área de 7 221 Km<sup>2</sup> (Feininger y Botero, 1982). Ingeominas (2001) describe la forma del Batolito como trapezoidal; Feininger y Botero (1982) describen el piso del batolito como una superficie planar, quebrada en algunos lugares por intrusiones de fallas regionales. El contacto con rocas metamórficas regionales es discordante y tajante, generalmente intrusivo con desarrollo de aureolas de contacto, excepto con la anfibolita donde han tenido lugar algunas mezclas (Feininger y Botero, 1982).

Corresponde a intrusivos cretáceos, estas rocas en muestra de mano dejan ver una mineralogía de cuarzo, biotita, plagioclasa y anfíboles. La composición de esta unidad es bastante homogénea. En términos generales, la textura de las rocas es fanerítica y equigranular, con tamaño de grano principalmente medio a grueso.

También se pueden observar variaciones en la composición de la unidad debido a la presencia de autolitos, xenolitos y diques de cuarzo. Los autolitos son rocas finogranulares, de color negro a verde muy oscuro. Los cuales se observaron en diversos afloramientos de la margen izquierda del río, ver Foto 3.1. En la vereda Loma de Los Ochoa, se observan una serie de xenolitos de forma alargada, los cuales presentan una textura porfídica. En los horizontes I, II y III, la roca relativamente fresca permite detectar diques de cuarzo de diferentes espesores, los cuales son comunes.



Foto 3.1. Autolitos presentes en el batolito antioqueño, vereda El Paraíso.

Aflora en el sector oriental del municipio de Copacabana, los afloramientos de mayor importancia se observan en la autopista Medellín – Bogotá, a la altura de las veredas Quebrada Arriba y Montanuela y en la vía que conduce del barrio Santo Domingo al municipio de Guarne.

Si bien el Batolito Antioqueño, se encuentra usualmente cubierto por depósitos hacia la parte baja de la vertiente, es la unidad que cubre mayor área en el municipio de Girardota. Los afloramientos importantes de la vertiente sur del río, se ubican en: la vereda Potrerito, cerca de la unidad básica, donde las biotitas presentan cierta orientación; la vía que conduce de la autopista norte a la vereda El Chiquero, roca fresca; la vereda La Calle, donde se observa la unidad en diferentes horizontes de meteorización; la vereda La Matica parte baja y el sector Los Gallego, donde se observó cómo suelos residuales y saprolitos (horizontes V y VI); la Loma de Los Ochoa, donde se puede observar en algunos taludes de la vía, de espesor considerable, los diferentes horizontes de meteorización, predominando las rocas frescas (horizontes I y II) en la parte alta de la vertiente y los saprolitos o suelos residuales en la parte baja de la misma; en la vereda La Matica Parte Alta, se observan múltiples autolitos en forma alargada, los cuales pueden ocupar más del 40 % de la roca; por último, en las veredas San Esteban y La Mata, las biotitas presentan una leve orientación. En la vertiente norte, los afloramientos importantes se encuentran en la vereda El Barro, donde se observa la roca fresca sobre el cauce de la quebrada El Salado y en la vereda Manga Arriba y Juan Cojo, en las cuales predominan los saprolitos y suelos residuales.

- **Perfil de meteorización**

En el municipio de Copacabana los cuerpos que afloran del Batolito Antioqueño se clasifican en los horizontes I, II y III del perfil de meteorización, los horizontes I y II corresponden con rocas de textura granítica, con leves decoloraciones cerca de las zonas fracturadas o diaclasadas. Mientras que en el horizonte III, se presentan núcleos de roca no alterados y una meteorización avanzada en los planos de diaclasamiento. Los niveles IV, V y VI, los más superficiales son los menos potentes y afloran ocasionalmente en algunos sectores de la Autopista Medellín - Bogotá y en la vía al Hatillo. En el municipio de Girardota el perfil de meteorización tiene variaciones en las características de los horizontes, algunas de ellas influenciadas por la presencia de autolitos, diques y cambios texturales y composicionales del Batolito Antioqueño. Las dimensiones de esta unidad permiten desarrollar perfiles de meteorización diversos y profundos, donde predominan los horizontes I, II, V y VI. Entre los horizontes intermedios III y IV, la meteorización esferoidal no permite hacer una clara diferenciación entre ambos. Lo anterior, debido a la dificultad para establecer el porcentaje aproximado de roca fresca, respecto a la meteorizada (ver Tabla 3.10).

- **Contacto litológico**

El contacto con el Gneis de La Ceja es de carácter intrusivo, y se observa sobre la autopista Medellín – Bogotá a la altura del estadero La Panocha.

En Girardota el Batolito Antioqueño se encuentra en contacto, en su límite este, con las anfibolitas, el contacto se ha interpretado como una intrusión del Batolito Antioqueño en la anfibolita. En la vertiente norte del municipio, vereda Juan Cojo, cercanías a la finca El Naranjal se observó un contacto tajante entre saprolitos de anfibolita y cuarzdiorita. En esta vereda, el contacto se encuentra como paquetes intercalados de ambas unidades. En

la vertiente sur, este contacto no es tan claro, ya que se observa sólo como un cambio litológico neto. En la vereda San Esteban, entre la escuela rural San Esteban y el estadero Tres Esquinas se observa un paquete de anfibolitas, cuyo contacto con el Batolito Antioqueño está cubierto.

**Tabla 3.10. Perfil de meteorización Batolito Antioqueño (KcdA).**

<b>Copacabana</b>	<b>Horizonte III</b>	En este horizonte el batolito está bastante fracturado, donde las diaclasas y las discontinuidades aceleran el proceso de meteorización de la roca. Es así como se desarrolla la meteorización esferoidal, generando bloques redondeados y frescos de roca, embebidos en material saprolítico. El diámetro de los bloques frescos es bastante variable pues este se encuentra controlado por la distancia entre diaclasas o discontinuidades.
	<b>Horizonte II y I</b>	Corresponde a los afloramientos de roca fresca, la cual no ha sido afectada o presenta un leve diaclasamiento. Algunos afloramientos con estas características se observan en la autopista Medellín – Bogotá.
<b>Girardota</b>	<b>Horizonte VI</b>	En esta región del valle, los suelos residuales del Batolito Antioqueño presentan dos colores característicos: rojo y amarillo. En ocasiones, ambos colores se entremezclan en un solo horizonte, dando un aspecto abigarrado, característica típica en suelos residuales de rocas graníticas. En suelos más evolucionados, estos colores se encuentran diferenciados en dos horizontes VI, donde el suelo residual de color amarillo suprayace el suelo residual de color rojo. La granulometría del horizonte VI varía entre arcillo arenoso y limo arenoso, con presencia frecuente de granos de cuarzo y micas tamaño grava. Estos suelos residuales pueden alcanzar espesores de hasta 2.5 m.
	<b>Horizonte V</b>	Consiste de un saprolito, deleznable que conserva la textura granítica de la roca. Las variaciones en el color del saprolito, tienen relación con la composición mineralógica. Es decir, en rocas más ácidas, cuando la presencia de feldespato y cuarzo es mayor, el horizonte V desarrolla gruss, de color blanco a pardo claro y de granulometría arenosa. Cuando hay mayor presencia de hornblendas y biotitas, el horizonte V es moteado, de colores: rojizos, blanco y parduscos, por efecto de la oxidación de las biotitas y hornblendas; en este caso la granulometría es limosa, con ocurrencia esporádica de granos de cuarzo tamaño arena.
	<b>Horizonte IV y III</b>	El Batolito Antioqueño está bastante fracturado y es común la presencia de diques aplíticos. Tanto las diaclasas como las discontinuidades generadas por los diques crean superficies que aceleran el proceso de meteorización de la roca. Es así como entre los horizontes IV y III se observan bloques frescos de roca, embebidos en material saprolítico. El diámetro de los bloques frescos es bastante variable pues este se encuentra controlado por la distancia entre diaclasas o discontinuidades. El alto grado de fracturamiento en rocas graníticas, favorece la meteorización esferoidal, muy común en los afloramientos de las veredas La Aguada, la Meseta y Encenillos.
	<b>Horizonte II y I</b>	Corresponde a los afloramientos donde la roca fresca no ha sido afectada o presenta un leve diaclasamiento. Algunos afloramientos con estas características se observan en la vía a la vereda El Chiquero, en La Mata donde el espesor máximo observable es de cuatro metros.

Fuente: AMVA, 2007.

### 3.1.11 Cornubiana

Es una roca de tamaño de grano arena fina a limo, muy resistente al golpe, de fractura concoidea y que genera salientes agudas propias de una roca silíceas; superficialmente, presenta una textura escamosa. En esta roca, que ha sufrido metamorfismo térmico, puede observarse una pérdida de la estructura bandeada, relictas de un protolito sedimentario, por una textura masiva rica en sílice.

A nivel de perfil, la roca in situ presenta una meteorización física, generando bloques de espesor que varía desde 50 cm a dimensiones métricas embebidos en material de arena

cuarzosa. En estado fresco, consiste de una roca muy compacta que parte por planos muy bien definidos. En estado alterado, es característico la presencia de un bandeamiento (posiblemente una estructura reliquia sedimentaria). A medida que aumenta el grado de meteorización de esta roca, se hace más evidente el bandeamiento, permitiendo resaltar las bandas de material más competente.

Esta unidad se encuentra formando un cuerpo pequeño que se ubica en la parte noreste del municipio de Barbosa. Los afloramientos de esta roca se observan en la vereda Los Arrayanes, donde las canteras antiguas y abandonadas permiten ver la roca aflorando en taludes con espesores de hasta 15 m.

En las veredas Monte Redondo y Yarumito, los bloques de cornubiana y Batolito Antioqueño, conforman el principal componente de los depósitos. Los bloques de cornubiana son de gran tamaño, angulosos y se encuentran en diferentes grados de meteorización.

En la vía que conduce a Don Matías, cerca del Alto de Matasano, a una altura 1.852 m.s.n.m., se encuentra la cornubiana de color gris oscuro y de textura masiva.

- **Perfil de meteorización**

Esta roca se encuentra en la zona desarrollando los horizontes I, II, III y IV. Cuando el bandeamiento es muy marcado, la meteorización procede más intensamente en las bandas menos competentes, generando una especie de estratificación diferencial (ver Tabla 3.11).

- **Contactos litológicos**

La misma definición de cornubiana, está indicando un contacto intrusivo, el cual genera en esta unidad litológica una recristalización y endurecimiento de la roca.

**Tabla 3.11. Perfil de meteorización Cornubiana.**

<b>Horizonte IV</b>	Es una roca muy masiva con partición siguiendo una tendencia laminar. Es de color gris de varias tonalidades cuando está fresca y blanco en las zonas más meteorizadas alcanza 12 m de espesor.
<b>Horizontes III, II, I</b>	Cuando la roca es muy masiva (el bandeamiento relicto no se observa), ésta es de color gris oscuro. En las rocas que conservan bandeamiento, es de color gris claro con bandas vino tinto de la biotita térmica.

Fuente: AMVA, 2007.

### 3.1.12 Depósitos de vertiente (Qd, QFIV, QFIII, NQFII)

Bajo esta denominación de depósitos no litificados se incluyen los deslizamientos y los flujos de escombros y/o lodos que por su extensión permiten ser cartografiados. Por sus espesores y grado de madurez son cartografiados como unidades geológicas independientes y no como formaciones superficiales. La edad de estos depósitos es variable, no obstante las características de altura, consolidación, madurez, pendiente y grado de incisión, permiten hacer relaciones crono estratigráficas entre ellos, y, en el caso de los flujos, agruparlos en series de eventos.

Dentro de los flujos de escombros y/o lodos, se identificaron al menos cuatro series de eventos de depositación relacionados con depósitos de vertiente, los cuales corresponden, desde el más antiguo al más reciente, a NQFII, QFIII, QFIV y QFa. Estos depósitos presentan un arreglo escalonado o telescópico, donde los más antiguos están localizados hacia la parte media y alta de la ladera y los más jóvenes se localizan hacia la base de la vertiente (Rendón et al. 2006). La caracterización geomorfológica de los materiales que componen los depósitos de vertiente se basó en parámetros como rango de alturas de afloramiento, pendiente promedio de la superficie de depositación, profundidad y grado de incisión de dicha superficie y la coincidencia entre el actual patrón de drenaje y las geoformas de los depósitos (Rendón et al. 2006). Las relaciones crono estratigráficas tuvieron en cuenta, adicional a los parámetros ya mencionados, marcadores estratigráficos como paleosuelos y tefras, donde se determinaron edades máximas de depositación con base en las dataciones de circones volcánicos con edades que alcanzan hasta el Plioceno Tardío (Rendón et al. 2006).

### **3.1.12.1 Depósitos de deslizamiento**

El relieve escarpado de la serranía Las Baldías, y del escarpe correspondiente a la vertiente occidental del Valle de Aburrá, favorecen los depósitos de vertiente, tales como los depósitos tipo deslizamiento. Ejemplo de estos depósitos pueden observarse en el municipio de Bello en la vía a la marranera, vereda La Empalizada. Estos depósitos se caracterizan por material mal seleccionado en tamaño y forma, con una distribución caótica dentro de una matriz arenosa.

Los desgarres superficiales y los deslizamientos son muy comunes en los taludes de las vías, en las vertientes de las quebradas y ocasionalmente a media ladera. Son comunes en el Batolito Antioqueño, especialmente cuando predomina el horizonte V, gruss, del perfil de meteorización. Algunos de estos desgarres pueden observarse en Barbosa, en la vía a Concepción y Alejandría, en la vereda Yarumito, en la margen derecha de la quebrada El Guayabo, se observan desgarres y deslizamientos activos. En Girardota, este tipo de depósitos no es muy frecuente y por lo tanto constituyen depósitos de pequeñas dimensiones, confinados a algunas vertientes de alta pendiente.

### **3.1.12.2 Depósitos de flujo**

Aparecen localizados hacia la parte baja, en límites con el río Aburrá-Medellín. Están conformados por bloques rocosos que van desde sanos hasta intensamente meteorizados; con una matriz arcillo limosa o limo arcillosa, en colores claros como pardo, gris y amarillo. Su génesis se encuentra asociada a la desestabilización de las vertiente afectadas por el fracturamiento múltiple de estas rocas, además de eventos sísmicos y alta pluviosidad, factores que ayudaron a movilizar los niveles saprolíticos de las rocas hacia la parte inferior de las vertientes.

En estos flujos se asientan varias de las unidades residenciales del sector de Niquía, en Bello.

En el municipio de Copacabana se localizan sobre las vertientes montañosas, presentando una continuidad desde la parte alta hasta la base de la vertiente; ejemplo de estos flujos con formas de abanicos se localizan en ambas márgenes del río Aburrá-Medellín, en las

veredas La Veta y El Noral, sector La Pitaya, margen izquierda del río, y en la vereda Ancón y en la zona urbana del municipio hacia la margen derecha del río Aburrá-Medellín.

En la margen izquierda del río, depósitos de flujo cubren toda la ladera occidental del municipio. Acorde a la geomorfología de estos depósitos, se relacionan a un único abanico, continuo, cuya parte proximal se ubica en el segmento alto de la vereda La Veta y su parte distal está limitada por terrazas aluviales del río Aburrá-Medellín. Las características de este depósito se observan en las veredas El Zarzal, El Curazao, La Luz, El Noral, sector La Pitaya y Las Margaritas.

El municipio está localizado sobre un gran flujo que en la parte distal corresponde a un flujo de lodos de un metro de espesor visible. Los bloques de este depósito (observado en los barrios El Tablazo y Canoas) varían entre 20- 40 %, todos meteorizados, compuestos por esquistos y anfibolita. Los clastos son angulosos - subangulosos y no superan los 20 cm de diámetro, los cuales se encuentran embebidos en una matriz amarilla de carácter arcillo limosa.

En el municipio de Girardota se relacionan a abanicos ubicados en las veredas San Andrés y La Calle; en este sector se observan diferentes eventos de depositación, los cuales presentan una matriz con granulometría arenosa de color amarillo pálido a pardo. El porcentaje de bloques es variable. La geoforma de lomos alargados, de la vertiente norte y la vertiente sur de la cuenca, está modelada en diferentes tipos de material. En la vertiente norte, los lomos están modelados en depósitos más maduros y en la vertiente sur están modelados tanto en depósitos maduros como en perfil de meteorización de Batolito y de Anfibolita.

En el municipio de Barbosa, estos depósitos tienen características muy variadas dependiendo de la zona donde se encuentren, en el casco urbano del municipio, el flujo es desde clasto-soportado (con clastos completamente meteorizados) a matriz-soportado. El alto grado de madurez de los depósitos impide identificar, en algunas zonas, si se trata de un horizonte VI, de un depósito, o si es un flujo de lodos compuesto preferentemente por material arcilloso.

El Valle del río Aburrá-Medellín en Barbosa, presenta una densa cobertura de depósitos al norte, desde la quebrada Aguas Frías y La Calda, hasta la quebrada Cinco Riales. En este sector el valle es muy amplio, con una extensa cobertura de flujos de escombros y lodos en la base de la vertiente montañosa occidental, la cual desplaza el cauce del río Aburrá-Medellín contra los relieves colinados y lomos bajos de la vertiente montañosa oriental del valle. Estos flujos de la vertiente occidental han sepultado o circundado, relieves de colinas saprolíticas bajas.

La zona urbana del municipio de Barbosa se ubica en un abanico de grandes dimensiones modelado en flujos de lodos. Este abanico se encuentra circundado por el perfil de meteorización de la cuarzodiorita del Batolito Antioqueño y es incidado por quebradas como La López, El Niño y La Manera. Estos drenajes, de dirección SE-NW, generan una serie de depósitos aluviotorrenciales, asociados a pequeños abanicos, que se superponen a los flujos de lodos ya mencionados. Los abanicos de mayor tamaño se encuentran hacia la parte baja de las quebradas La Calda, El Guayabo, La Chicagua y Cinco Riales, distribuidos en una extensa zona de acumulación de depósitos de flujos de escombros y lodos. Ejemplo

de esto puede observarse hacia el sector de Popalito donde los flujos de lodo tienen 10 – 15% de bloques de roca, principalmente de cuarzodiorita, en una matriz de textura arenosa, con alta presencia de granos de cuarzo; y depósitos de flujo de escombros con una relación de bloques matriz de 50:50, compuestos en su mayoría por bloques de cuarzodiorita y diorita.

El depósito de flujo del sector Yarumito, se encuentra ubicado en la parcelación el Yarumito, limitado geográficamente por la quebrada El Guayabo y la quebrada Guayabo (Cestillal) - Guayabo (Carmonita). Está compuesto por bloques entre 20-40 % (con diferentes grados de madurez), embebidos en matriz limosa de color rojo a pardo. Los clastos están compuestos por rocas del Batolito Antioqueño y cornubianas cuyo protolito se presume metamórfico. Sobre estos depósitos se modelan una serie de lomos largos que se desprenden de la vertiente montañosa, hasta llegar al cauce del río Aburrá-Medellín, donde terminan. Estos flujos se superponen a paleo relieves, modelados en saprolito, llenando las paleo concavidades. En ocasiones, las colinas modeladas en el perfil de meteorización sobresalen por encima de los flujos, tal y como ocurre en el sector más nor-oriental de la vereda El Noral. La superposición de depósitos de flujo sobre paleorrelieve, modelado en perfil de meteorización y el grado de incisión, desarrollan colinas modeladas tanto en depósitos como en perfil de meteorización.

El depósito de flujo en las cercanías a Papelsa, vertiente sur del río Aburrá-Medellín se encuentra limitado en la vertiente oriental por la quebrada Dosquebradas y en la vertiente occidental por la quebrada Vallecitos. En esta zona la inclinación de la vertiente es suave, correspondiente con un flujo de lodos de matriz pardo rojiza, limosa, que alcanza espesores de hasta cinco metros.

Los depósitos de flujo en la vereda La Chapa, sobre la vía que conduce de Barbosa a Concepción en la vereda La Chapa, gran parte de la infraestructura se ha construido sobre un depósito de flujo de grandes dimensiones. Presenta una matriz de granulometría limosa, de color pardo oscuro por efecto de la incorporación de materia orgánica; los clastos no superan los 10 cm de diámetro, pueden estar presentes hasta en un 50 %, están frescos, son desde subangulosos a subredondeados y están compuestos por roca del Batolito Antioqueño. La geoforma asociada a este depósito constituye un abanico de pendiente suave, sobre la cual reposan bolas de roca del Batolito Antioqueño, las cuales son residuales de la meteorización esferoidal. Pueden alcanzar diámetros hasta de tres metros y provienen de las partes altas de la vertiente montañosa.

Los depósitos en el sector de la vereda Popalito son flujos de lodo con un porcentaje de bloques entre 15-40 %, usualmente en estado fresco, con clastos de formas angulares a subangulares, embebidos en matriz arenosa de color pardo a rojo. La composición de los clastos es principalmente cuarzodiorita.

### **3.1.12.3 Depósitos de flujos antiguos**

En el municipio de Copacabana afloran en la vereda El Noral, el afloramiento más representativo se localiza sobre la Autopista Norte, a la altura de la división hacia la vereda El Noral. En un segundo afloramiento, cerca de la quebrada La Pitaya, se observan horizontes meteorizados (horizontes V y VI, según Dearman, 1991) de un depósito de flujo. Este depósito está conformado por bloques heterogéneos, los cuales se observan como



bloques “fantasmas” con diámetros desde pocos centímetros hasta unos dos metros. Los bloques de diámetros menores aún conservan la textura de rocas metamórficas (se observan foliados) y están embebidos en una matriz de granulometría limosa de color amarillo muy pálido. En el caso de los bloques de tamaños métricos se observa la ocurrencia de diferentes venas que se cruzan entre sí y presentan diferencias en sus colores entre blanco y amarillo pálido. Los bloques meteorizados de mayor tamaño, han generado un saprolito limo arcilloso y conservan una textura granítica. Como dato importante, se resalta la presencia de planos y estructuras tipo augen, correlacionable con una zona de falla.

A partir de trabajo de campo se lograron describir algunos depósitos correspondientes a NQFII Y QFIII. En la vereda el Zarzal, al frente de la finca Los Guayabos, se observa un afloramiento de QFII, cuyos bloques son predominantemente subangulosos embebidos en una matriz limoarcillosa color amarillo-rojizo, no presenta gradación, los bloques menos meteorizados corresponden a anfíbolitas (ver Foto 3.2). Por la entrada a la vereda el Noral, se observa un afloramiento de NQFII, el cual posee bloques de orden centimétrico a métrico meteorizados, los cuales desarrollan una textura areno-limosa, son angulosos, principalmente conformados por anfíbolita, se aprecian concentraciones de color blanco (feldespatos alterados) en forma de líneas bien demarcadas(ver Foto 3.3).

En Girardota constituyen las capas basales de los perfiles, presentan en promedio 40% de bloques en estado fresco, compuestos por cuarzodiorita y esquisto. El diámetro mayor de los bloques alcanza un metro, pero predominan diámetros entre 60 y 80 cm. Los depósitos más recientes, ubicados hacia el techo del perfil, suelen involucrar materia orgánica. Estos últimos se caracterizan por presentar un porcentaje de bloques menor 10 %, frescos, con formas subredondeadas a subangulosas, diámetros hasta de 15 cm, embebidos en una matriz arenosa, de color pardo. Este tipo de flujo se presenta en las siguientes localidades: Vereda La Matica, sector Los Gallego, allí los flujos son esencialmente de lodos, presentan variaciones considerables en el porcentaje, tamaño de bloques y en el color y granulometría de la matriz. Se han observado espesores de hasta dos metros. El porcentaje de los bloques varía entre cinco y 40 %, presentan formas angulosas a subangulosas y diámetros de 1 a 40 cm (el grado de selección es muy variable en cada uno de los afloramientos). La matriz es limo arenosa a areno limosa con una amplia variedad de colores rojo amarilloso, rojo, pardo y pardo grisáceo.



Foto 3.2. Afloramiento de QFII, vereda El Zarzal.



Foto 3.3. Afloramiento de NQFII, vereda El Noral.

En la Parcelación El Limonar, veredas Portachuelo y La Holanda; se observan dos grandes depósitos, un flujo de lodos a la base y un flujo de escombros hacia superficie. Tanto el flujo de lodos como el flujo de escombros, presentan variaciones en el porcentaje y el diámetro de bloques. La composición del flujo de escombros es predominantemente anfíbolita, con formas angulosas a subangulosas y diámetros hasta de 80 cm; la matriz es limosa ocasionalmente con fracción de grava de color amarillo a pardo.

### 3.1.12.4 Depósitos de flujos recientes

En el municipio de Copacabana están constituidos por flujos de escombros y lodos. Los bloques en estos depósitos corresponden a rocas frescas cuya composición es predominantemente anfíbolita y gabro cuyos cristales de hornblenda alcanzan tamaños de hasta cinco centímetros de longitud. El porcentaje de bloques es variable desde 10 hasta 70 %; son de formas angulares y subangulares con diámetros desde pocos centímetros hasta tamaños métricos.

En Girardota, sobre la autopista norte, desde el límite con el municipio de Copacabana y en cercanías al corregimiento del Hatillo, se encuentran una serie de cortes del talud, realizados en la parte baja de algunos lomos alargados. Los taludes realizados sobre estos lomos, que descienden desde la parte media-baja de la vertiente en dirección al río, permiten observar depósitos de flujo homogéneos, los cuales alcanzan hasta unos cinco metros de espesor visible, compuestos por bloques en diferentes estados de meteorización, 10 % en estado fresco, 10 % meteorizados, con formas subredondeadas, compuestos por cuarzodiorita, esquistos y cuarzo y con diámetros que alcanzan hasta 15 cm, embebidos en una matriz limosa de color rojo.

En la vertiente sur, se observan características muy similares a las descritas en la vertiente norte. En este sector, los depósitos de flujo están también relacionados a geoformas de abanico, cuyas dimensiones son mayores a las dimensiones de los abanicos de la vertiente norte. Algunos de los que mayor continuidad presentan están localizados en: Veredas El Totumo, Manga Arriba y Juan Cojo: corresponde a la geoforma de un abanico, conformado por diferentes eventos de depósitos de flujo. Estos depósitos se caracterizan por la presencia de bloques de anfíbolita, con variedad de diámetros desde uno hasta 1,5 m, generalmente frescos, con formas subredondeadas a subangulosas y envueltos en una matriz de color amarillo-pardo, cuya granulometría es limosa con algunos fragmentos de arena y grava.

En la Vereda El Barro los bloques involucrados en estos depósitos son de anfíbolita y cuarzodiorita, presentan formas subangulosas y el porcentaje de bloques es relativamente bajo, consiguiendo alcanzar valores de 40 %, la matriz es limosa de color variable entre amarillo-pardo y pardo.

A partir de trabajo de campo se lograron describir algunos depósitos correspondientes a QFIV, tanto en el municipio de Barbosa, sector Hatillo, como en Girardota, en toda la troncal. Los depósitos están conformado por cantos y bloques con diferente grado de meteorización, de tamaño centimétrico, subangulosos a subredondeados, en matriz limo arenosa color amarillo rojiza (ver Foto 3.4).



**Foto 3.4. Afloramiento QFVI, cerca al Hatillo.**

### **3.1.13 Depósitos aluviales (Qal, Qat)**

Corresponden a los depósitos del fondo del Valle generados por el río Aburrá-Medellín y algunos de sus afluentes principales. Se reconocen por generar una morfología relativamente suave, dispuestos en franjas irregulares siguiendo la trayectoria de las corrientes, ver Foto 3.5; pueden ser del tipo aluviales o envolver una mayor dinámica de las corrientes y entonces se definen como aluviotorrenciales.



**Foto 3.5. Depósitos aluviales asociados al río Aburrá.**

En Bello, estos depósitos están constituidos por diversos materiales, que incluyen arcillas, limos, arenas, gravas gruesas y fragmentos rocosos heterogéneos composicionalmente estratificados con continuidad horizontal variable, formando abanicos, terrazas y llanuras aluviales. Los paquetes de gravas contienen fragmentos redondeados y subesféricos de cuarzo, diorita, gneis, anfibolita, esquisto, basaltos, dunitas, y cuarzodioritas, entre otros.

En Copacabana presentan una buena selección, los clastos son predominantemente subredondeados y la tendencia es a ser clasto-soportados.

En Girardota se caracterizan por desarrollar espesores de 1,5 cm, clastos presentes en un 30 %, frescos, de formas subredondeada a redondeada. En los bloques se identifican bloques de anfibolita, cuarzodiorita, rocas verdes, embebidos en una matriz de arena media con color pardo pálido.

En Barbosa se presentan en las llanuras de inundación, como materiales de desborde; y en terrazas aluviales de diferentes niveles. Los depósitos asociados a estas zonas aluviales se caracterizan por presentar una ligera imbricación, selección moderada y alto grado de redondez de los bloques, que los diferencia de los depósitos aluviotorrenciales. En la parte más norte del municipio, también se presentan colinas modeladas en depósitos aluviales de antiguos afluentes del río Aburrá-Medellín. Si bien, actualmente están asociados a un relieve colinado, producto de la incisión, probablemente su geoforma inicial pudo corresponder a abanicos de origen aluviotorrencial. Estos depósitos se caracterizan por ser moderadamente seleccionados, con clastos subangulosos a subredondeados, compuestos por cuarzo, cuarzodiorita y esquisto embebidos dentro de una matriz areno limosa, de color amarillo pálido.

### **3.1.13.1 Depósitos aluviotorrenciales (Qat)**

En Bello corresponden a los depósitos formados en los valles de quebradas como La García, La Señorita, La Loca, entre otras, tienen una forma alargada y de abanicos, ocupando partes medias de las vertientes y en las partes bajas las zonas de baja pendiente. Estas unidades son el producto de eventos erosivos ocurridos en épocas y periodos de alta pluviosidad que han generado avenidas torrenciales de diferente magnitud, depositando materiales con una gran diversidad en litología, tamaño, forma y espesores. Se caracterizan por una depositación sin estratificación o selección en los materiales transportados. La forma varía desde clastos subredondeados a redondeados, tamaños desde métricos, embebidos en una matriz areno gravosa, de color gris, consistencia dura, no plástica. Por lo general las partes bajas están más húmedas y secas en las partes altas. Debido a su alta permeabilidad, exhiben un grado de meteorización moderado, actualmente son disectados por las corrientes.

En Copacabana los depósitos aluviotorrenciales varían en la cantidad de clastos entre un 90-50 %, dependiendo de la capacidad de transporte de cada quebrada. En general los bloques presentan mala selección, con diámetros que varían desde centímetros hasta más de dos metros. La forma de los clastos es subangulosa - subredondeada y la composición predominante es anfibolita. La matriz es de textura limosa, de color pardo.

En Girardota algunos de estos depósitos se ubican en: Vereda Mercedes Ábrego, cerca de la tienda “Don Roberto”, de espesores visibles de dos metros. Los bloques están presentes

en un 60 % donde 40 % son frescos y 20 % meteorizados, tienen formas subangulosas a subredondeadas con diámetros de uno a 20 cm; embebidos en una matriz arenosa de color pardo de consistencia débil.

Vereda El Totumo, frente a la finca La Pradera; tiene un espesor visible de 2,5 m con un 85 % de bloques en estado fresco, compuestos de anfibolita, de formas subangulosas a subredondeadas y de diámetro entre uno y 1,5 m. La matriz es limo arenosa de color rojopardo.

Vereda El Barro, asociado a la quebrada El Tigre; donde el máximo espesor visible observado es de dos metros, con 80 % de bloques en estado fresco, subredondeados a subangulosos, compuestos de anfibolita y cuarzdiorita, cuyo diámetro puede alcanzar dos metros. La matriz es limosa de color pardo.

En Barbosa estos depósitos se caracterizan por ser clasto-soportados, con clastos de formas desde redondeadas hasta subangulosas, de composición cuarzdiorítica principalmente con presencia de esquistos, y de clastos de diámetro desde uno hasta dos metros. La matriz de estos depósitos es parda y de granulometría arenosa. Ejemplo de este tipo de depósito se observa en la vía principal cerca de los charcos “Búcaros” y entre Popalito y La Tambora. En ocasiones, pueden observarse pequeños cerros aislados, modelados en estos depósitos, como es el caso de la quebrada La López en el sector del barrio Buenos Aires, vía al barrio San Rafael. En esta zona se observa el depósito suprayaciendo el perfil de meteorización de la cuarzdiorita. Igualmente, los depósitos aluviotorrenciales de la quebrada La Manera en el barrio Guayabal, se superponen al flujo de lodos.

### **3.1.14 Depósitos antrópicos – Llenos (QII)**

Derivados de la actividad urbanística y constructiva propia de una región en crecimiento, que genera una gran cantidad de escombros y materiales de rezaga, los cuales deben ser dispuestos. Estos depósitos artificiales pueden llegar a tener una extensión y espesor tan importante que incluso permiten su cartografía a escala 1:10.000. La composición de estos depósitos es en extremo heterogénea, desde materiales homogéneos conformados con algunas normas técnicas hasta basura, materia orgánica y escombros simplemente vertidos, con propiedades geotécnicas pobres para cortes y capacidad portante. Dentro de esta unidad también se incluyen aquellas acumulaciones artificiales necesarias para la construcción de las obras de infraestructura; donde las de mayor relevancia son los terraplenes de aproximación a los puentes vial es que pueden alcanzar espesores hasta de 10 m y extensiones importantes, las cuales pueden llegar hasta acumulaciones de hasta un millón de metros cúbicos. Sus características fundamentales estriban en que los materiales que los constituyen son más homogéneos y fueron conformados según metodologías de construcción adecuadas.

En Copacabana en el barrio Machado, sobre la terraza del río Aburrá-Medellín se encuentra un lleno de más de un metro de espesor. Otros llenos de la zona urbana se localizan en los barrios Villanueva, El Recreo, la vereda Alvarado, entre otros. En Barbosa, en el sector “El Hueco”, existe un lleno antrópico suprayaciendo el flujo de lodos del área urbana del municipio. Este lleno tiene entre 10-30 cm de espesor y conforma todo el barrio “El Hueco”. Los llenos antrópicos del municipio de Bello están en cercanías al río Aburrá-Medellín; estos

depósitos están compuestos generalmente por gravas aluviales y bloques de material de construcción, con una matriz de granulometría areno limosa.

### 3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Al norte del valle existe un sistema de fallas regionales con dirección NW donde sobresalen las fallas Don Matías y Rodas. El sistema de fallas con dirección NE donde las principales trazas son La Chapa y Santa Elena.

Además de los sistemas de Fallas claramente definidos, se presentan rasgos tectónicos definidos por geformas como lomos deflectados, quebradas o corrientes asimétricas y cambios bruscos de pendientes, también aparecen a nivel de afloramiento zonas de cizalla, salvanda y un intenso fracturamiento de las rocas, pero donde no se alcanza a definir una zona de falla propiamente dicha.

#### 3.2.1 Sistema de Fallas NS a NNW

De acuerdo con Ingeominas (2005), el tren regional de dirección NS a NNW está conformado por estructuras de falla que influyen tanto la dirección de las fajas de rocas metamórficas y las direcciones de foliación. Las fallas que presentan esta dirección en la zona de estudio se presentan en la Tabla 3.12.

**Tabla 3.12. Fallas NS a NNW.**

<b>Don Matías</b>	Documentada por botero, 1963 y nombrada por Arango y Montoya, 1982. En la zona de estudio presenta una dirección N45°W. Su expresión morfológica en el valle es muy notoria, observándose silletas laterales en ambas márgenes del río Aburrá-Medellín y estrías de falla en saprolitos de cuarzodiorita. Pone en contacto las rocas de la unidad de rocas metamórficas de la cordillera central con el batolito antioqueño (Sierra y Zapata, 1989).
<b>El Guadual</b>	Corresponde a una falla de intrusión (Sierra y Zapata, 1989), de dirección N60°-70°W/60°NE, bordea el contacto entre el Batolito Antioqueño y el cuerpo metamórfico que aflora al suroeste de Barbosa. Aflora en la carretera que conduce al Alto de Matasanos y sobre la autopista Medellín - Barbosa, con una amplia franja de unos 80 m de milonitas en el Batolito Antioqueño y deformación frágil en las filitas.
<b>El Salto</b>	Documentada por Integral, 1982, con dirección N7°W y buzamientos superiores a 65° tanto al este como al oeste. Se extiende desde la cuchilla El Contador hasta la vereda Peñolcito de Copacabana. Presenta una fuerte expresión morfológica, formando escarpes con pendientes muy pronunciadas (cuchillas Ancón Norte y Contador) y valles profundos desarrollados en los lineamientos de las quebradas (Álvarez y Trujillo, 1985).
<b>La Ese</b>	Con una dirección subparalela a la falla El Guadual, pone en contacto rocas metamórficas con el Batolito Antioqueño. De dirección aproximada N50°W, se halla cubierta en la parte baja del valle por depósitos recientes y continúa hacia el flanco oriental del Valle de Aburrá.
<b>Rodas</b>	De dirección general NS/45°NS/45°E, pone en contacto las Dunitas de Medellín con las Anfibolitas. Con buzamiento 45°NE y se ha determinado de carácter normal. No presenta evidencias de desplazamientos horizontales y con desplazamiento vertical desconocido.
<b>Calles</b>	Reportada por Ingeominas, 1983 según POT del municipio de Bello, aparece como una estructura mayor controlando el cauce de la quebrada La Chiquita del municipio de Bello, tiene un tendencia NNW.
<b>La Loca</b>	Observada en el cauce de la quebrada del mismo nombre entre los municipios de Bello y Medellín, presenta dirección N70°W/80°W afecta los gabros formado una superficie de ruptura continua por unos dos kilómetros de longitud.

Fuente: AMVA, 2007.

#### 3.2.2 Sistema de Fallas NE

Dentro de las fallas con tendencia NE se destaca en la zona de estudio la falla La Chapa, ver Tabla 3.13.

**Tabla 3.13. Fallas con tendencia NE.**

<b>La Chapa</b>	Presenta una tendencia NE con una extensión aproximadamente de 1.5 km a lo largo de la loma Los Quinteros, loma El Guamal y la quebrada Ovejas. Posee una dirección N70°E/40°NW paralela a la dirección del valle y con una expresión geomorfológica de facetas triangulares y un cambio brusco en la pendiente de las laderas (Sierra y Zapata, 1989).
-----------------	--

Fuente: AMVA, 2007.

Las estructuras reportadas en el estudio de Microzonificación Sísmica que afectan los cuerpos que afloran en el norte del Valle de Aburrá se compilan en la Tabla 3.14.

**Tabla 3.14. Estructuras presentes en las unidades litológicas que floran al norte de Valle de Aburrá.**

UNIDAD GEOLOGICA	MUNICIPIO	VEREDA	ESTRUCTURA	DIRECCIÓN
Anfibolitas de Medellín	Copacabana	Vereda Guasimalito	Diaclasas	N65°W/30°SW - N80°W/55°NE - N50°E/V
		Sector El Pinar	Cizallas Diaclasas	NS/70° - N70°W/70°EN - N45°E/45°NW - N80°E/38°NW - NS/75°E
		Vía al respiradero de la hidroeléctrica Niquía.	Diaclasas	N80°W/V
		Sector La Pitaya	Diaclasas	N45°W/80°SW - N30°E/30°SE - N70°E/75°SE
		Sector Alto de la Virgen	Diaclasas	EW/54°S
		Vía Santo Domingo Guarne, cerca de la escuela	Diaclasa	NS/W
		Vereda Ancón	Diaclasas	S15°E/85°EN - N55°E/30°NW - S5°E/60°SW - S85°E/55°NE
	Girardota	Vereda Manga Arriba	Diaclasas en anfibolita con una densidad de 20 d/m	N19°W/42°SW
		Parcelación el Limonar, Finca Fin del Afán	Diaclasas en anfibolita	N20°E/65°SE
		Vereda la Holanda, parte baja	Diaclasas en anfibolita con una densidad de 15 d/m	S70°W/65°SE
		Vereda la Holanda, parte alta, vía a San Pedro	Diaclasas en anfibolita	N60°E/10°SE
		Vía a San Pedro, Vereda María Paulina Vélez	Diaclasas en anfibolita con una densidad de 10 d/m	N30°E/75°SE
		Vereda El Totumo	Dirección de foliación de la anfibolita	S55°W/70°SE
Gneis de La Ceja	Copacabana	Vereda Cabuyal	Diaclasas	N40°E/65°NW N40°W/70°N- N48°W/V - N30°E/V



UNIDAD GEOLÓGICA	MUNICIPIO	VEREDA	ESTRUCTURA	DIRECCIÓN
		Después del túnel, autopista Medellín - Bogotá. Vereda Peñolcito	Diaclasa	N5°E/60°SE
		Sector Yarumito	Diaclasas	N80°E/40°SE
Batolito antioqueño	Copacabana	Vereda Zarzal – La Luz	Dirección cizalla – Espejo de Falla	N85°E
			Diaclasas	S55°W/50°NW - N50°W/45°SW
	Girardota	Vereda Juan Cojo - Finca El Naranjal	Contacto aparente anfibolita y cuarzdiorita	NS/60°W
		Sector El Chiquero	Diaclasa	N19°W/42°SW
		Vereda Loma de los Ochoa	Dirección de dique cuarzo	N65°E/25°SE
		Vereda El Paraíso	Dirección de dique cuarzo	S40°W/70°NW
		Vereda La Mata	Sistemas de diaclasas	N60°E/35°SE - N70°W/65°NE - N28°E/V
Esquistos de Cajamarca	Copacabana	Vereda El Totumo	Esquistos con intercalaciones de anfibolita, dirección de foliación	N35°E/65°NW
		Estadero Tres Esquinas, vereda San Esteban	Gneis con intrusiones básicas. Foliación	N42°E/V
		Vereda El Totumo, a 20 m de la entrada a la finca Villa Isabel	Intercalaciones de esquisto gneis. Esquistosidad. Foliación	N55°E/75°NW – N60°E/80°NW
		Vereda María Paulina Vélez, a 50 m de la estación	Zona de cizalla	S35°W/72°NW
		Vereda María Paulina Vélez	Zona de cizalla con milonita	N22°W/72°NE
Esquistos de Cajamarca	Barbosa	Vía a la Chorrera	Foliación gneis esquistoso	N30°W/45°NE
		Vía a Alejandría	Foliación esquisto negro	N24°W/73°NE
		Alto Cestillal, después de finca El Campanario	Foliación esquisto negro	N40°W/45°NE
		Vereda Cestillal	Foliación esquisto negro	N45°W/50°NE
		Camino de herradura a escuela Quintero	Foliación esquisto negro	N45°W/65°SW
		Vía al Alto de Matasano	Foliación esquisto negro	N75°W/82°NE
		Vereda La Isaza	Foliación esquisto	N50°W/73°NE
Cornubiana	Barbosa	Vereda Arrayanes	Diaclasas	N50°W/55°SW - N30°W/33°NE - N40°E/75°NW
Esquistos Anfibólicos de Baldías	Bello		Bandeamiento	N10°W/22°W
			Diaclasas	N60°E/45°E - N35°E/65°W
			Zona de Falla	E-W/80°E
			Esquistosidad	S20°W/36°E
Dunitas de Medellín	Bello		Dirección cizalla	N25°W/70°
			Espejo de Falla	N-S

Fuente: AMVA, 2007.

### 3.3 GEOMORFOLOGÍA

Acorde con EMSVA (AMVA, 2007) el Valle de Aburrá se dividió en tres unidades de paisaje: superior, medio e inferior atendiendo a consideraciones de forma, ancho, orientación y contexto geomorfológico. La zona objeto de estudio se encuentra enmarcada en el valle inferior, con algunos rasgos geomorfológicos que hacen parte del valle medio, en jurisdicción del municipio de Bello. En cada uno de los valles se reconocieron macrounidades geomorfológicas que denominaron Bloques, los cuales muestran condiciones morfológicas aproximadamente homogéneas y que se distinguen, en forma clara, de los adyacentes. A continuación se presentan las características de ambas unidades de paisaje con las correspondientes macrounidades localizadas en la zona de interés.

#### 3.3.1 Valle de Aburrá Medio (VM).

Se extiende aproximadamente desde los municipios de Itagüí y Envigado hasta los límites entre Bello y Copacabana. Es el valle más ancho, con un fondo amplio y plano, flanqueado por superficies suaves en distintos depósitos de vertiente, sistemas de colinas y lomos que terminan en la parte más alta en escarpes lineales que marcan el límite del valle y los altiplanos. A esta unidad de paisaje pertenecen las siguientes macrounidades.

##### 3.3.1.1 Bloque Bello Occidental (VM-BBO).

Este sector corresponde a la vertiente occidental del municipio de Bello.

Sobresalen laderas homogéneas de fuerte inclinación hacia la parte alta, definiendo un escarpe lineal con una orientación N-S, concordante con la tendencia de las estructuras geológicas (fallas) cartografiadas; las cuales a su vez tienen asociados algunos escarpes con buena expresión geomorfológica. Al norte de esta franja de terreno, en las cabeceras de la quebrada La García, las vertientes continúan siendo escarpadas pero tienen forma semicircular producto del avance del frente erosivo del río Aburrá. Por debajo de estas vertientes escarpadas y como producto del mismo frente erosivo, se han desarrollado lomos de carácter regional con orientación general W-E y algunos N-S (en el lado norte del polígono); los lomos tienen flancos empinados y rectos, con topes agudos e irregulares. Se observan facetados y se piensa que su origen puede estar relacionado con las fallas del sector o con diaclasamiento. Hacia la base de la vertiente los topes de los lomos mencionados se amplían, tornándose planos y aparecen una serie de sistemas de colinas bajas a medias en suelos residuales, de base irregular y una clara relación genética con los lomos.

##### 3.3.1.2 Bloque Quitasol (VM-BQ).

Esta macrounidad se ubica en el extremo norte del denominado Valle Medio, sobre la orilla izquierda del río Aburrá, en el lugar donde este cambia de dirección, tornándose N45°E.

En esta macrounidad las pendientes son moderadas a escarpadas hacia la parte alta, definiendo la continuación de los escarpes semicirculares en las cabeceras de las quebradas, descritos en la macrounidad anterior. Más abajo los lomos son la geofoma

predominante, con una tendencia N-S pero de incisión moderada, topes redondeados y amplios.

### **3.3.1.3 Bloque Quebrada Rodas (VM-BQR).**

Esta macrounidad también corresponde al extremo norte del Valle Medio, pero esta vez sobre la margen derecha del río Aburrá, definiendo un polígono alargado en dirección N-S, concordante con las trazas asociadas al Sistema de Fallas de Rodas.

Esta macrounidad coincide con la vertiente derecha de la cuenca de la quebrada Rodas, donde se presenta un sistema de lomos regionales bien definidos, con flancos empinados a moderados e irregulares, de topes estrechos y redondeados.

En este polígono se localiza el relleno sanitario de Curva de Rodas, aguas arriba de esta geoforma antrópica, se identificó un tramo rectilíneo de la quebrada Rodas, además de unos pequeños escarpes alineados que en conjunto fueron cartografiados como rasgos morfotectónicos. Finalmente, hacia la parte inferior de la ladera se presentan zonas de topografía suave que divergen desde el fondo de las vaguadas entre los lomos descritos.

### **3.3.1.4 Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA).**

Su característica principal es el claro control estructural. Predominan las pendientes moderadas, con algunos sectores escarpados hacia la parte alta y sobre la vertiente derecha de la quebrada La Sucia (límite Bello - Medellín), además de algunos sectores de pendientes suaves que a su vez conforman una franja en el centro de la macrounidad, definiendo de esta manera un escalonamiento de la vertiente.

Se presenta un sistema de lomos, que en la parte norte tienen una tendencia N-W a N-S (paralelos a la falla Rodas) y en el sector sur E-W. Dichos lomos en general tienen flancos empinados, rectos y de tope agudo; además, las corrientes que los separan transcurren por profundos y estrechos cañones con tendencias similares.

En medio de esta unidad geomorfológica, con una distribución irregular, se identifican áreas de topografía suave, orientadas en sentido N-S. Por su paralelismo con estructuras regionales se interpretan como Peldaños.

### **3.3.1.5 Bloque Comuna Nororiental Baja (VM-BCNB).**

Dentro de esta macrounidad se identifican dos sectores. Al norte se observan pendientes regulares y continuas de inclinación suave a moderada convergencia hacia al fondo del valle; en medio de las cuales las corrientes han labrado sus cauces, generando una red poco densa de vaguadas moderadamente incisadas de flancos cortos, irregulares y de pendientes moderadas. Al sur del polígono se presentan pendientes suaves que descienden hasta confundirse con el fondo del valle y cuya configuración morfológica indica una génesis depositacional. Dentro de esta unidad también se identificaron una serie de zonas de pendiente suave a diferentes alturas, que por su localización (cercana a las trazas de las fallas o lineamientos) u orientación se cartografiaron como peldaños.

### **3.3.2 Valle de Aburrá Inferior (VI).**

Se extiende desde los límites entre Bello y Copacabana hasta el municipio de Barbosa, es marcadamente más estrecho, simétrico y de flancos muy paralelos indicado por su patrón de drenaje. Tiene abundantes depósitos de vertiente, especialmente en inmediaciones de los cascos urbanos mencionados, y una llanura aluvial de amplitud moderada. Sus límites son los altiplanos S-I bien conservados y S-II más deteriorado. Existen rasgos morfotectónicos muy claros en ambas vertientes principalmente al oriente de Girardota.

Las macrounidades que se encuentran en el valle inferior son las siguientes:

#### **3.3.2.1 Bloque Copacabana - Girardota (VI-BCG).**

La macrounidad inicial involucra terrenos de los municipios de Bello, Copacabana y Girardota, y se extiende sobre ambos márgenes del valle con una tendencia regional de N45°E. Su principal característica es la presencia de extensas superficies suaves en depósitos de vertiente con diversas alturas y grados de disección; todas ellas ubicadas en las partes inferiores de las vertientes, donde tienen asiento las poblaciones de Copacabana y Girardota.

Hacia la parte alta de ambos márgenes del valle se identifican zonas de topografía empinada a escarpada cuyo patrón de distribución está asociado con las cabeceras de las corrientes de mayor jerarquía, estableciéndose de esta manera una serie de escarpes semicirculares generados por la erosión fluvial remontante en contra de los altiplanos circundantes. Más abajo se identifican una serie de lomos de carácter regional profundamente entallados y con dirección concordante con la red de los principales drenajes de la ladera (SE-NW); dentro de estos lomos se destacan dos de gran relevancia geomorfológica. Uno es conocido como la cuchilla de Las Peñas, al este del casco urbano de Copacabana, el cual tiene un tope muy estrecho y agudo. El otro corresponde al Ancón Norte, que tiene un tope muy amplio y su terminación constituye un control litológico del cauce del río Aburrá. Sobre los flancos de este sistema de grandes lomos se ha definido una segunda generación de lomos (secundarios) con vertientes moderadas a empinadas, topes redondeados y estrechos.

#### **3.3.2.2 Bloque Hatillo - Barbosa (VI-BHB).**

Al igual que la anterior se extiende regionalmente según una tendencia N45°E; involucrando, en su sector SW, ambos márgenes del río y en su extremo NE sólo la vertiente derecha.

Una característica importante de la macrounidad es la fuerte irregularidad del fondo del valle, iniciando bastante amplio en jurisdicción del municipio de Girardota y disminuyendo marcadamente hacia el norte, donde se amplía nuevamente en inmediaciones del casco urbano de Barbosa, para desaparecer casi por completo aguas abajo. Por otro lado se destaca la común ocurrencia de rasgos de origen morfotectónico que se evidencian con claridad por su fuerte carácter lineal y su discordancia con la tendencia general de la vertiente, formando incluso picachos de base alargada según la orientación de las estructuras dominantes. Hacia la base de las vertientes es común la ocurrencia de sistemas

de colinas en suelos residuales, en general debajo de los 1 500 msnm. Estas colinas se observan como antiguos lomos fuertemente incisados conectados a las laderas del valle.

Especial interés revisten los sistemas de colinas localizados en inmediaciones del casco urbano de Barbosa y otras más aguas abajo. Ellos se extienden hasta el río, constituyendo en algunos tramos del río pequeños ancones rocosos y definiendo una serie de ambientes de depositación discontinuos e irregulares, que incluso hacen aparecer aisladas las colinas descritas.

### **3.3.2.3 Bloque Matasanos (VI-BM).**

Este es el último bloque identificado en el Valle Inferior.

Corresponde a la vertiente izquierda del río Aburrá en su último tramo. La característica fundamental en esta macrounidad es la ocurrencia, en la parte inferior de esta ladera, de extensos depósitos de vertiente del tipo flujo de lodos y/o escombros con típicas geofomas de abanico. Estos abanicos tienen una clara relación genética con el actual sistema de drenaje, denotando su edad relativamente reciente, lo que es corroborado por el bajo grado de disección de las superficies de depositación originales. Se observa un sistema de colinas en suelos residuales, localizadas hacia la parte inferior; algunas de las cuales se observan aisladas, en medio de los depósitos de vertiente ya descritos.

Presenta algunos rasgos morfotectónicos, especialmente un lomo de carácter regional en inmediaciones de la parte baja de la quebrada Santa Rosa, cuya orientación N60°E contrasta con la inclinación de las vertientes del sector y es coincidente con el tren estructural regional.

Hacia la parte alta de este bloque, en su lado norte, se identifican zonas de topografía empinada a escarpada, presenta una serie de escarpes semicirculares generados por la erosión fluvial remontante en contra de los altiplanos. En oposición, en el sector occidental se presentan vertientes de inclinación suave a muy suave, onduladas, que contrastan con las laderas del valle.

En la Figura 3.2 se encuentra el mapa geomorfológico de la zona de estudio.

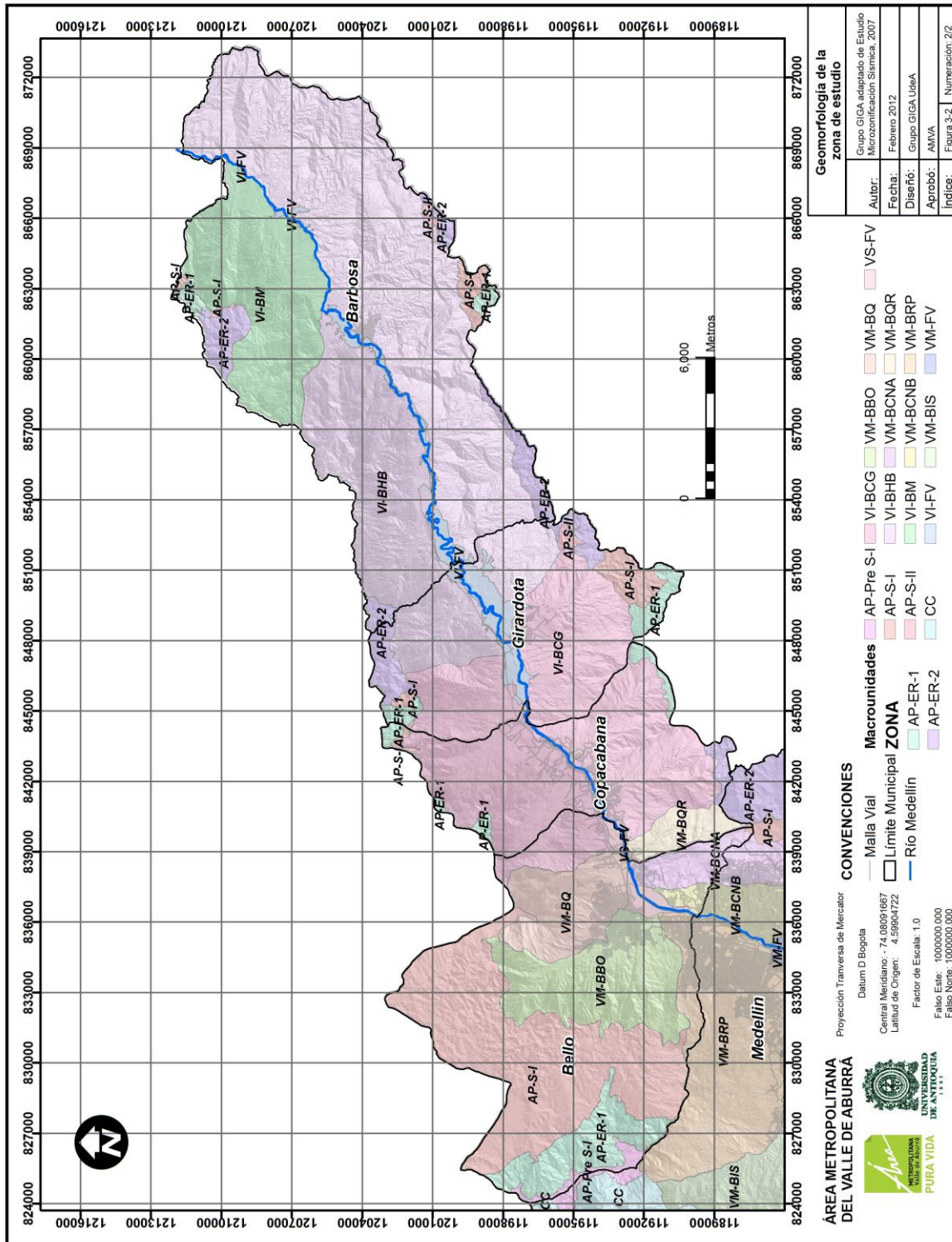


Figura 3.2. Geomorfología de la zona de estudio.

#### 4 MODELO HIDROGEOLÓGICO Y ZONAS DE RECARGA

La exploración hidrogeológica se define como “el conjunto de operaciones o trabajos que permiten la localización de acuíferos o embalses subterráneos de los que se puede obtener agua en cantidad y de calidad adecuada para el fin que se pretende” (Custodio y Llamas, 1997).

Una unidad hidrogeológica es un estrato o conjunto de estratos adyacentes susceptibles a reconocerse por poseer propiedades o características hidrogeológicas similares (Betancur, 2008), en este sentido se tienen: una formación, o grupo de formaciones, de rocas permeables saturadas con agua y con un grado de permeabilidad que justifique, en términos económicos, la extracción del recurso hídrico subterráneo. Se denomina acuífero, una unidad geológica que contiene agua, incluso hasta la saturación, pero, sin transmitirla es un acuícludo o si la circulación es muy lenta se denomina acuitardo; si la formación no almacena ni transmite agua se denomina acuífugo. Unas y otras pueden estar presentes dentro de un mismo sistema, distribuidas como componentes que se complementan y limitan entre sí, y que están conectadas mediante procesos de flujo.

Cuando se hace referencia a las propiedades hidráulicas de una unidad hidrogeológica, se citan tres parámetros fundamentales: conductividad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento, la definición de estos conceptos se enuncia así:

**Conductividad (K):** Es la aptitud de un medio acuífero para permitir el flujo del agua bajo el efecto de un gradiente hidráulico (diferencia de potencial hidrostático) por unidad de longitud. Para dar una medida mecánica de la permeabilidad se ha definido el coeficiente de permeabilidad de Darcy (K) que es el volumen de agua gravítica que circula durante una unidad de tiempo, bajo el efecto de una unidad de gradiente hidráulico, a través de una sección de área unitaria perpendicular a la dirección del flujo y a una temperatura de 20 °C.

**Transmisividad Hidráulica (T):** Volumen de agua por unidad de tiempo (caudal) que pasa a través de una sección vertical de ancho unitario y de altura  $b$ , bajo el efecto de una unidad de gradiente hidráulico y a una temperatura de 20 °C.

**Coeficiente de almacenamiento (S):** Es el volumen de agua que es liberado por un prisma del acuífero de sección unitaria cuando se produce un cambio unitario del nivel piezométrico.

El gradiente hidráulico al que hacen referencia estas definiciones representa la pérdida de cabeza piezométrica por unidad de longitud. Tal como se enuncia en la ley de Darcy se requiere de la existencia de un gradiente hidráulico para que haya flujo subterráneo, la superficie piezométrica es el lugar geométrico que representa los niveles del agua subterránea y su distribución en el espacio, a partir de ella se determinan direcciones de flujo y por lo tanto se identifican áreas de recarga indirecta, zonas de tránsito y lugares de descarga. Ese componente, uno de los más importantes de los modelos conceptuales, se obtiene mediante monitoreo de campo y se valida con la utilización de técnicas hidroquímicas e isotópicas.

Los excedentes de precipitación que se registran luego de descontar el agua evaporada, se reparten entre las rutas de la escorrentía superficial y la infiltración, dependiendo de la

evolución del grado de humedad del suelo o de la zona no saturada se da paso a la recarga definida como el proceso físico mediante el cual el agua después de infiltrarse desciende para incorporarse a las zonas saturadas de las formaciones geológicas del subsuelo. Además de la recarga directa, pueden ser fuentes de recarga a un acuífero los cuerpos de agua superficiales o de otras unidades hidrogeológica vecinas. Dentro de estas últimas los flujos laterales y distantes suelen ser importantes en acuíferos confinados, pero también en los niveles más profundos de los acuíferos libres.

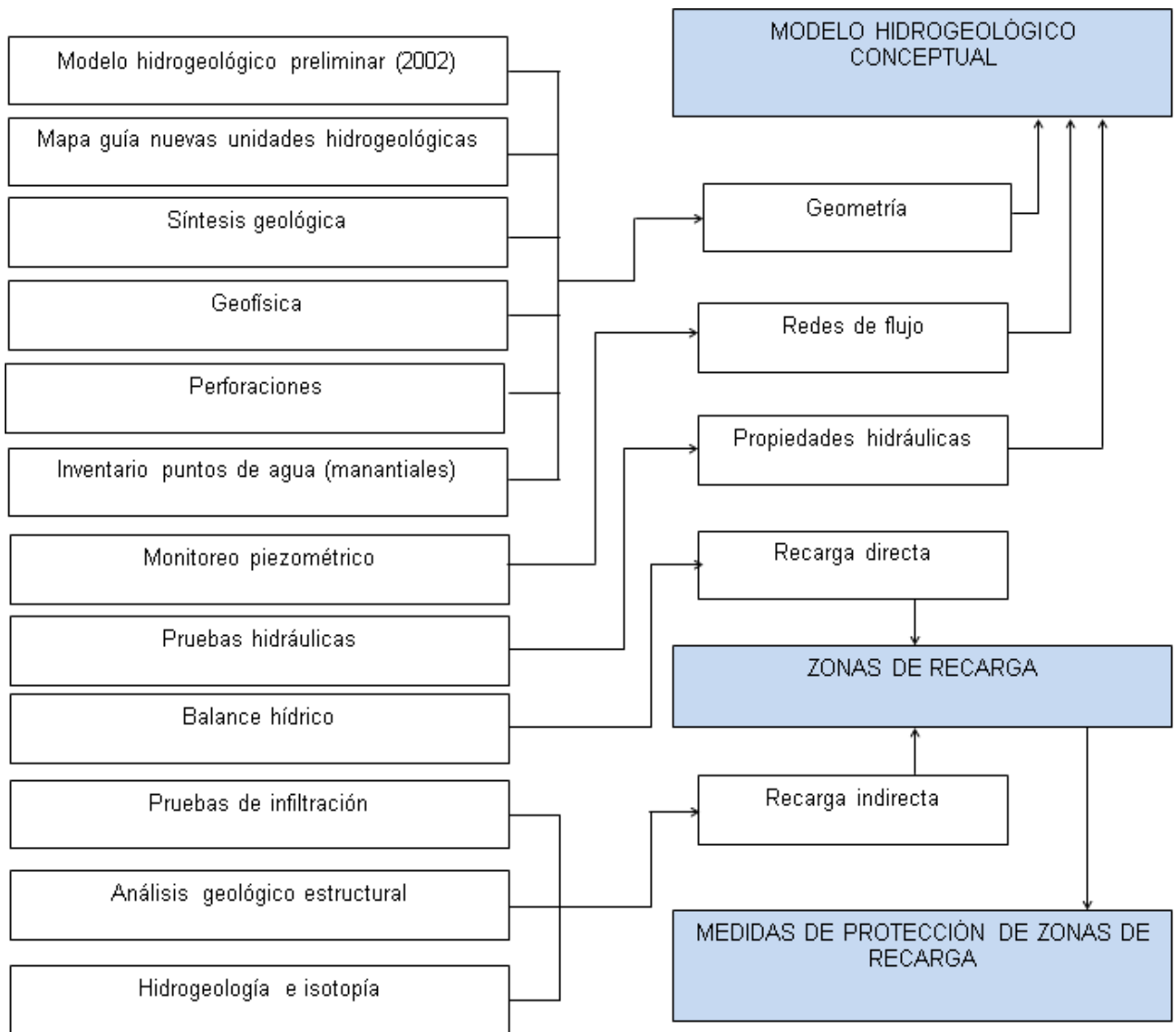
Bajo una perspectiva hidrogeológica, un modelo conceptual es una representación de un sistema hidrogeológico, es decir, de sus componentes y de las interacciones entre ellas. Las unidades hidrogeológicas reconocidas en un área de estudio son los componentes y los flujos, a través de ellas y entre ellas, son los procesos (Betancur, 2008). Un sistema de aguas subterráneas, es un sistema abierto que intercambia materia y energía con su entorno; desde la percepción más general, en el medio natural ingresa agua al sistema mediante el proceso de recarga y desde él sale agua como flujo base o, en ocasiones, por evaporación. Un sistema intervenido por el hombre registra otros procesos de intercambio de materia con el entorno (Betancur y Palacio, 2009).

La geometría de acuíferos y acuitardos y sus propiedades hidráulicas, las variaciones –a través del tiempo- de las superficies piezométricas, la delimitación de áreas y fuentes de recarga así como de su cuantificación a los acuíferos libres -calculados mediante los métodos de balance hídrico- y las condiciones de calidad ambiental son los elementos que comúnmente se incorporan a un modelo hidrogeológico conceptual. La premisa de que el manejo sostenible de los recursos naturales requiere de un cabal conocimiento de medios y procesos está cada día más enraizada en los ámbitos gubernamentales, particularmente en aquellos concernientes con el ejercicio de la autoridad ambiental (Betancur, 2010).

En este capítulo se presentan los resultados de este estudio en relación al refinamiento de un modelo hidrogeológico conceptual para la zona norte del Valle de Aburrá, y en cuanto a la recarga se determinan de zonas a través de las cuales ella se da y se cuantifica la magnitud que ocurre a partir de la infiltración directa y la posterior percolación.

El esquema de la Figura 4.1, en el que se identifican los productos a obtener a partir de la realización de este estudio, se convierte en un avance metodológico toda vez que relaciona las actividades y métodos a seguir para tener el resultado deseado. Las secciones de este capítulo siguen el orden del esquema de los elementos que se resaltan en esta figura, en el numeral 4.1 se sintetiza el modelo hidrogeológico conceptual, luego, en el numeral 4.2, se da paso a la definición de zonas de recarga, incluyendo los resultados obtenidos con las pruebas hidroquímicas e isotópicas para validar el modelo. La definición de medidas de manejo y protección se trata en el capítulo siguiente.





**Figura 4.1. Esquema general de productos y métodos para la definición de los modelos hidrogeológicos y de recarga, y medidas de protección.**

#### 4.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

El conocimiento de las características fisiográficas, hidrográficas, climatológicas y geológicas de una región representa una condición indispensable para la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual que involucre como elementos básicos la definición de la geometría de las unidades hidrogeológicas y de sus propiedades hidráulicas, la determinación de las redes de flujo, la delimitación de zonas de recarga y la estimación de ella y la evaluación de las condiciones de calidad de las aguas subterráneas. Los datos con los que se disponga y la información que de ellos pueda extraerse representan los insumos para llevar a cabo un procedimiento de análisis que permita como resultado obtener el modelo deseado.

La identificación de las unidades hidrogeológicas se realiza a partir del análisis de la geología, la información estratigráfica obtenida a partir de los inventarios de puntos de agua, perforaciones exploratorias, geofísica y su posterior correlación. En el campo de la definición de la geometría de las unidades acuíferas, sus propiedades hidráulicas y de flujo, si se tiene información suficiente, la ruta de la modelación geoestadística permite una buena construcción pictórica del sistema mediante modelos digitales del terreno MDT. Un modelo digital del terreno (MDT), es un simulador matemático de la representación física del terreno o de un atributo de interés. A través del proyecto de investigación Plataforma SIG para la modelación de sistemas acuíferos (Escobar, 2011) se ha desarrollado una herramienta que permite construir mallas de celdas o puntos para la representación de las unidades y construcción de paleotopografías.

Con el propósito de tener amarres más precisos para las tareas de modelación espacial, dentro de la realización de este proyecto se nivelaron topográficamente 32 puntos, ellos comprenden referentes geográficos, sitios de monitoreo piezométrico y perforaciones. En el Anexo 4.1 se incluye el reporte entregado por la firma Gónima Topografía como resultado de este ejercicio de nivelación. Los métodos empleados para la nivelación han sido avalados en estudios previos por el AMVA.

Para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual del norte de Valle de Aburrá se efectuaron las siguientes actividades:

- **Corroboración de geología en campo:**

En el capítulo 3 de este informe se consignó el mapa geológico del norte del Valle de Aburrá, a escala 1:10.000, obtenido a partir del mapa logrado durante EMSVA, (AMVA, 2007) y de tareas de corroboración y ajustes adelantadas mediante trabajo de oficina y campaña de campo realizada entre los días 24, 27, y 29 de Agosto y 3, 7, 9, 14 y 24 de septiembre de 2011 (Anexo 3.1). Teniendo en cuenta las condiciones texturales de las diferentes unidades litológicas y las características de porosidad y permeabilidad primaria o secundaria que en cada una de ellas se diera, se estableció un primer diagnóstico (hipótesis de trabajo) acerca de su probable condición o aptitud como unidad hidrogeológica.

- **Geofísica, correlación y modelación:**

A partir de la identificación preliminar de las potenciales unidades acuíferas establecidas con base en la corroboración geológica, y considerando la localización de los sitios para los cuales se contaba con información estratigráfica, se definió una red de análisis geofísico para practicar las tomografías eléctricas que permitieran interpretar la estratigrafía del subsuelo a través de varias secciones transversales, estas tomografías fueron realizadas entre el 29 de septiembre y el 19 de octubre de 2011. También fue evaluada la información obtenida durante la ejecución del estudio de Zonas de Recarga y Acuíferos del Valle de Aburrá (UdeA-Integral-AMVA, 2002), la suministran las columnas estratigráficas obtenidas mediante perforaciones llevadas a cabo en ESMVA y los registros de cuatro perforaciones efectuadas en el marco de este estudio. Estos insumos -las imágenes directas representadas como columnas estratigráficas productos de perforaciones, e imágenes indirectas producto de la interpretación de los registros geofísicos- fueron interpretados para establecer condiciones de semejanza textural, estructural y de posición, que dieran como resultado de correlación hidroestratigráfica. La modelación espacial, hecha con los datos

provenientes de esta, permitió obtener una representación espacial del espesor de los acuíferos.

- **Balance hídrico:**

A partir de la información hidrometeorológica suministrada por el AMVA (obtenida del IDEAM y de EPM), se efectuaron balances hídricos por estación para evaluar la recarga directa, a partir de excedentes de precipitación, que percola a los acuíferos libres. En el numeral correspondiente a los resultados del balance hídrico (4.1.3) se suministran detalles relacionados con las fuentes de información utilizadas. Teniendo en cuenta la existencia de zonas de recarga indirecta, se propuso y se aplicó un procedimiento aproximado para estimar la magnitud distribuida de este proceso.

- **Síntesis de propiedades hidráulicas de unidades acuíferas:**

Las propiedades hidráulicas de las unidades acuíferas se sintetizaron a partir de los resultados reportados en estudios anteriores y a partir de la realización de 22 pruebas de infiltración, las cuales se llevaron a cabo en el mes de diciembre de 2011 y estuvieron ubicadas sobre depósitos aluviales y de vertiente.

- **Piezometría:**

A partir de la localización de manantiales a los cuales se les asigna un nivel piezométrico igual al de la cota del terreno, y de los niveles medidos durante la campaña de monitoreo realizada en octubre de 2011, se perfilaron las direcciones de flujo del agua subterránea, procediendo ellas desde las áreas de recarga y concluyendo en los sectores de descarga.

#### **4.1.1 Aptitud hidrogeológica según litología**

Considerando las características geológicas de una región, el primer elemento a analizar, en la búsqueda de potenciales unidades almacenadoras de agua subterránea a partir de las condiciones texturales y estructurales de las unidades litológicas de la zona de estudio, se plantean unas premisas en términos de la expectativa que, a nivel descriptivo, generaría las condiciones de porosidad y permeabilidad primaria (textura) o secundaria (estructuras y meteorización).

En la Tabla 4.1 se sintetiza esta interpretación; dentro de las rocas ígneas se considera que las características adquiridas a través de procesos de fracturamiento y meteorización en la Dunita de Medellín, el Batolito Antioqueño y el Stock de Ovejas, hacen de estas unidades objeto de un análisis más detallado para evaluar la probabilidad de constituir posibles acuíferos. Dentro de las rocas metamórficas no se encontraron condiciones suficientes para asignarles condición de embalse de agua. Respecto a los depósitos del Cuaternario, todos son considerados en principio como posibles reservorios de agua subterránea.

**Tabla 4.1. Unidades hidrogeológicas del norte del Valle de Aburrá.**

TIPO DE ROCA	UNIDAD GEOLÓGICA	ASIGNATURA	CARACTERÍSTICAS TEXTURALES	CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES	DIAGNÓSTICO HIDROGEOLÓGICO
<b>ÍGNEAS</b>	Dunitas de Medellín	(JKuM)	Roca compacta, saprolito limo arcilloso	Diaclasada y karstificada	Buen potencial hidrogeológico
	Batolito de Ovejas	(KtO)	Gruss arenoso	Sin reportar	Probable potencial hidrogeológico
	Batolito Antioqueño	(KcdA)	Gruss arenoso	Sin reportar	Probable potencial hidrogeológico
	Gabros de Copacabana	(KgC)	Roca compacta	Sin reportar	Sin potencial hidrogeológico
<b>METAMÓRFICAS</b>	Esquistos de Cajamarca	(TReC)	--	--	--
	Esquistos Anfibolíticos de Baldías	(TReaB)	Roca compacta	Sin reportar	Sin potencial hidrogeológico
	Anfibolitas de Medellín	(TRaM)	Roca compacta	Se encuentran diaclasadas	Probable potencial hidrogeológico
	Metabasitas del Picacho	(JKmbP)	Saprolito limoso	Se encuentran diaclasadas	Probable potencial hidrogeológico
	Gneis de La Ceja	(PRnLC)	Roca compacta	Sin reportar	Sin potencial hidrogeológico
	Gneis Milonítico de Sajonia:	(JKgmS)	Roca compacta	Sin reportar	Sin potencial hidrogeológico
<b>DEPÓSITOS</b>	Depósitos Aluviales	(Qal)	Matriz areno limosa	Sin Reportar	Buen potencial hidrogeológico
	Depósitos Aluviotorrenciales	(Qat)	Matriz areno gravosa	No reportadas	Buen potencial hidrogeológico
	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos	(QFa)	Varía de arena fina a arcillosa	Sin Reportar	Buen potencial hidrogeológico
		(QFIII)	Matriz varía de arena fina a arcilla	Sin Reportar	Buen potencial hidrogeológico
		(NQFII)	Matriz varía de arena fina a arcillosa	Sin Reportar	Buen potencial hidrogeológico
		(NFI)	Matriz varía de arena fina a arcilla	Sin Reportar	Buen potencial hidrogeológico
		(NFprel)			

#### 4.1.2 Potencial acuífero y geometría

Partiendo del conocimiento geológico a escala 1:10.000 y del análisis de la información disponible a partir de estudios hidrogeológicos realizados previamente en el Valle de Aburrá, se procedió al diseño de la red de exploración indirecta del subsuelo mediante la realización de 20 tomografías eléctricas. Para las tareas de correlación hidroestratigráfica se contó además con algunas columnas obtenidas durante las perforaciones que se llevaron a cabo dentro de EMSVA, (AMVA, 2007). Adicionalmente se efectuaron cuatro perforaciones con levantamiento de columna estratigráfica.

## Información disponible en estudios anteriores

Del estudio de Zonas de Recarga y Acuíferos del Valle de Aburrá (UdeA-Integral-AMVA, 2002), tomaron para este estudio las columnas estratigráficas obtenidas a partir de siete sondeos eléctricos verticales (SEV 19 a SEV 25), de ellas, dos se localizan en el municipio de Bello, dos en Girardota y tres en Barbosa. Del EMSVA (AMVA, 2007) se contó con los registros estratigráficos de 17 perforaciones, seis localizadas en Copacabana, seis en Girardota y cinco en Barbosa. Las columnas estratigráficas provenientes de ambos estudios están incluidas en el Anexo 4.2 de este informe.

## Exploración geofísica:

Para la localización de los sitios donde se realizaron las tomografías se tuvo en cuenta los siguientes criterios:

1. Unidad Geológica con aptitud como acuífero.
2. Condiciones topográficas adecuadas procurando profundidad de penetración mayor o igual a 50 m.
3. Permiso del propietario del predio.
4. Facilidades de acceso.
5. Condiciones técnicas (ausencia de factores de interferencia tales como zona urbana, redes o tuberías metálicas y cables de energía o zonas anegadas).
6. Existencia de algunos registros de perforación en localidades vecinas.

Las tareas de campo para exploración mediante tomografías tuvieron lugar entre los días 29 de septiembre al 19 de octubre de 2011.

En el presente estudio se aplicó el método geofísico de Resistividad, empleando la técnica conocida como Tomografía Eléctrica, ya que, de acuerdo con la geología existen potencialmente buenos contrastes de valores entre los materiales acuíferos y los materiales poco permeables.

El fundamento teórico de la metodología de las tomografías es igual que el de los sondeos eléctricos verticales (SEV's).

Inicialmente, hay que tener como base la Ley de Ohm, que relaciona la densidad de corriente eléctrica ( $J$ ) empleada en la generación de un campo eléctrico ( $E$ ) en un medio, que para este caso es el subsuelo, el cual posee una característica física denominada conductividad eléctrica ( $\sigma$ ).

$$J = \sigma E$$

Como la densidad de corriente es igual a la intensidad de corriente ( $I$ ) que pasa por un área ( $A$ ) y el campo eléctrico es igual al potencial ( $V$ ) que varía inversamente con la distancia en un tramo de terreno de longitud ( $L$ ), así como también el inverso de la conductividad es la resistividad eléctrica ( $\rho$ ), entonces la ecuación anterior se transforma en:

$$I/A = (1/\rho) (V/L)$$

Se puede despejar el valor de la Resistividad Eléctrica, que es la propiedad con que normalmente se trabaja en los métodos eléctricos:

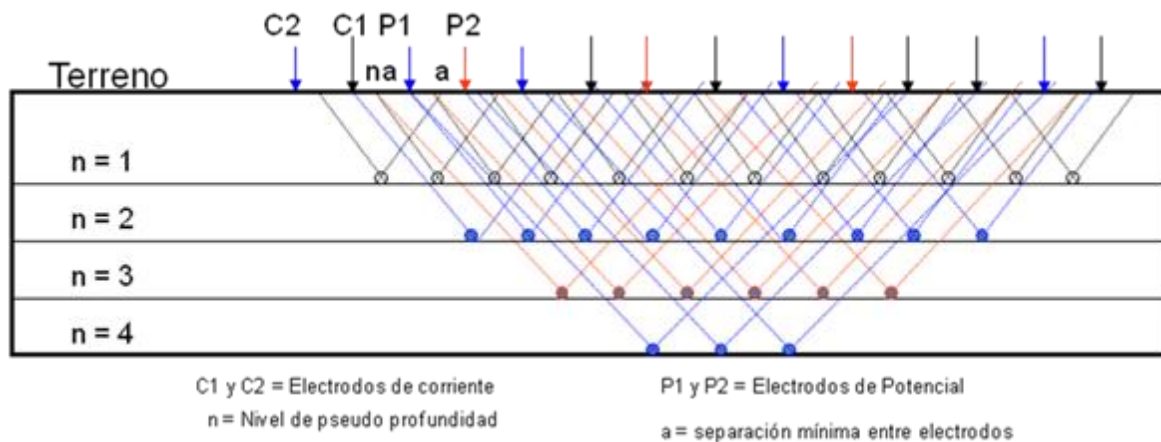
$$\rho = (V/I) (A/L)$$

La relación de área a longitud constituye un factor constante (K), con lo cual la resistividad se puede expresar así:

$$\rho = K (V/I)$$

Dicho factor (K) es característico para cada tipo de arreglo que se utilice. Los arreglos que se emplean en la tomografía eléctrica son: Wenner, Wenner-Schlumberger, dipolo-dipolo (azimutal y ecuatorial), polo – dipolo, polo – polo y gradiente.

El método de Tomografía Eléctrica consiste fundamentalmente en obtener una imagen de un perfil a través de una pseudosección (Figura 4.2). Esta pseudosección muestra las variaciones en el subsuelo de la propiedad física denominada resistividad eléctrica. La resistividad eléctrica es la propiedad que poseen los diferentes tipos de materiales, artificiales o naturales, de oponerse al flujo de la corriente eléctrica en presencia de un campo eléctrico. A través de los contrastes de los valores obtenidos es posible diferenciar distintas clases de materiales existentes en el subsuelo. Para fines prácticos el método se aplica con el fin de obtener información del subsuelo indirectamente y a menor costo que por concepto de perforaciones.



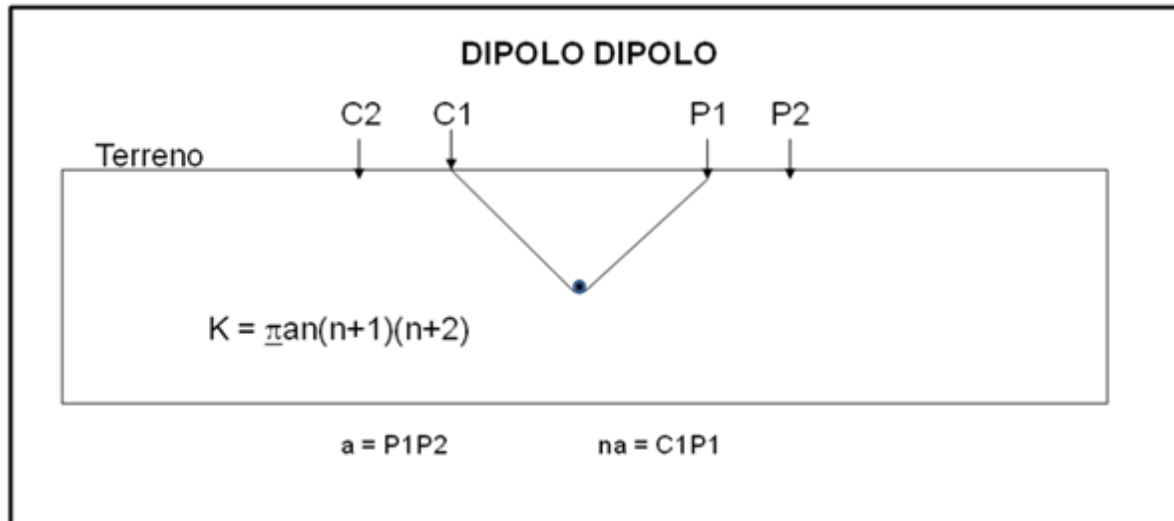
**Figura 4.2. Pseudosección de una Tomografía Eléctrica.**

Para llevar a cabo la medición de resistividades se empleó un arreglo colineal, dipolo-dipolo, el cual consiste en una configuración de electrodos que permiten obtener variaciones de resistividad tanto en profundidad como lateralmente (Figura 4.3). Con este propósito, se emplea una fuente externa para generar corriente (I) que se introduce al subsuelo a través de 2 electrodos (A) y (B); esta corriente crea un campo eléctrico, cuyas diferencias de potencial (V) se miden entre los otros 2 electrodos (M) y (N). La profundidad investigada está relacionada con la apertura de los electrodos (a). A mayor apertura (a) mayor

penetración en profundidad. Las lecturas de corriente y de potenciales permiten calcular mediante la Ley de Ohm, la resistencia (R) de los materiales del subsuelo.

Para la adquisición de datos geoelectrónicos se utilizaron dos equipos de resistividad eléctrica: uno marca ABEMSAS 1000 con todos sus accesorios pertinentes y otro marca AZ.

El arreglo de electrodos utilizado fue de tipo dipolo-dipolo. Consiste en colocar primero los electrodos de corriente y luego los de potencial, los cuales se van alejando progresivamente al aumentar la profundidad de penetración (Figura 4.3).



**Figura 4.3. Arreglo dipolo-dipolo.**

El procesamiento de datos se llevó a cabo con la ayuda del programa RES2DINV, el cual está basado en la metodología de la solución del Problema Inverso. Esta metodología permite obtener la solución de una función matemática a partir de los resultados obtenidos en campo, generando modelos o imágenes de resistividad del subsuelo.

Dado que el propósito de la aplicación de las tomografías eléctricas es el de obtener la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo, tanto en profundidad como lateralmente, se obtuvieron 20 imágenes las cuales muestran básicamente la distribución de valores intermedios de resistividad en los primeros metros de profundidad, de 10 a 100 ohm-m en promedio. A mayor profundidad se encuentran valores más altos, por lo general mayores a 200 ohm-m.

Esta distribución se puede correlacionar claramente con la presencia de depósitos no consolidados sobre materiales duros, teniendo en cuenta el ambiente geológico descrito en el capítulo 3.

En la Tabla 4.2 se presentan las coordenadas planas de la localización del centro de las Tomografías realizadas y la Figura 4.4 muestra su localización. Los datos de campo y el informe interpretativo de las tomografías se encuentran en el Anexo 4.3.

Cada uno de las estaciones en las que se practicó una tomografía mantiene el código de identificación que se le asignó durante las campañas de campo del proyecto, este código alfanumérico está conformado por 11 caracteres: las dos primeras letras permiten identificar el municipio (Be para Bello, Co para Copacabana, Gi en Girardota y Ba para el caso de Barbosa), seguido del símbolo \_ se incluyó el prefijo GEO que indica que el sitio fue objeto de control geológico, finalmente después del símbolo \_ se asignan cuatro dígitos que constituyen números consecutivos correspondientes a las visitas de campo realizadas durante la ejecución del proyecto.

**Tabla 4.2. Localización de las Tomografías Eléctricas en el norte del Valle de Aburrá.**

CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE ESTACIÓN	E	N	UNIDAD GEOLÓGICA
Be_GEO_0027	TOMOGRAFÍA 1 BELLO	837.116	1'191.457	Qal
Be_GEO_0028	TOMOGRAFÍA 2 BELLO	839.450	1'193.423	Qal
Be_GEO_0029	TOMOGRAFÍA 3 BELLO	840.481	1'194.454	QFIII
Co_GEO_0028	TOMOGRAFÍA 4 COPACABANA	840.168	1'193.024	QII
Co_GEO_0029	TOMOGRAFÍA 5 COPACABANA	840.712	1'192.124	NQFII
Co_GEO_0030	TOMOGRAFÍA 6 COPACABANA	841.036	1'192.150	NQFII
Gi_GEO_0034	TOMOGRAFÍA 7 GIRARDOTA	845.120	1'197.487	QFIII
Gi_GEO_0035	TOMOGRAFÍA 8 GIRARDOTA	846.208	1'196.654	QFIII
Gi_GEO_0036	TOMOGRAFÍA 9 GIRARDOTA	847.173	1'196.750	NQFII
Gi_GEO_0037	TOMOGRAFÍA 10 GIRARDOTA	848.732	1'196.372	QFIII
Gi_GEO_0038	TOMOGRAFÍA 11 GIRARDOTA	847.646	1'197.652	Qal
Gi_GEO_0039	TOMOGRAFÍA 12 GIRARDOTA	849.024	1'198.753	Qal
Gi_GEO_0040	TOMOGRAFÍA 13 GIRARDOTA	850.897	1'199.016	Qal
Ba_GEO_0061	TOMOGRAFÍA 14 BARBOSA	853.083	1'200.774	Qal
Ba_GEO_0062	TOMOGRAFÍA 15 BARBOSA	853.139	1'201.579	QFIII
Ba_GEO_0063	TOMOGRAFÍA 16 BARBOSA	855.230	1'201.490	QFIII
Ba_GEO_0064	TOMOGRAFÍA 17 BARBOSA	860.786	1'203.839	Qal
Ba_GEO_0065	TOMOGRAFÍA 18 BARBOSA	861.825	1'203.093	QFIII
Ba_GEO_0066	TOMOGRAFÍA 19 BARBOSA	860.874	1'204.228	Qal
Ba_GEO_0067	TOMOGRAFÍA 20 BARBOSA	861.361	1'205.276	QFIV





Desde la Figura 4.5 hasta la Figura 4.24, se registra para cada una de las tomografías el resultado de la interpretación lograda y, cuando se dispuso de ellas, una fotografía del sitio en el que se practicaron. Para cada sección se indica el significado de las tonalidades de colores diferenciando depósitos no consolidados y saturados con agua, depósitos secos y la presencia de roca meteorizada o dura. Para cada sección se indica, cuando se logró detectar, la dirección del flujo de agua.

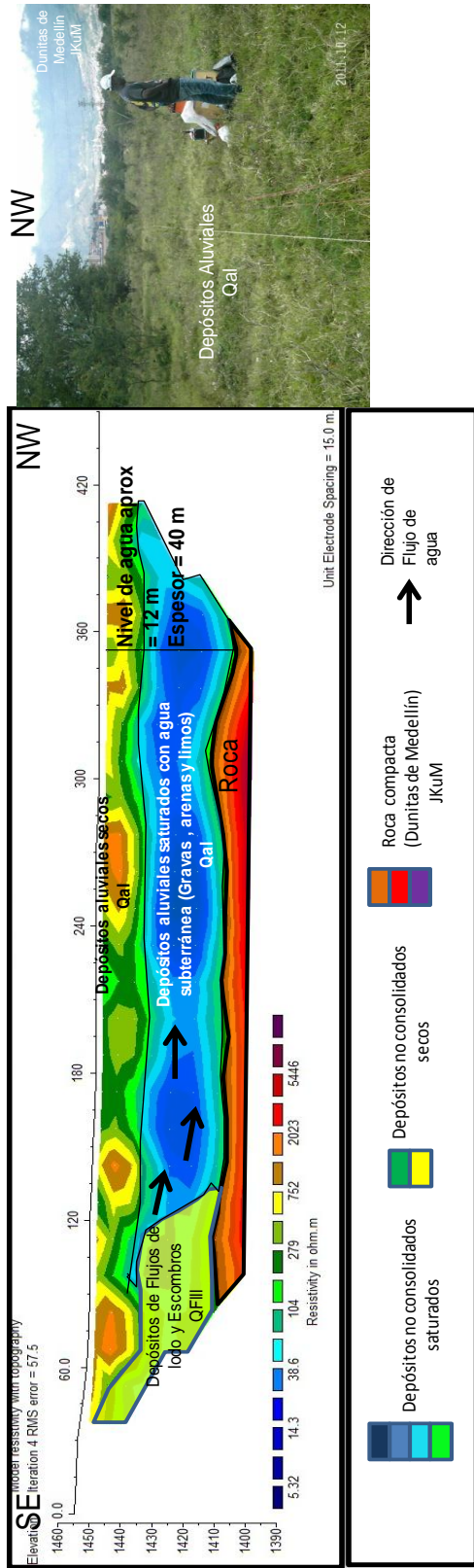


Figura 4.5. Sección estratigráfica interpretativa Be\_GEO\_0027 (Bello).

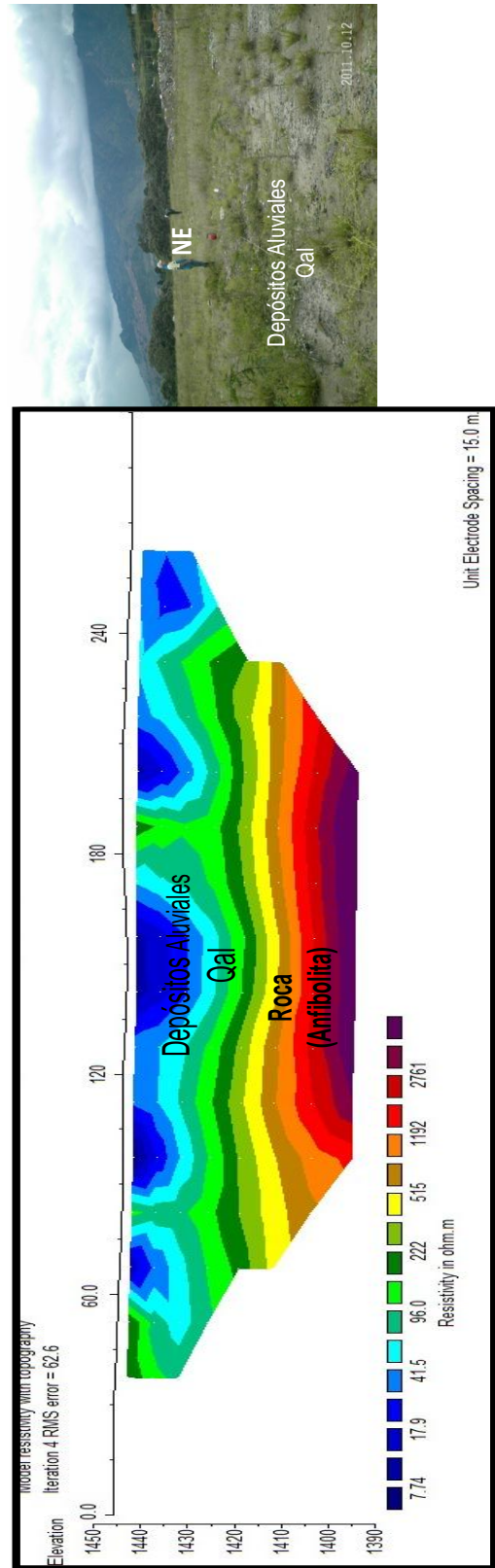


Figura 4.6. Sección estratigráfica interpretativa Be\_GEO\_0028 (Bello)

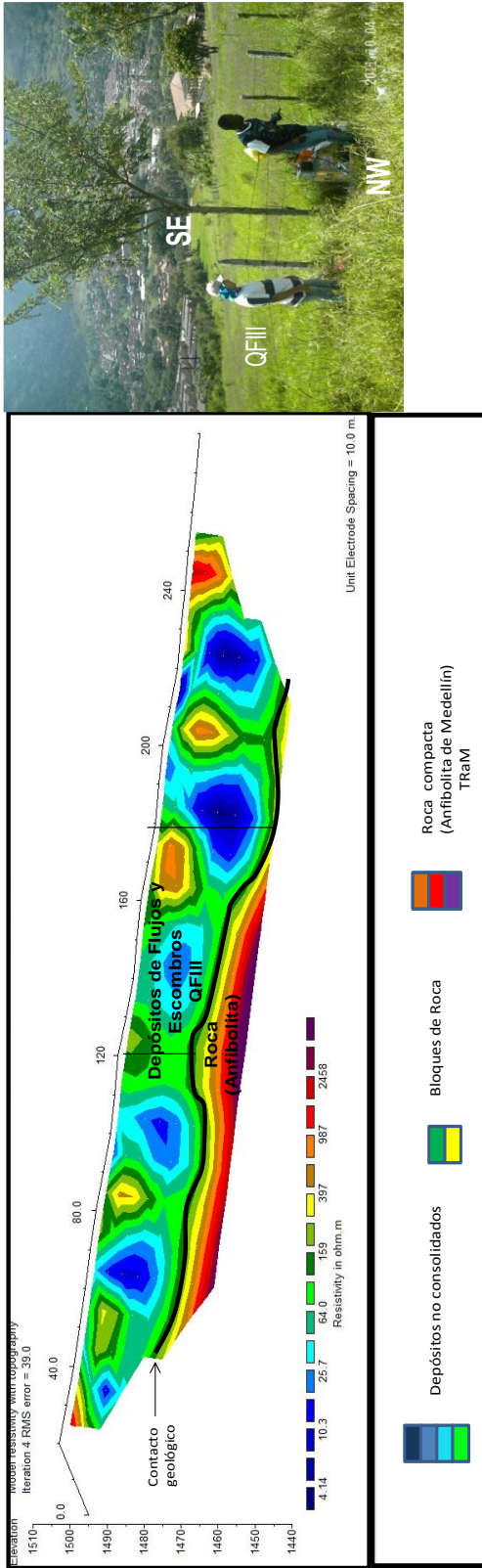


Figura 4.7. Sección estratigráfica interpretativa Be\_GEO\_0029 (Bello).

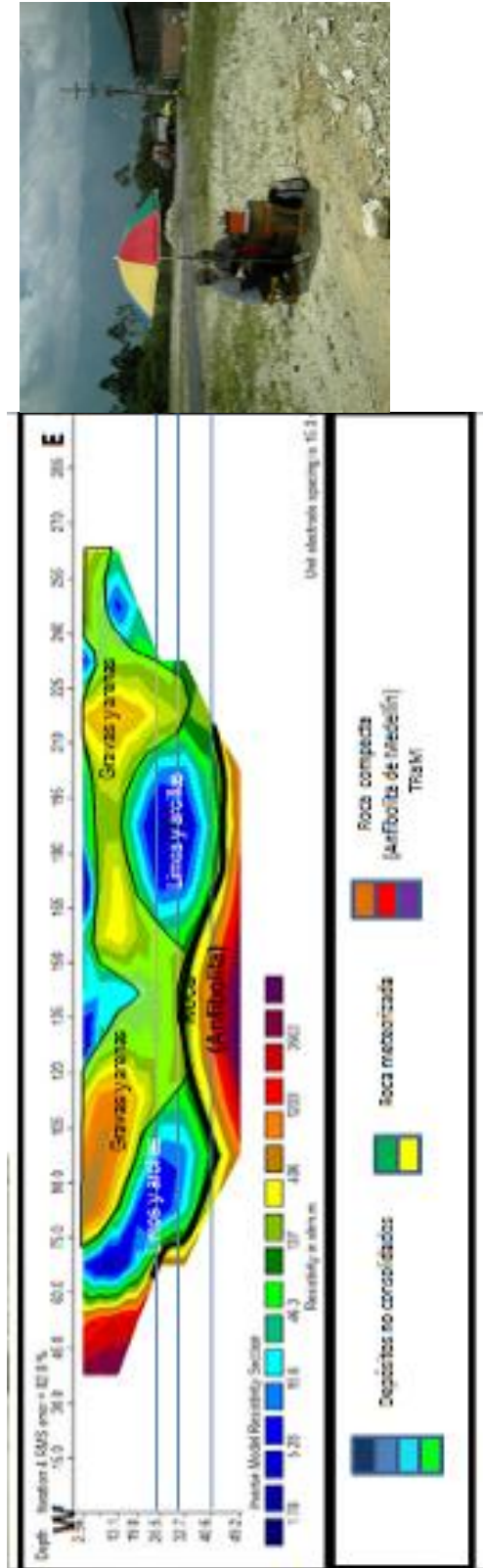


Figura 4.8. Sección estratigráfica interpretativa Co\_GEO\_0028 (Copacabana)

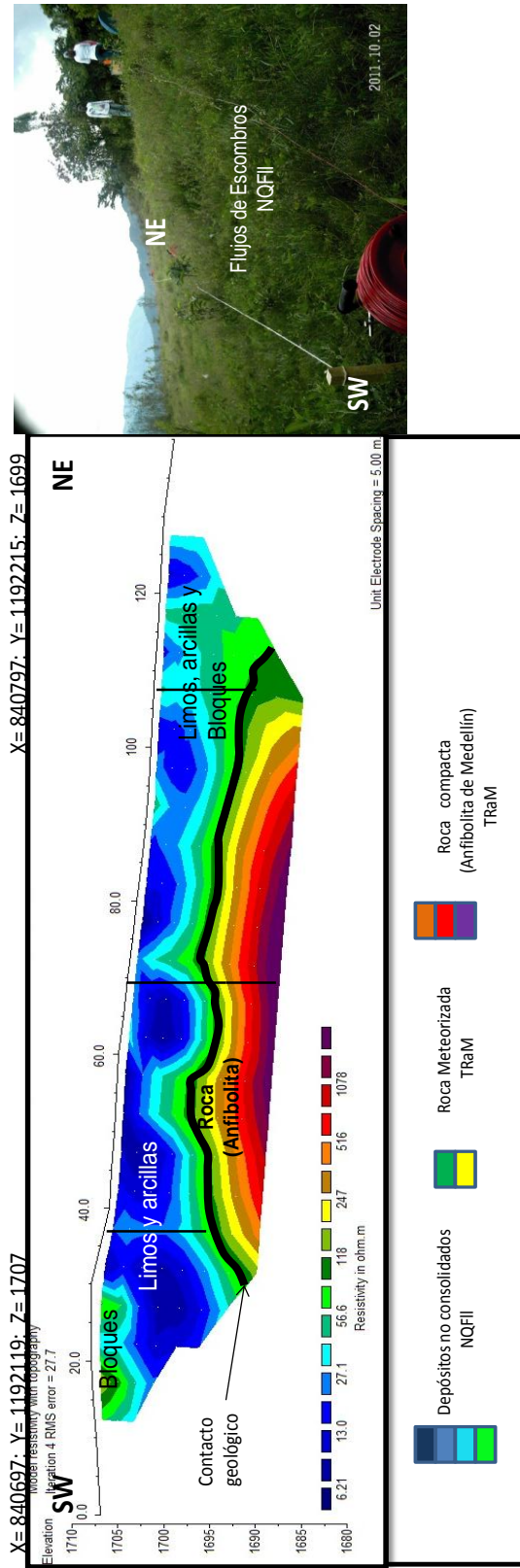


Figura 4.9. Sección estratigráfica interpretativa Co\_GEO\_0029 (Copacabana)

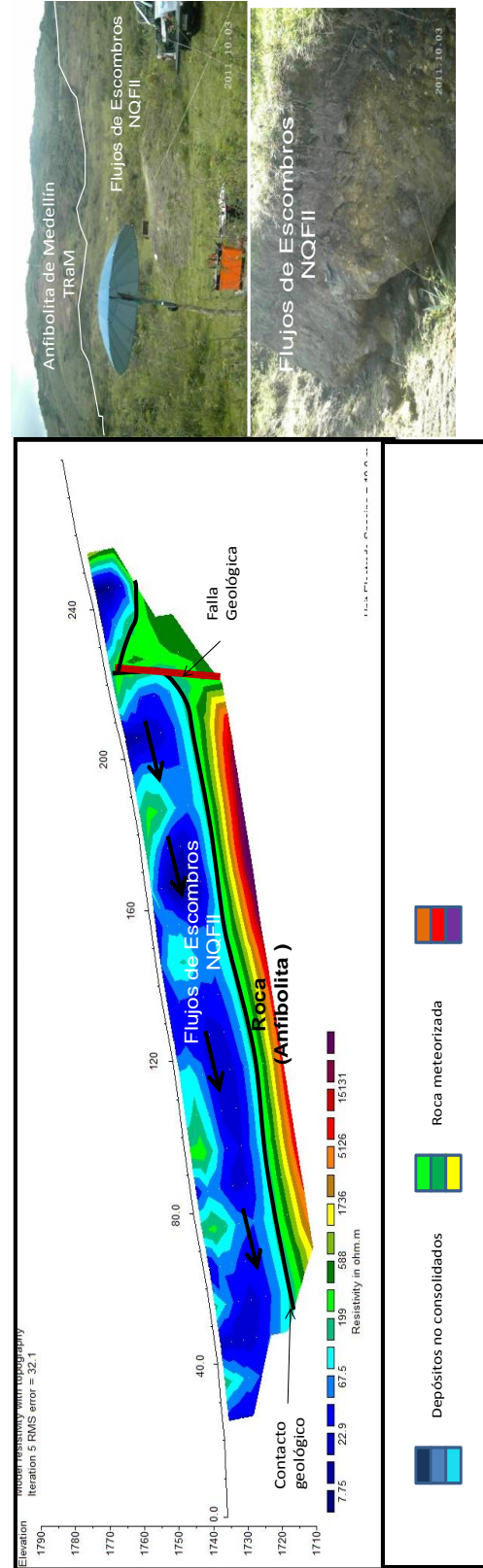


Figura 4.10. Sección estratigráfica interpretativa Co\_GEO\_0030 (Copacabana)

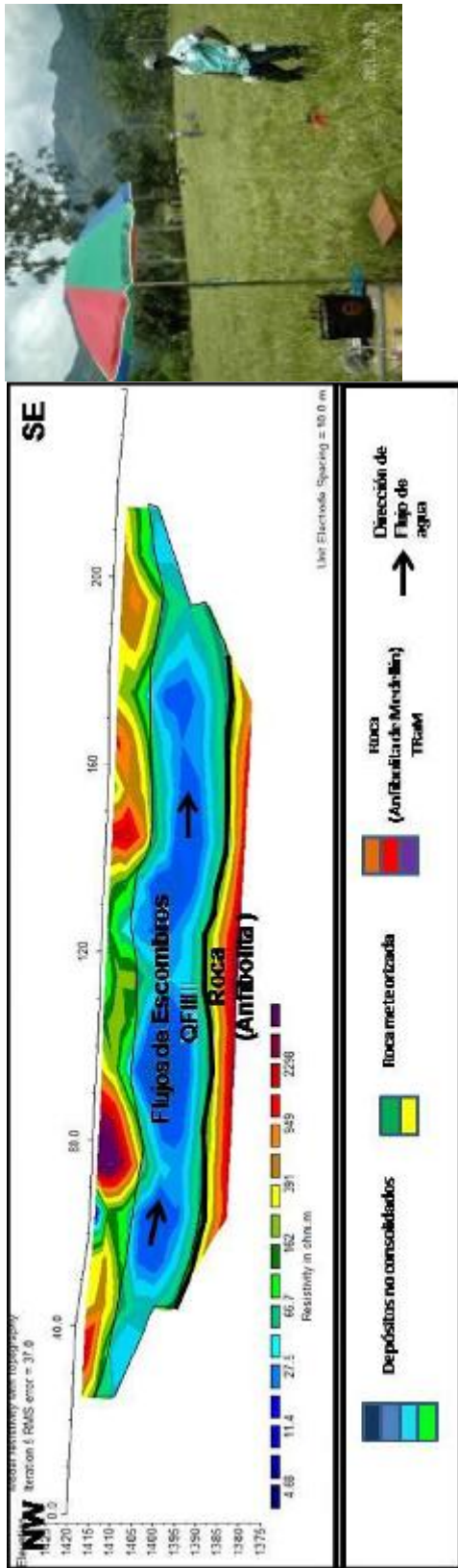


Figura 4.11. Sección estratigráfica interpretativa Gi\_GEO\_0034 (Girardota)

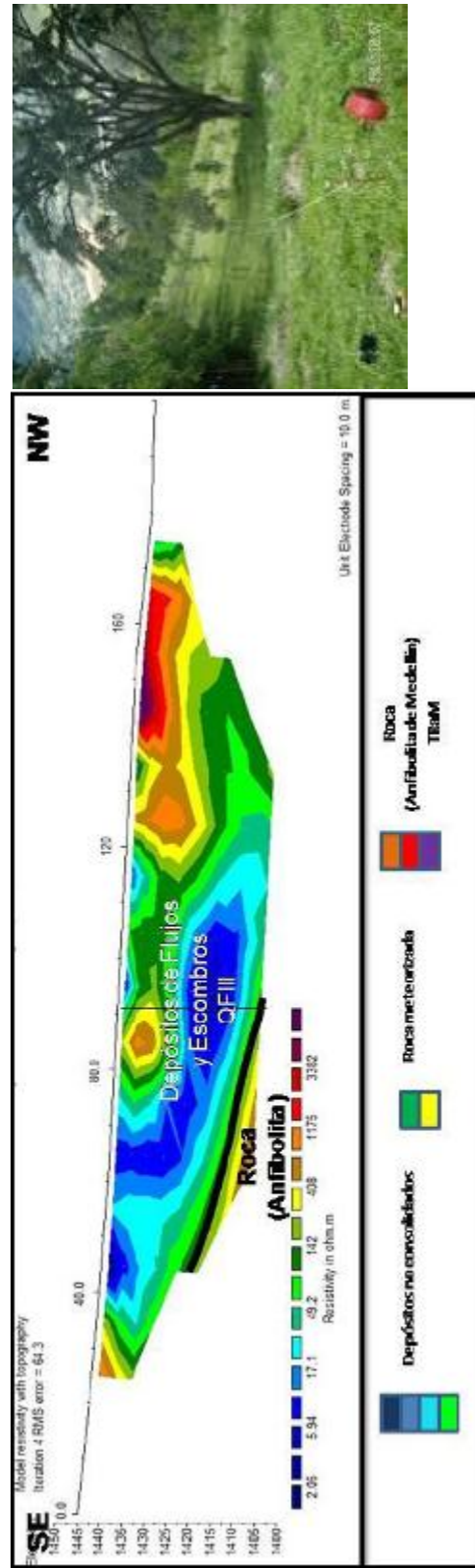


Figura 4.12. Sección estratigráfica interpretativa Gi\_GEO\_0035 (Girardota)

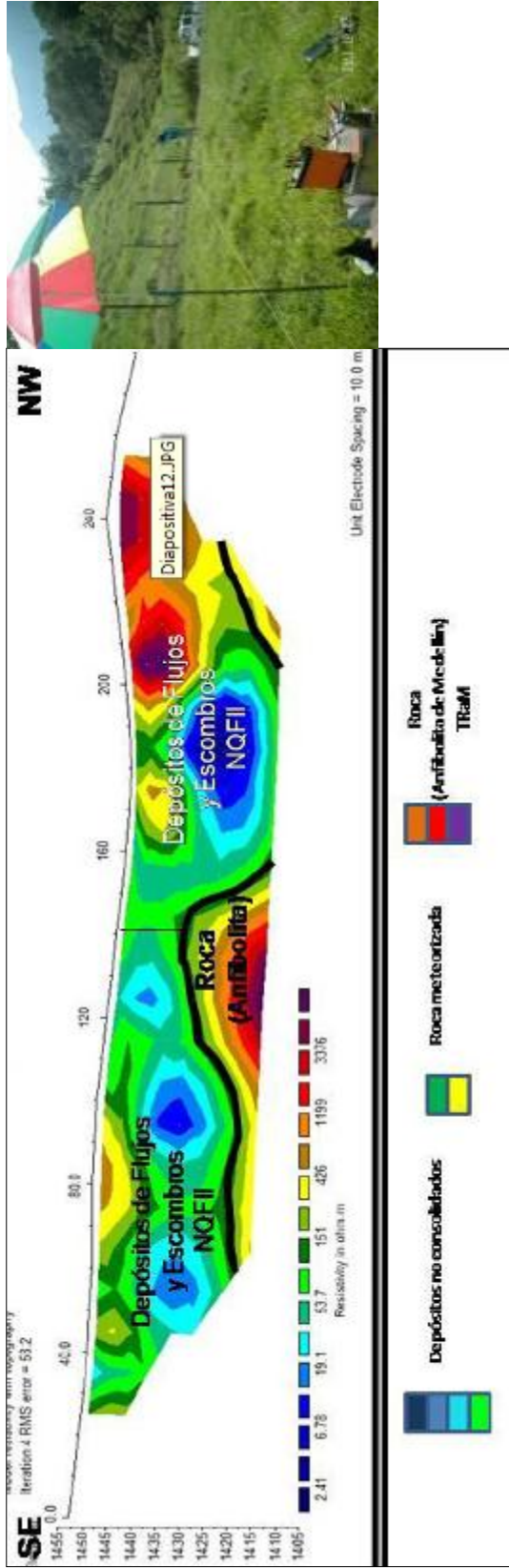


Figura 4.13. Sección estratigráfica interpretativa Gi\_GEO\_0036 (Girardota)

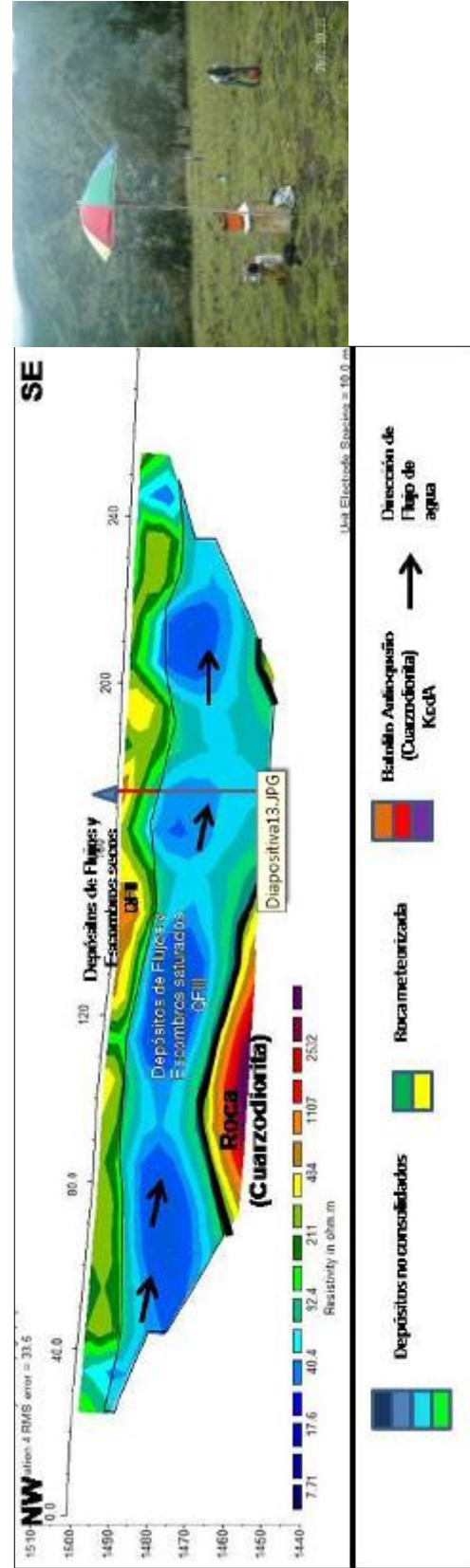


Figura 4.14. Sección estratigráfica interpretativa Gi\_GEO\_0037 (Girardota)

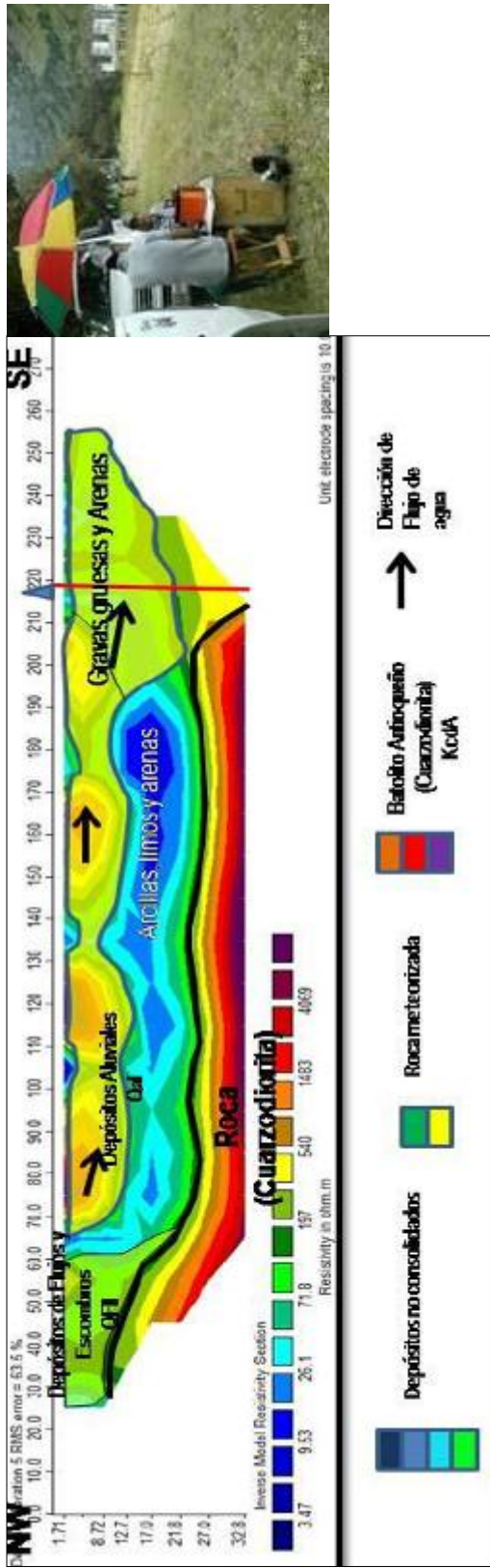


Figura 4.15. Sección estratigráfica interpretativa Gi\_GEO\_0038 (Girardota)

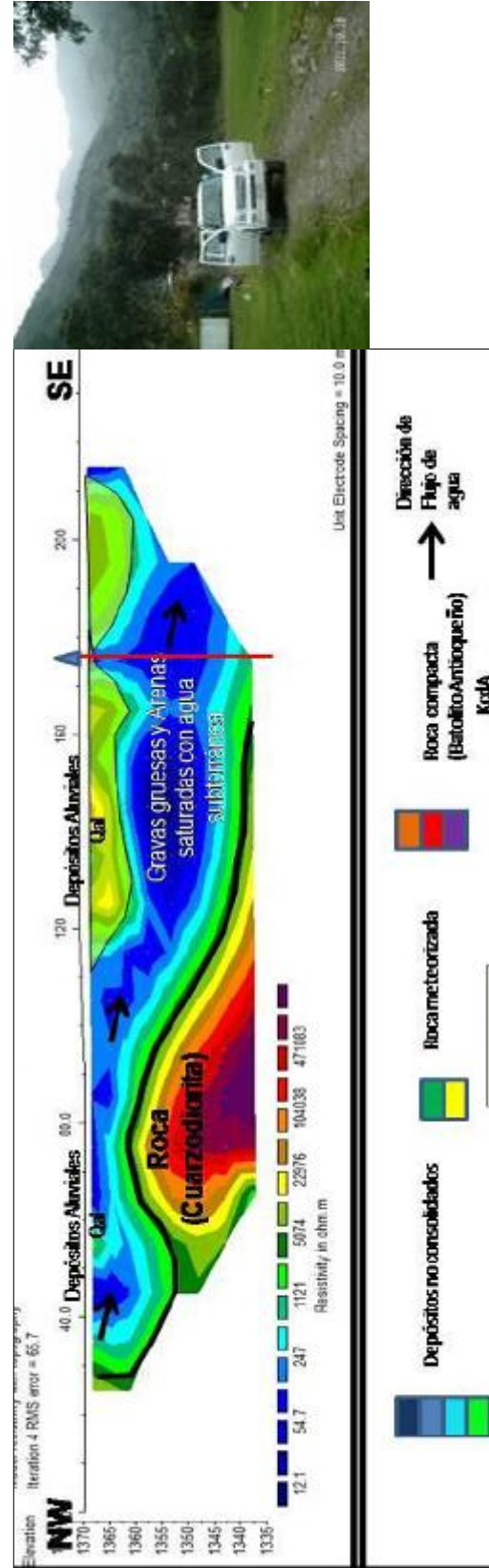


Figura 4.16. Sección estratigráfica interpretativa Gi\_GEO\_0039 (Girardota)



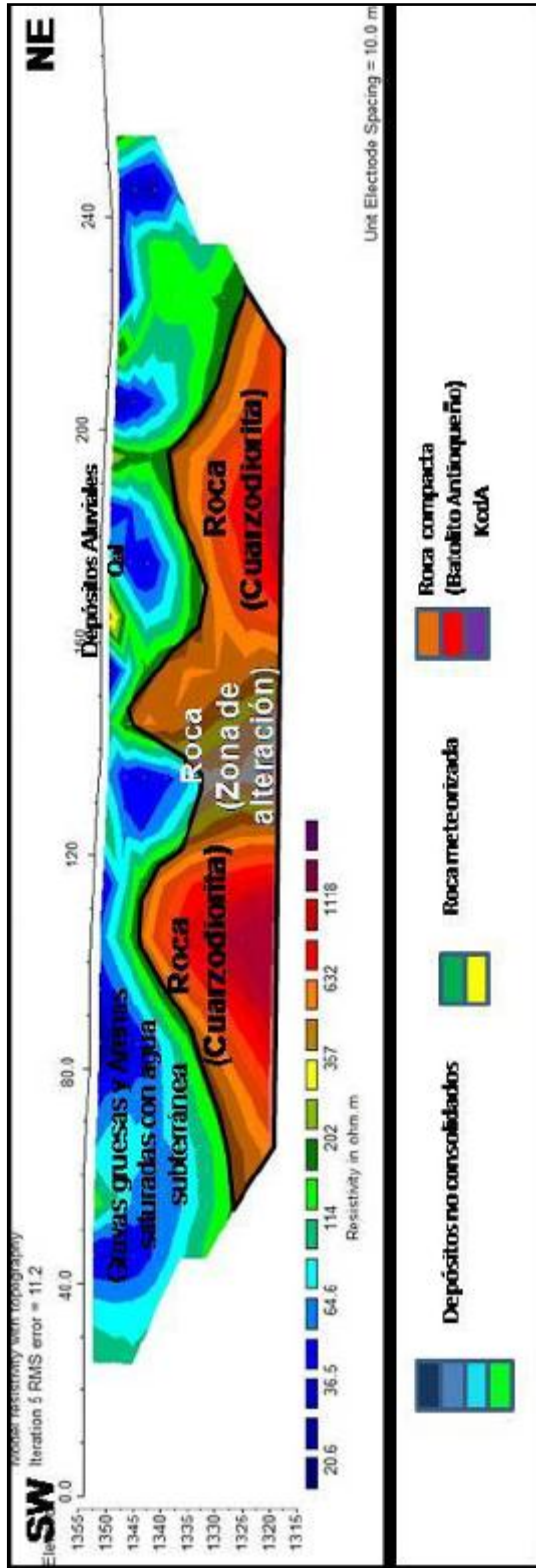


Figura 4.17. Sección estratigráfica interpretativa Gi\_GEO\_0040 (Girardota)

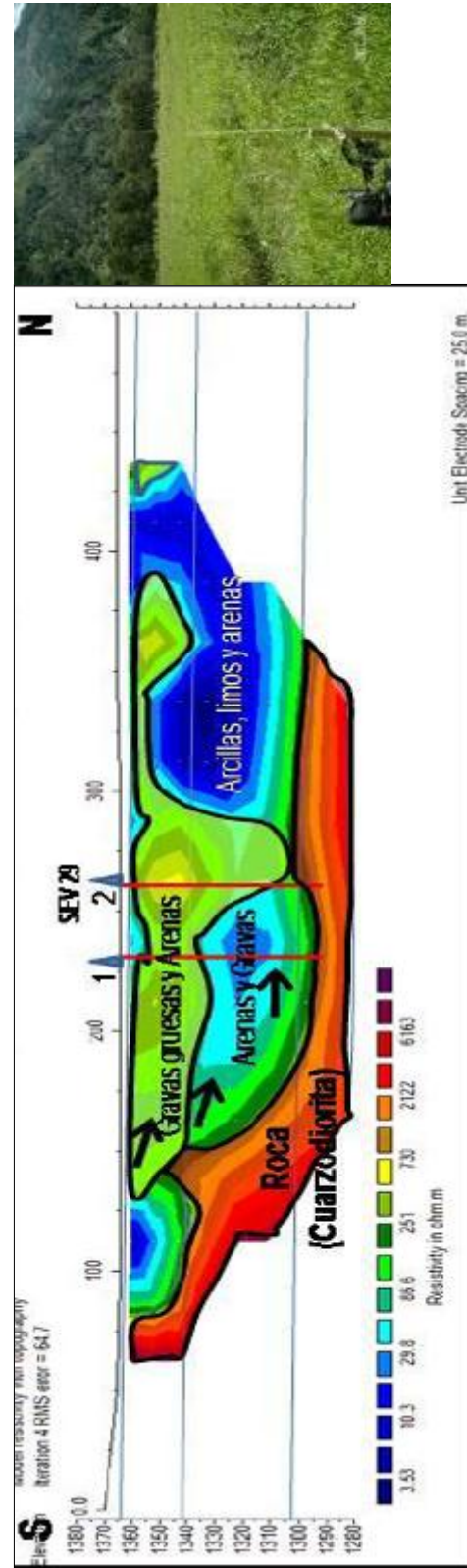


Figura 4.18. Sección estratigráfica interpretativa Ba\_GEO\_0061 (Barbosa)

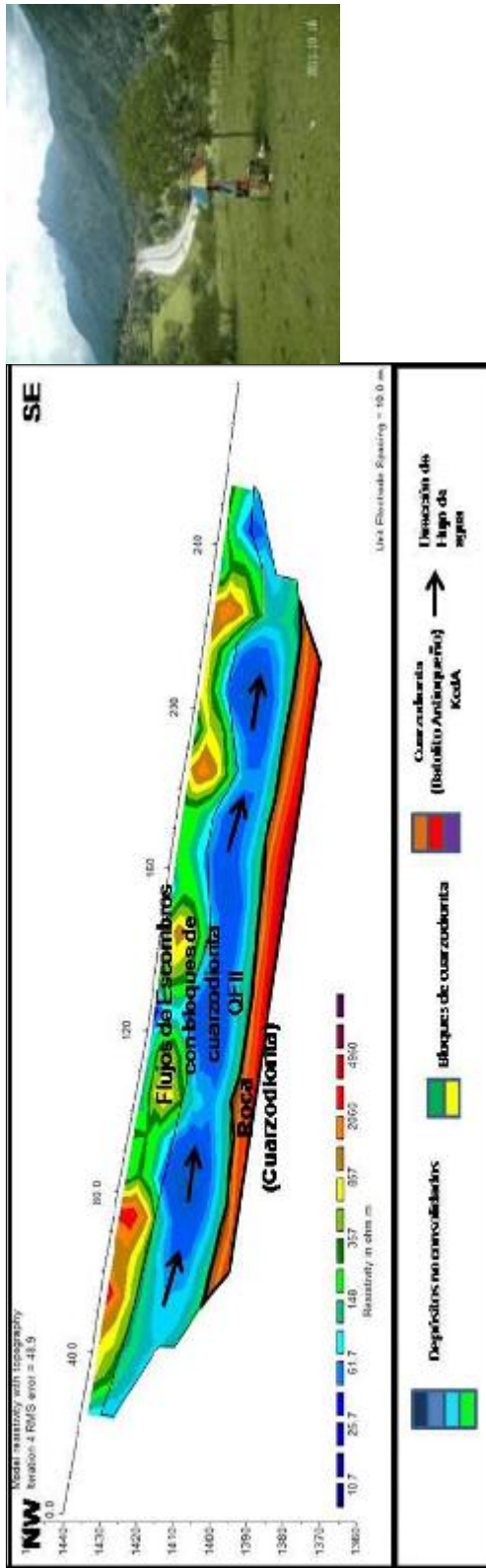


Figura 4.19. Sección estratigráfica interpretativa Ba\_GEO\_0062 (Barbosa)

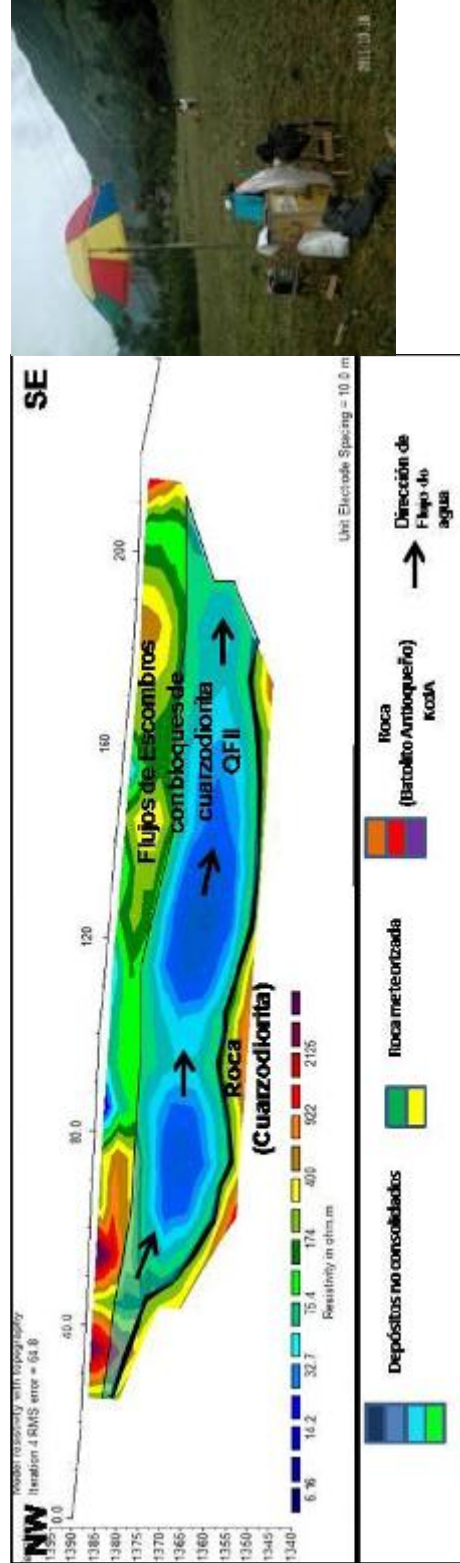


Figura 4.20. Sección estratigráfica interpretativa Ba\_GEO\_0063 (Barbosa)

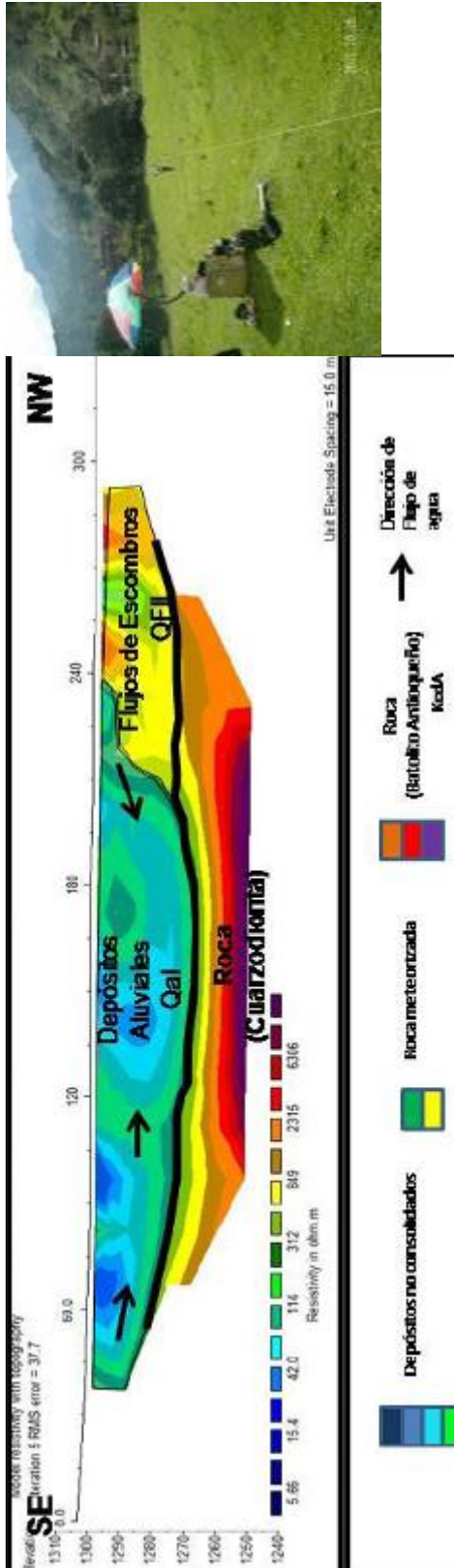


Figura 4.21. Sección estratigráfica interpretativa Ba\_GEO\_0064 (Barbosa)

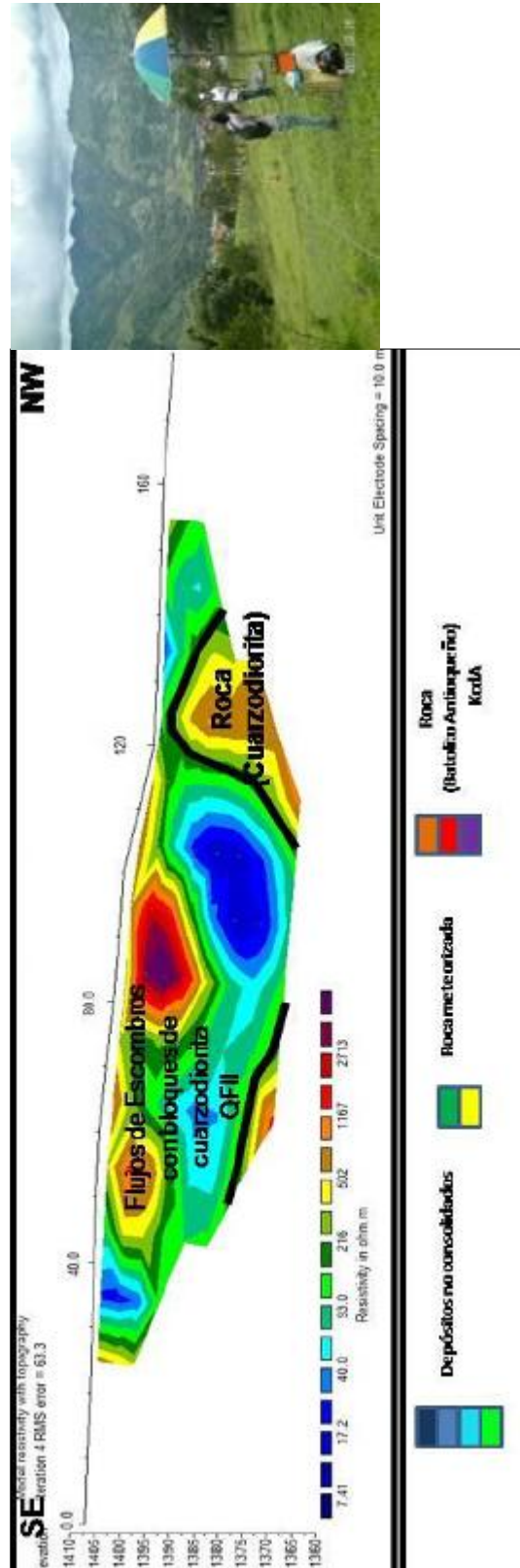


Figura 4.22. Sección estratigráfica interpretativa Ba\_GEO\_0065 (Barbosa)

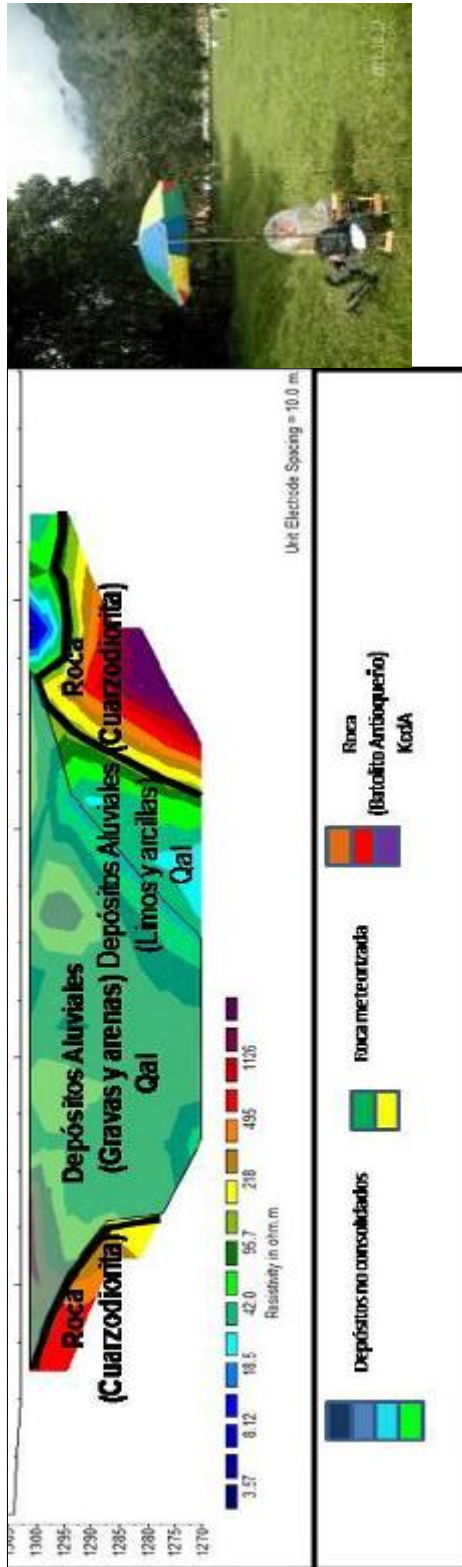


Figura 4.23. Sección estratigráfica interpretativa Ba\_GEO\_0066 (Barbosa)

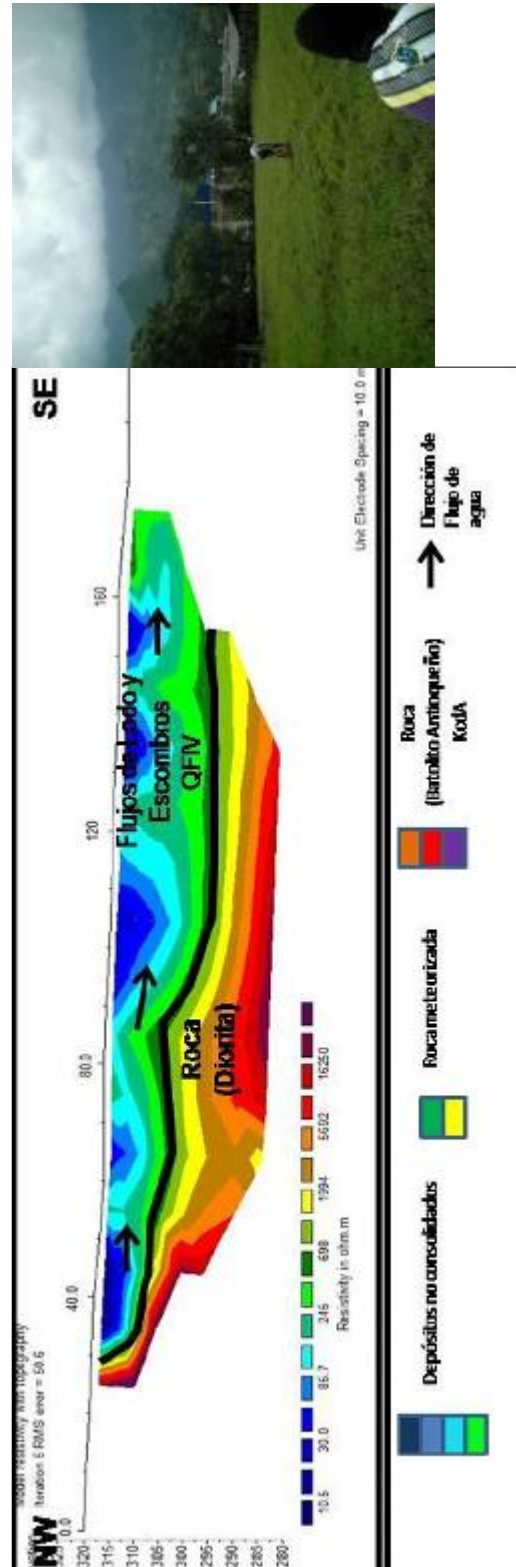


Figura 4.24. Sección estratigráfica interpretativa Ba\_GEO\_0067 (Barbosa)

Los resultados obtenidos a partir de las tomografías eléctricas, se han sintetizado y consignado en la Tabla 4.3, en ella se incluyen el espesor de los depósitos no consolidados como sus rangos de resistividad y el de las rocas en profundidad.

En la tomografía Be\_GEO\_0027, Figura 4.5 en el municipio de Bello, se alcanzó una profundidad de exploración de 45 metros, antes de llegar al basamento de roca correspondiente a la dunita de Medellín, en sentido sureste noroeste se pasa de depósitos de flujo de escombros a un lleno aluvial saturado en agua.

La sección Be\_GEO\_0028, Figura 4.6 también en Bello, muestra las variaciones laterales en las facies de un flujo de escombros depositado sobre roca tipo anfibolita, esta sección alcanzo profundidades de exploración de 26 metros

La sección Be\_GEO\_0029, Figura 4.7 realizada en el municipio de Bello con espaciamentos de electrodos cada 10 metros y una longitud total de 260 metros, muestra intercalaciones de depósitos de Flujos de escombros y bloques, con profundidades de 20 metros antes de llegar al contacto con la Anfibolita de Medellín.

La sección Co\_GEO\_0028, Figura 4.8 realizada en el municipio de Copacabana alcanzó una profundidad de exploración de 49 metros y una longitud de sección de 220 metros. En sentido oeste-este se pasa de Roca dura y compacta procedente de la Anfibolita de Medellín a lentes de limo y arcilla separados por una banda definida y continua de depósitos no consolidados de gravas y arenas. Se aprecia la línea de contacto a una profundidad promedio de 35 metros con la anfibolita de Medellín.

La sección Co\_GEO\_0029, Figura 4.9 realizada en el municipio de Copacabana alcanzó una profundidad de exploración de 18 metros de profundidad y una longitud de sección de 120 metros. En sentido suroeste-noreste se encuentran depósitos no consolidados de limos, arcillas y bloques pertenecientes a la unidad geológica NQFII, a una profundidad aproximada de 9 metros se logra localizar el contacto geológico con la Anfibolita de Medellín.

La sección Co\_GEO\_0030, Figura 4.10 realizada en el municipio de Copacabana alcanzó una profundidad de exploración de 25 metros y una longitud de sección de 220 metros. En dirección sur-norte en el sentido de la pendiente, se observa en los primeros 40 metros de longitud de sección la ocurrencia de una falla geológica que desplaza el contacto litológico entre la roca dura y los depósitos no consolidados, los flujos de escombros en toda la longitud del corte se encuentran saturados de agua.

La sección Gi\_GEO\_0034, Figura 4.11 realizada en el municipio de Girardota alcanzó una profundidad de exploración de 35 metros y una longitud se sección de 180 metros en sentido noroeste-sureste. Se localiza un depósito de flujos de escombros en toda la continuidad del perfil saturado de agua y delimitado en su parte superior por bloques de Anfibolita meteorizada y en su parte inferior por el contacto geológico con la Anfibolita de Medellín.

La sección Gi\_GEO\_0035, Figura 4.12 realizada en el municipio de Girardota alcanzó una profundidad de exploración de 30 metros y una longitud se sección de 150 metros en sentido sureste-noroeste. Se observa un depósito de flujos y escombros en toda su

extensión con presencia de un bloque de roca anfibolita en su extremo superior noroeste, el contacto en su base con la roca dura tipo anfibolita posee una inclinación en sentido de la sección y se pierde en la mitad de su sección alcanzando posiblemente profundidades de interés hidrogeológico mayores a las registradas en dicha tomografía.

La sección Gi\_GEO\_0036, Figura 4.13 realizada en el municipio de Girardota alcanzó una profundidad de exploración de 35 metros y una longitud de sección de 220 metros en sentido sureste-noroeste. Se observa un depósito de flujos y escombros en toda su extensión con presencia de un bloque de roca anfibolita en su extremo superior noroeste, el contacto en su base con la roca dura tipo anfibolita es irregular en toda su sección y aparece a los 25 metros de profundidad aproximadamente.

La sección Gi\_GEO\_0037, Figura 4.14 realizada en el municipio de Girardota alcanzó una profundidad de exploración de 40 metros y una longitud de sección de 220 metros en sentido noroeste-sureste. Hacia los 10 m de profundidad se observa como el depósito de flujo de escombros en toda su extensión se encuentra saturado de agua, presentando un contacto irregular con el basamento perteneciente al batolito antioqueño en su nivel inferior.

La sección Gi\_GEO\_0038, Figura 4.15 realizada en el municipio de Girardota alcanzó una profundidad de exploración de 30 metros y una longitud de sección de 230 metros en sentido noroeste-sureste. En su extremo noroeste se aprecia claramente el contacto y el cambio de interfaz del depósito de flujos de escombros pasando a un lente de limos y arenas, confinado en su parte superior por un depósito aluvial constituido por gravas gruesas y arenas y en su parte inferior, a una profundidad aproximada de 20m medidos desde la superficie, por el contacto geológico con el Batolito antioqueño el cual es uniforme en toda su extensión.

La sección Gi\_GEO\_0039, Figura 4.16 realizada en el municipio de Girardota alcanzó una profundidad de exploración de 40 metros y una longitud de sección de 190 metros en sentido noroeste-sureste. Se observa la incidencia de un estrechamiento del depósito aluvial hacia la margen izquierda del perfil, por la presencia de la cuarzodiorita procedente del Batolito antioqueño, la cual a medida que se avanza en sentido noroeste-sureste se hace más profunda desapareciendo hacia la margen derecha del corte, se observa además un claro flujo del frente de agua en los depósitos no consolidados.

La sección Gi\_GEO\_0040, Figura 4.17 realizada en el municipio de Girardota alcanzó una profundidad de exploración de 30 metros y una longitud de sección de 230 metros en sentido suroeste-noreste. La profundidad del espesor del depósito aluvial es irregular en toda su extensión alcanzando espesores mínimos de 5 m y máximos de 25 m, los cuales se encuentran saturados de agua, el contacto con la cuarzodiorita es irregular y en la mitad del perfil se detecta una zona de la roca altamente meteorizada.

La sección Ba\_GEO\_0061, Figura 4.18 realizada en el municipio de Barbosa alcanzó una profundidad de exploración de 75 metros y una longitud de sección de 370 metros en sentido sur-norte. Se observan una diferencia textural de un gran depósito, hacia la margen inferior izquierda se posee una composición de arenas y gravas, hacia la parte central y superior izquierda su composición varía a gravas gruesas y arenas y hacia su margen derecha su por arcillas, limos y arenas, el basamento es irregular hacia la margen izquierda

de la sección y estabilizando su profundidad (aproximadamente 50 m) a medida que se avanza a lo largo de la sección.

La sección Ba\_GEO\_0062, Figura 4.19 realizada en el municipio de Barbosa alcanzó una profundidad de exploración de 35 metros y una longitud de sección de 230 metros en sentido noroeste-sureste. En el sentido de la pendiente, se observa en los primeros 10 metros de profundidad de sección, la ausencia de agua en los flujos de escombros, hacia profundidad, con un espesor de aproximadamente 20 m se observa el nivel saturado de la unidad geológica, limitado por el basamento del Batolito antioqueño.

La sección Ba\_GEO\_0063, Figura 4.20 realizada en el municipio de Barbosa alcanzó una profundidad de exploración de 30 metros y una longitud de sección de 190 metros en sentido noroeste-sureste. Se observa en los primeros 7 metros de profundidad de la sección la ausencia de agua en los flujos de escombros, hacia profundidad, con un espesor de aproximadamente 20 m se observa el nivel saturado de esta unidad geológica, limitado por el basamento del Batolito antioqueño.

La sección Ba\_GEO\_0064, Figura 4.21 realizada en el municipio de Barbosa alcanzó una profundidad de exploración de 50 metros y una longitud de sección de 255 metros en sentido sureste-noroeste. Se observa claramente el contacto geológico entre el depósito aluvial y el flujo de escombros en la parte derecha del perfil, generando dos posibles direcciones de flujo hacia el centro de la sección, se alcanzan espesores promedios de 30 metros para la unidad de interés hidrogeológico antes de hacer contacto con el batolito antioqueño.

La sección Ba\_GEO\_0065, Figura 4.22 realizada en el municipio de Barbosa alcanzó una profundidad de exploración de 35 metros y una longitud de sección de 130 metros en sentido sureste-noroeste. La sección presenta irregularidad en el contacto geológico con la roca meteorizada de la cuarzodiorita procedente del Batolito antioqueño en la base de la sección, este espesor varía de los 2 m a los 35 m, hacia la mitad de la sección no se registra su contacto con el basamento. La unidad de interés hidrogeológico se encuentra conformada por flujos de escombros y bloques de cuarzodiorita.

La sección Ba\_GEO\_0066, Figura 4.23 realizada en el municipio de Barbosa alcanzó una profundidad de exploración de 30 metros y una longitud de sección de 150 metros en sentido oeste-este. La unidad de interés hidrogeológico comprendida por depósitos aluviales, se encuentra acotada en sus extremos por el Batolito antioqueño sin alcanzarse la profundidad del basamento en el centro de la sección.

La sección Ba\_GEO\_0067, Figura 4.24 realizada en el municipio de Barbosa alcanzó una profundidad de exploración de 30 metros y una longitud de sección de 150 metros en sentido noroeste-sureste. La sección se encuentra compuesta por la unidad de flujos de lodos y escombros con espesores promedio de 20 m, la cual entra en contacto en toda su extensión con la diorita procedente del Batolito antioqueño, se observa un flujo de agua en sentido noroeste-sureste hasta el final de la sección.

**Tabla 4.3. Resultados de las mediciones de Resistividad Eléctrica y espesores.**

TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	ESPESOR DEPÓSITOS/PR OFUNDIDAD TECHO ROCA (M)	RESISTIVIDAD DEPÓSITOS NO CONSOLIDADOS (OHM-M)	UNIDAD GEOLÓGICA	RESISTIVIDAD ROCA (OHM-M)	UNIDAD GEOLÓGICA
Be_GEO_0027	12 - 45	100 - 1000 10 - 100	Depósitos Aluviales secos y Saturados (QaI)	300 - 6000	Dunitas de Medellín JKuM
Be_GEO_0028	22 - 26	10 - 100	Depósitos Aluviales Saturados (QaI)	200 - 3000	Anfibolita de Medellín TRaM
Be_GEO_0029	20 - 35	10 - 500	Depósitos de Flujos y Escombros parcialmente saturados (QFIII)	200 - 3000	Anfibolita de Medellín TRaM
Co_GEO_0028	25 - 43 (150)	5 - 1200	Depósitos Aluviales parcialmente saturados (QaI)	200 - 4000	Anfibolita de Medellín TRaM
Co_GEO_0029	7 - 17	6 - 70	Depósitos de Flujos y Escombros parcialmente saturados (NQFII)	100 - 1500	Anfibolita de Medellín TRaM
Co_GEO_0030	15 - 25	7 - 200	Depósitos de Flujos y Escombros parcialmente saturados (NQFII)	500 - 20000	Anfibolita de Medellín TRaM
Gi_GEO_0034	22 - 27	5 - 100	Depósitos de Flujos y Escombros parcialmente saturados (QFIII)	200 - 3000	Anfibolita de Medellín TRaM
Gi_GEO_0035	15 - 35	5 - 1100	Depósitos de Flujos y Escombros parcialmente saturados (QFIII)	150 - 4000	Anfibolita de Medellín TRaM
Gi_GEO_0036	12 - 35	6 - 80	Depósitos de Flujos y Escombros parcialmente saturados (NQFII)	150 - 4000	Anfibolita de Medellín TRaM
Gi_GEO_0037	25 - 45	7 - 1100	Depósitos de Flujos y Escombros parcialmente saturados (QFIII)	200 - 3000	Batolito Antioqueño (Cuarzo diorita ) KcdA
Gi_GEO_0038	15 - 35	9 - 1000	Depósitos Aluviales parcialmente saturados (QaI)	200 - 5000	Batolito Antioqueño (Cuarzo diorita ) KcdA
Gi_GEO_0039	5 - 35	12 - 300	Depósitos Aluviales parcialmente saturados (QaI)	1000 - 500000	Batolito Antioqueño (Cuarzo diorita ) KcdA
Gi_GEO_0040	5 - 25	20 - 120	Depósitos Aluviales parcialmente saturados (QaI)	200 - 2000	Batolito Antioqueño (Cuarzo diorita ) KcdA
Ba_GEO_0061	1 - 60	10 - 700	Depósitos Aluviales parcialmente saturados (QaI)	200 - 7000	Batolito Antioqueño (Cuarzo diorita ) KcdA
Ba_GEO_0062	25 - 38	10 - 2000	Depósitos de Flujos y Escombros parcialmente saturados (QFIII)	400 - 5000	Batolito Antioqueño (Cuarzo diorita ) KcdA
Ba_GEO_0063	10 - 35	6 - 1000	Depósitos de Flujos y Escombros parcialmente saturados (QFIII)	200 - 3000	Batolito Antioqueño (Cuarzo diorita ) KcdA
Ba_GEO_0064	2 - 32	10 - 120	Depósitos Aluviales parcialmente saturados	300 - 7000	Batolito Antioqueño



TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	ESPESOR DEPÓSITOS/PROFUNDIDAD TECHO ROCA (M)	RESISTIVIDAD DEPÓSITOS NO CONSOLIDADOS (OHM-M)	UNIDAD GEOLÓGICA	RESISTIVIDAD ROCA (OHM-M)	UNIDAD GEOLÓGICA
			(Qal)		(Cuarzo diorita ) KcdA
Ba_GEO_0065	3 - 44	7 - 1200	Depósitos de Flujos y Escombros parcialmente saturados (QFIII)	200 - 3000	Batolito Antioqueño (Cuarzo diorita ) KcdA
Ba_GEO_0066	2 - 35	10 - 100	Depósitos Aluviales Saturados (Qal)	150 - 1500	Batolito Antioqueño (Cuarzo diorita ) KcdA
Ba_GEO_0067	2 - 20	10 - 500	Depósitos de Flujos y Escombros parcialmente saturados (QFIV)	500 - 20000	Batolito Antioqueño (Diorita ) KcdA

### Perforaciones Exploratorias

A partir de los resultados de las tomografías se identifica un conjunto de puntos recomendados para realizar actividades de exploración directa mediante perforaciones y construcción de piezómetros (Tabla 4.4). De acuerdo con el Artículo 146 del Decreto 1541 de 1978, siendo el propósito de estas perforaciones el de mejorar el conocimiento del acuífero y permitir el monitoreo del mismo, no se requiere permiso de exploración por parte de la Autoridad Ambiental competente, así lo confirmó CORANTIOQUIA mediante el comunicado 130 AN - 1011-3676 expedido por la Dirección Territorial Aburrá Norte el día 31 de octubre de 2011 (Anexo 4.4). Dentro de este proyecto se contó con posibilidades de efectuar 100 metros de exploración directa, luego de intentar realizar contacto con los propietarios de los predios en los que se localizan los sitios recomendados, y de considerar como condición deseable que las obras se efectuaran en lugares pertenecientes a entidades públicas, empresas consolidadas o particulares con tiempo largo de tenencia de tierras, se obtuvo autorización para efectuar la perforación y construcción de piezómetros en los siguientes cuatro sitios: Aserrió Antioqueña de Estivas (Copacabana), Hacienda El Progreso de la Universidad de Antioquia (Barbosa), Planta de Potabilización de Empresas Públicas de Medellín (Barbosa) y en la empresa COLGRASS (Girardota). En la Figura 4.25 a la Figura 4.28 se dibujaron las columnas producto de las perforaciones realizadas en este estudio y en el Anexo 4.4 se incluye el informe de las actividades de perforación.

**Tabla 4.4. Sitios recomendados adelantar perforaciones exploratorias.**

SITIO	TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	E	N	Z
Finca B2. Bello	1	837116	1191457	1449
Aserrió Antioqueña de Estivas. Copacabana	4	840168	1193024	1440
Finca 200 m al Norte del parador Gallo Tuerto. Girardota	7	845120	1197487	1414
Lote frente a Torres de Santa Ana. Girardota	10	848732	1196732	1490
Lote de Arquitectos e Ingenieros AIA Ltda. Girardota	12	849024	1198753	1370
COLGRASS, Girardota	12	849029	1198739	1337
Finca El Progreso U de A. Barbosa	14	853083	1200774	1360
Finca Parque Las Cometas. Barbosa	17	860786	1203839	1298
Finca frente a Tanques EPM. Barbosa	18	861825	1203093	1400
Aluvión del Río Medellín b1. Barbosa	19	860874	1204228	1303

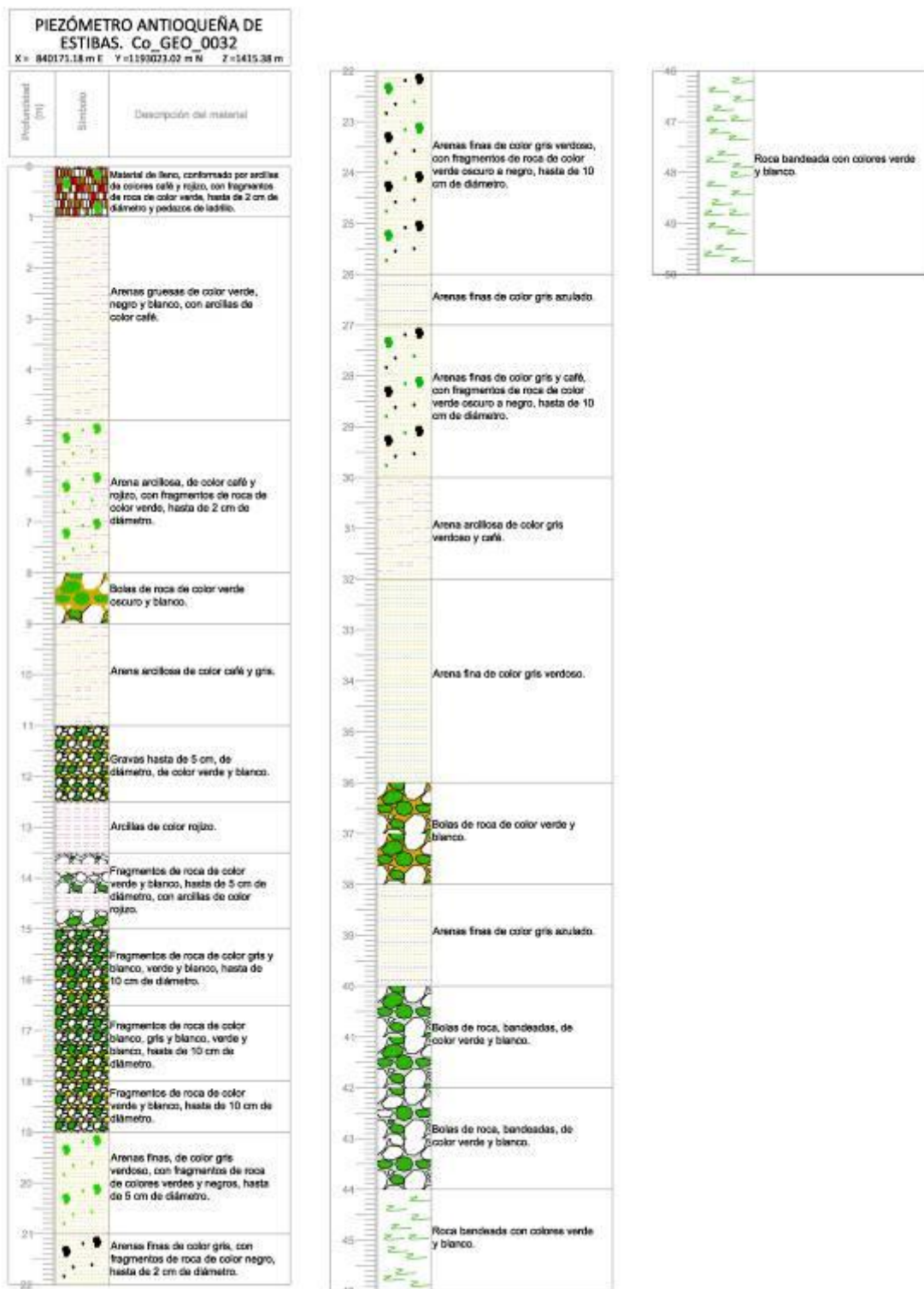
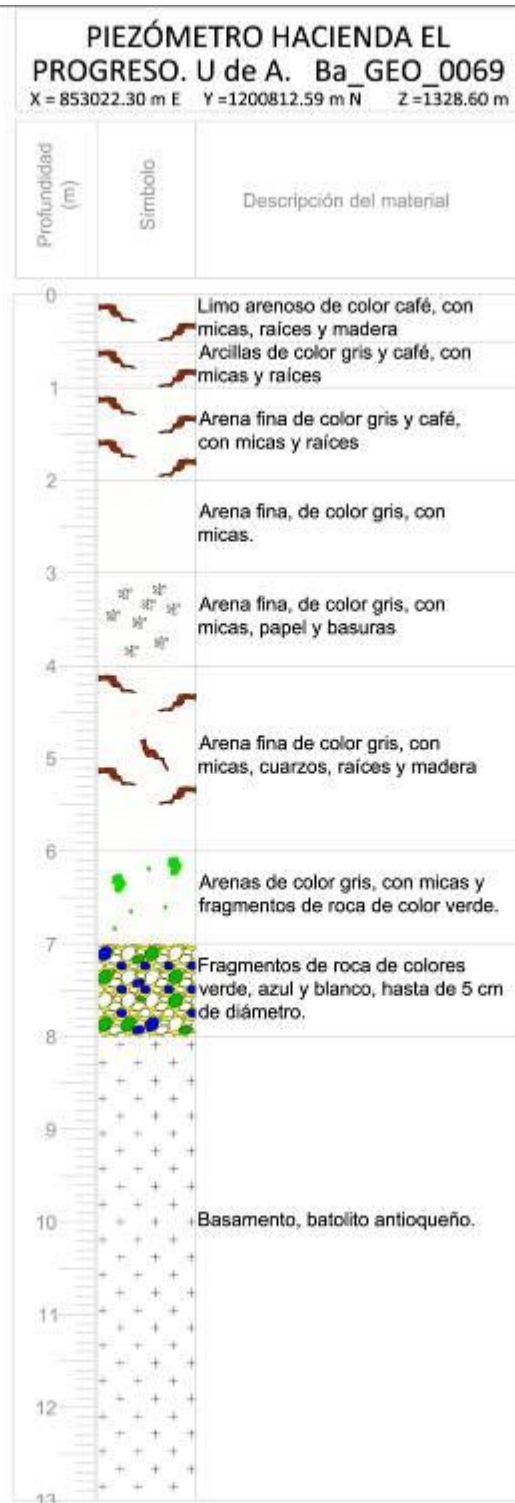


Figura 4.25. Perfil estratigráfico Aserrío Antioqueña de Estivas Copacabana.



**Figura 4.26 Perfil estratigráfico Planta de Potabilización de Empresas Públicas de Medellín Barbosa.**

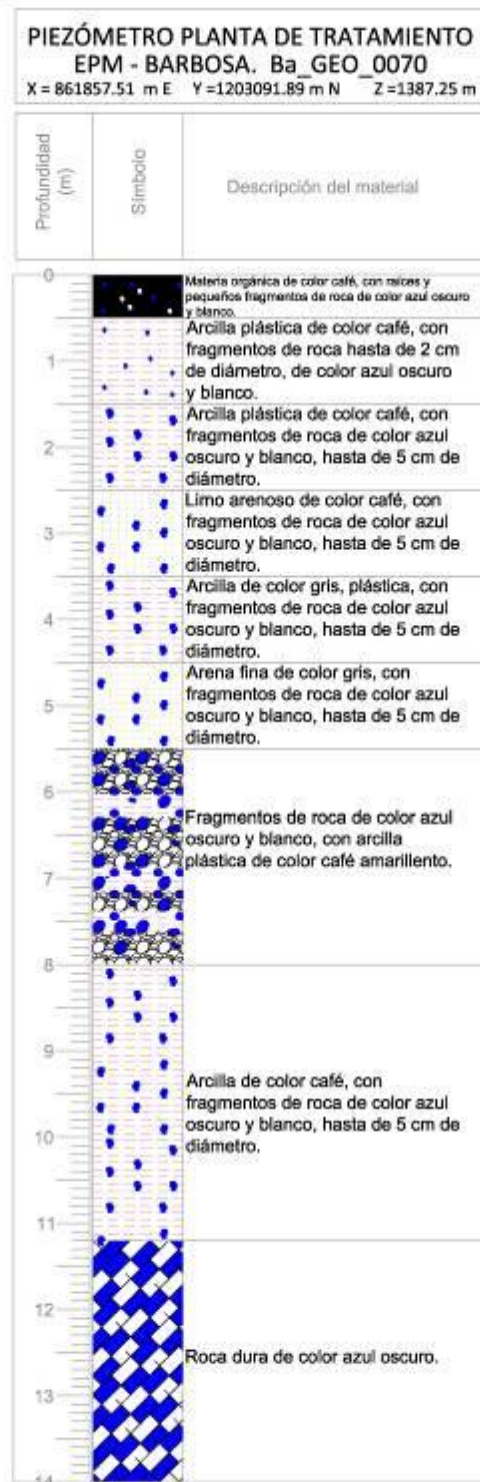


Figura 4.27 Perfil estratigráfico Planta de Potabilización de Empresas Públicas de Medellín Barbosa.

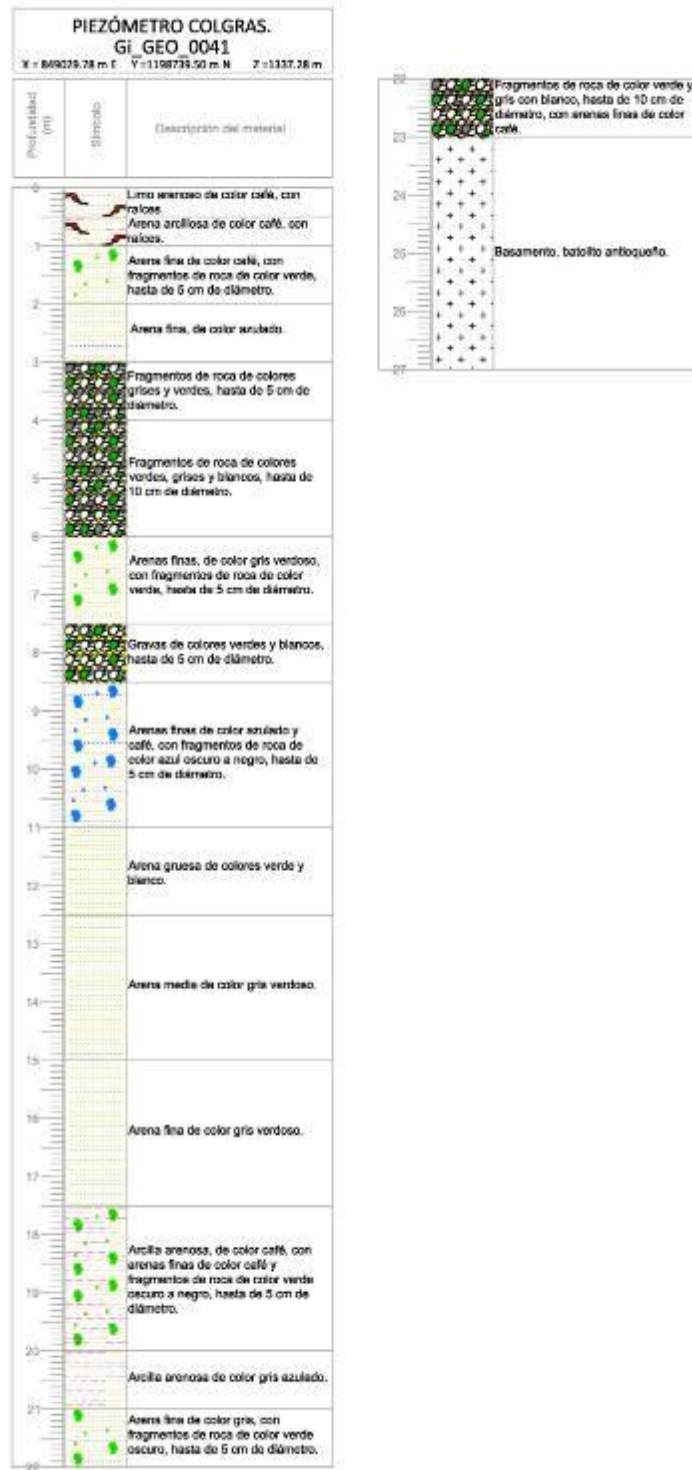


Figura 4.28 Perfil estratigráfico COLGRASS Girardota.

## Correlación hidroestratigráfica de unidades acuíferas

Las descripciones estratigráficas obtenidas desde las tomografías (Anexo 4.3), las columnas estratigráficas y las perforaciones (Anexos 4.2 y 4.4), permitieron precisar el carácter de acuífero de las unidades litológicas perfiladas a partir de la geología, y posteriormente estructurar la información dentro de la base de datos espacial de tal forma que pudiera procederse a la correlación (Anexo 4.5) y modelación de la geometría.

En el municipio de Bello se practicaron tres tomografías, dos sobre depósitos aluviales del río y una sobre un depósito de vertiente, designado en la geología como QFIII. En este sector del Valle, la tomografía 1 (Be\_GEO\_0027) permite observar la continuidad lateral entre los depósitos de vertiente y el aluvial. Para los tres sondeos efectuados en Bello se logró localizar la posición del basamento consistente en la roca metamórfica tipo anfibolita y se identificó localmente la naturaleza del aluvial consistente en un material con gravas, arenas y arcilla. Los depósitos de vertiente se caracterizan por una marcada heterogeneidad en el tamaño de los cantos de roca, son angulosos a subangulosos, la matriz es arenolimososa variando a limo-arenosa y la composición es anfibolita. Desde el Estudio de Zonas de Recarga y Acuíferos del Valle de Aburrá se agregan a esta zona, para la correlación hidroestratigráfica, las columnas correspondientes a los sondeos eléctricos verticales SEV 19- Hda Niquía y SEV 20-Terminal de carga.

En el municipio de Copacabana se realizaron tres tomografías hacia la margen derecha de río, una de ellas, (Co\_GEO\_0028), sobre un llano antrópico y depósitos de origen aluvial, y las demás (Co\_GEO\_0029 y Co\_GEO\_0030), sobre depósitos de flujos de escombros y una perforación de 50 m de profundidad cerca de Co\_GEO\_0028, en la cual se logra establecer que la profundidad del depósito aluvial alcanza los 40 m. Del estudio de EMSVA (AMVA, 2007) se tienen seis perforaciones. Las perforaciones P-CO-24 y P-CO-25, localizadas en la margen izquierda del río, se encuentran sobre flujos de escombros que alcanzan profundidades mayores a 28 m; en la margen derecha del río, las perforaciones P-CO-20, P-CO-21, P-CO-22 y P-CO-23, ubicadas secuencialmente en sentido sur-norte, registran la presencia de flujos de escombros que pueden alcanzar profundidades mayores a 32 m tal como se registra en P-CO-21, P-CO-23 registra además la presencia de un depósito aluvial en la parte superior de la secuencia con un espesor de 6 m.

En el caso de Girardota, hacia la margen izquierda del río, en sentido sur-norte, se tienen registros del subsuelo a partir los SEV's 21 y 22 pertenecientes al EZRAVA (AMVA, 2002), la perforación P-GI-26 del estudio EMSVA (AMVA, 2007), la tomografía Gi\_Geo\_0038 y la perforación Gi\_Geo\_0041, realizadas en el presente estudio, permiten verificar la irregularidad en los espesores de los depósitos aluviales en éste sector, registrando profundidades de 46, 68, 40, 24 y 23 m respectivamente. Hacia esta margen también se cuenta con registros de flujos de escombros a partir de la tomografía GI\_Geo\_0034 y del saprolito de milonita a partir de la perforación P-GI-30 del estudio EMSVA (AMVA, 2007). En la margen derecha del río, se localizan cuatro tomografías, tres de ellas (Gi\_Geo\_0035, Gi\_Geo\_0036 y Gi\_Geo\_0037) se encuentran sobre flujos de escombros, registrando espesores promedios de 25 m hasta alcanzar los 40 m de profundidad aproximadamente; la cuarta tomografía Gi\_Geo\_0040, ubicada más al norte, registra la irregularidad de los depósitos aluviales con variaciones en su espesor que oscilan entre 10 y 30 m aproximadamente. Hacia esta margen también se cuenta con cuatro perforaciones del estudio EMSVA (AMVA, 2007), P-GI-27, P-GI-31 y P-GI-28, localizadas sobre flujos de

escombros, registrándose en esta última la presencia del batolito saprolitizado a partir de los 6 m, y finalmente la perforación P-GI-29 que se encuentra sobre el saprolito del Batolito Antioqueño.

Para el municipio de Barbosa en cercanías con el municipio de Girardota, hacia la margen derecha del río Aburrá, se realizó la tomografía Ba\_Geo\_0061 y la perforación Ba\_Geo\_0069, en la primera se registran espesores de la unidad aluvial que alcanzan hasta los 60 m aproximadamente, mientras que en la perforación se lograron registrar espesores hasta de 7 m; también se cuenta con los registros de los SEV's 23 y 24 del estudio EZRAVA (AMVA, 2002), los cuales presentan espesores de interés acuífero que varían entre los 44 y 56 m.

Hacia la margen izquierda del río Aburrá, se cuenta con dos tomografías: Ba\_GEO\_0062 y Ba\_GEO\_0063, ambas ubicadas sobre flujos, con algún interés hidrogeológico y que reporta espesores de 30 m aproximadamente. Igualmente se cuenta con una perforación realizada en el proyecto de EMSVA (AMVA, 2007) (P-BA-32), la cual registra un espesor de 13 m de posible interés hidrogeológico.

Hacia el casco urbano del municipio, en la margen derecha del río Aburrá, se logra establecer un corte en sentido este-oeste, conformado por la perforación Ba\_GEO\_0070 y la tomografía Ba\_Geo\_0065 del presente estudio, la perforación P-BA-34 y P-BA-35 del estudio de EMSVA (AMVA, 2007), finalizando con el SEV 25 del estudio ESRVA (AMVA, 2002), en cercanías al Río Medellín, en ese corte las unidades con interés hidrogeológico alcanzan espesores que varían de 5 a 30 m, aproximadamente, sobre los flujos y de 44 m en la zona aluvial del río Aburrá. Adicionalmente en esta margen del río, se realizó la tomografía Ba\_GEO\_0064, la cual registra espesores con interés hidrogeológico de aproximadamente 30 m.

Hacia la margen izquierda del río Aburrá, sobre su aluvial, se ubica la tomografía Ba\_GEO\_0066 que registra espesores de más de 30 m, más al norte, sobre depósitos de vertiente se encuentran la tomografía Ba\_GEO\_0067 y la perforación de EMSVA (AMVA, 2007) P-BA-36, registrando espesores de interés hidrogeológico cercanos a los 13 m.

Siendo en todos los casos evidente la conexión lateral entre depósitos de vertiente y aluviales en toda la zona de estudio, se decide agrupar las dos formaciones geológicas en una sola a la que se designara Acuífero Aburrá Norte (Figura 4.29). Es preciso aclarar que los pequeños depósitos aislados, que tienen un área no equiparable a la escala de la cartografía no se consideran como acuíferos.

La modelación espacial del espesor del acuífero, se efectuó aplicando la metodología propuesta en el estudio Plataforma SIG Para el Modelamiento de Sistemas Acuíferos (Escobar, 2011), la cual puede resumirse en las siguientes actividades:

1. Establecer el dominio geográfico de las funciones a modelar. A partir de los mapas de unidades hidrogeológicas se determina la extensión espacial en la cual se desarrollarán los procesos de interpolación de los datos conocidos. Para este caso el dominio corresponde a la zona de estudio, es decir la cuenca norte del río Aburrá entre Bello y Barbosa.

2. Identificar los subdominios y para cada uno de ellos fijar una condición de frontera extendida, en la cual la variable modelada “puede” existir en todo el dominio. Es posible que en el dominio extendido se presente un acotamiento natural en el cual se da la presencia de las formaciones bajo análisis y un acotamiento “de datos” representado por una zona explorada en la cual se han recolectado datos estratigráficos, por fuera de esta área las formaciones “pueden” existir pero tal vez no se cuente con datos para describir su comportamiento. Para el Valle de Aburrá, el subdominio está representado por la unidad delimitada como Acuífero Norte del valle.
3. Definir una condición de frontera de cada subdominio. Los subdominios pueden asumir dos estados: la frontera es cerrada, cuando la variable se reduce paulatinamente hasta desaparecer o la frontera es abierta, cuando, más allá de un límite fijado, la variable finaliza abruptamente, como pueden ser los casos de una falla, el límite de la cuenca o un límite fijado arbitrariamente. En el Valle de Aburrá las variables se reducen paulatinamente hasta alcanzar un espesor de cero en el límite del acuífero.
4. Seleccionar el tamaño de celda, con él se generarán las superficies que representaran las unidades y parámetros. Este tamaño de celda debe tener en cuenta las características de la información base, la escala de representación, la precisión requerida en las representaciones de estos fenómenos y los requerimientos de almacenamiento y procesamiento, teniendo en cuenta que celdas de menor tamaño generarán matrices de mayor dimensión. Considerando que este estudio tuvo un nivel de detalle escala 1:10.000, el tamaño de celda fue de 10 x 10 m.
5. Identificar el comportamiento espacial de la variable de control y, a partir de ella, generar una matriz “pseudo-continua” de un fenómeno continuo a partir de valores discretos, basados en los puntos muestrales, coleccionados en un archivo de puntos de información estratigráfica los cuales son correlacionados espacialmente con los límites obtenidos de la geología. En este caso la matriz mencionada corresponde a la matriz de espesores calculada con un tamaño de celda de 10 x 10 m.

De acuerdo con el mapa de espesores se puede notar que el espesor alcanza hasta 46 m en el municipio de Bello, 42 m en Copacabana; 68 m en el municipio de Girardota y 56 m en el municipio de Barbosa. Se deduce que a mayor espesor mejores son las posibilidades de contener mayor cantidad de agua. Esta situación se presenta en Bello a lo largo de los 1.5 km, siguiendo el curso del río, antes del límite con Copacabana donde se dan espesores de alrededor de 45 m; en Girardota, siguiendo el curso del río, por cerca de 2 km al norte, después de la frontera con Copacabana, donde se presentan espesores de hasta 68 m y, en el municipio de Barbosa, en una región comprendida entre la tomografía BA\_GEO\_061 y el SEV 23. La Figura 4.30 y Figura 4.31 ilustran los espesores de las formaciones sectorizadas por municipio y los espesores clasificados, respectivamente.



### **Otras unidades hidrogeológicas**

Cabe señalar, en relación con las rocas ígneas que fueron en principio calificadas como probables almacenadoras de agua subterránea, que, luego de analizar sus perfiles de meteorización y condición estructural, se concluyó: i) para los stocks y batolito las profundidades que abarcan los saprolitos meteorizados no son muy significativos, además las pendientes generan gradientes que producen flujos muy rápidos limitando el almacenamiento y ii) las Dunitas de Medellín, calificadas en algunas de sus facies como pseudokarst, constituyen sin lugar a dudas una unidad hidrogeológica relevante en términos de flujo de agua subterránea, ella deberá ser explorada a futuro empleando nuevas metodologías de exploración. Con el fin de determinar el posible aprovechamiento de las aguas que en ella percolan a través de galerías filtrantes.

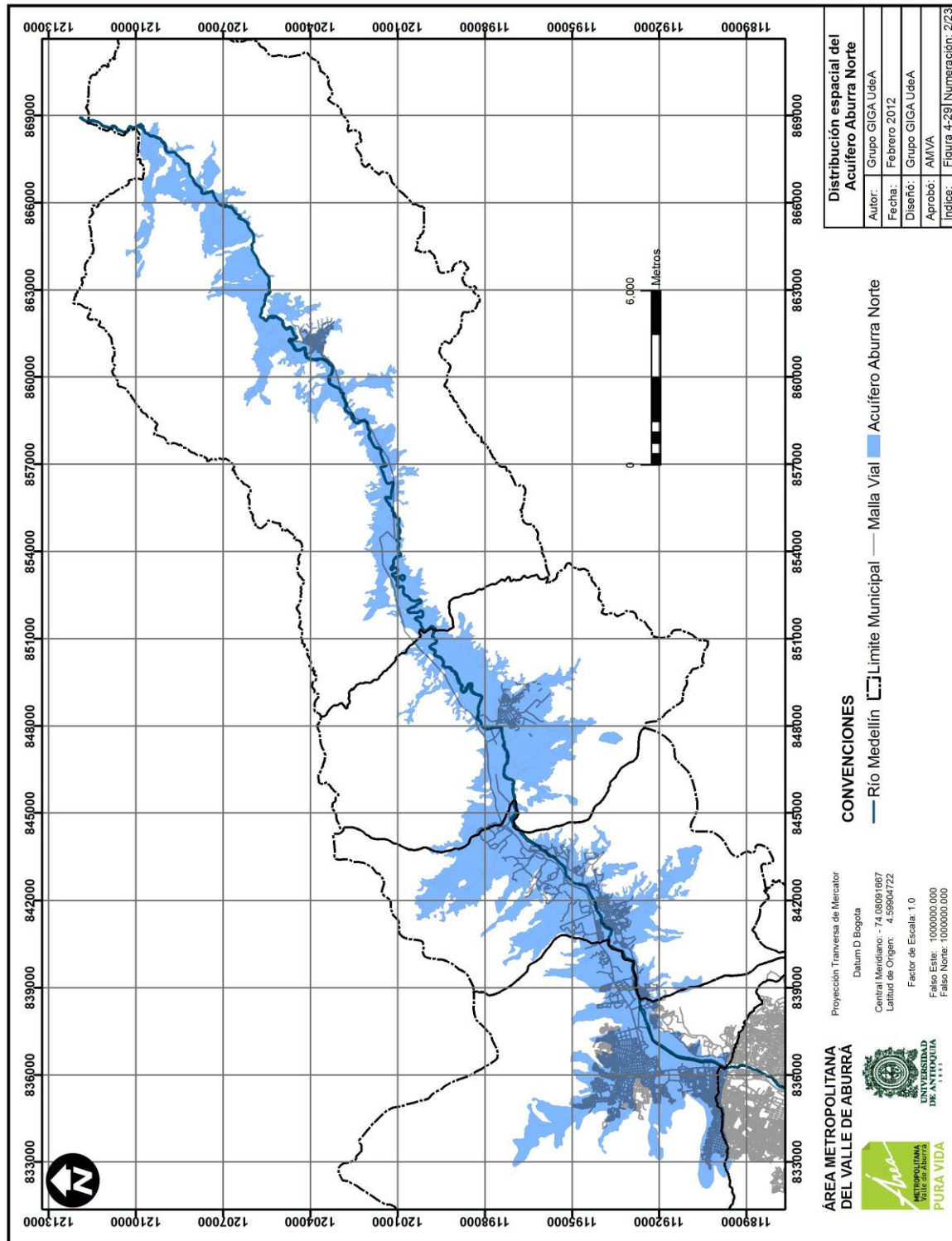


Figura 4.29. Distribución espacial del Acuífero Aburrá Norte.

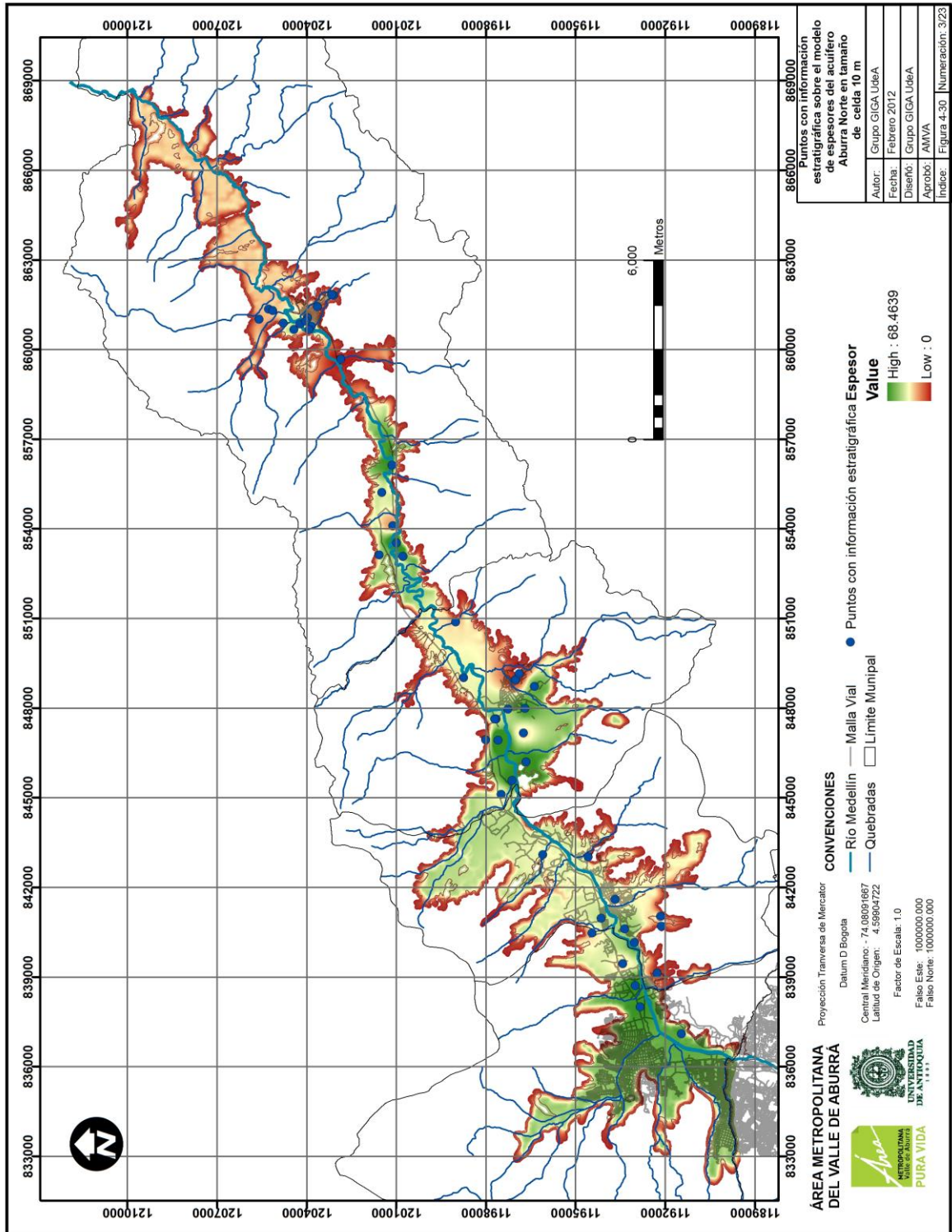


Figura 4.30. Puntos con información estratégica sobre el modelo de espesores del acuífero Aburrá Norte en tamaño de celda 10 m.

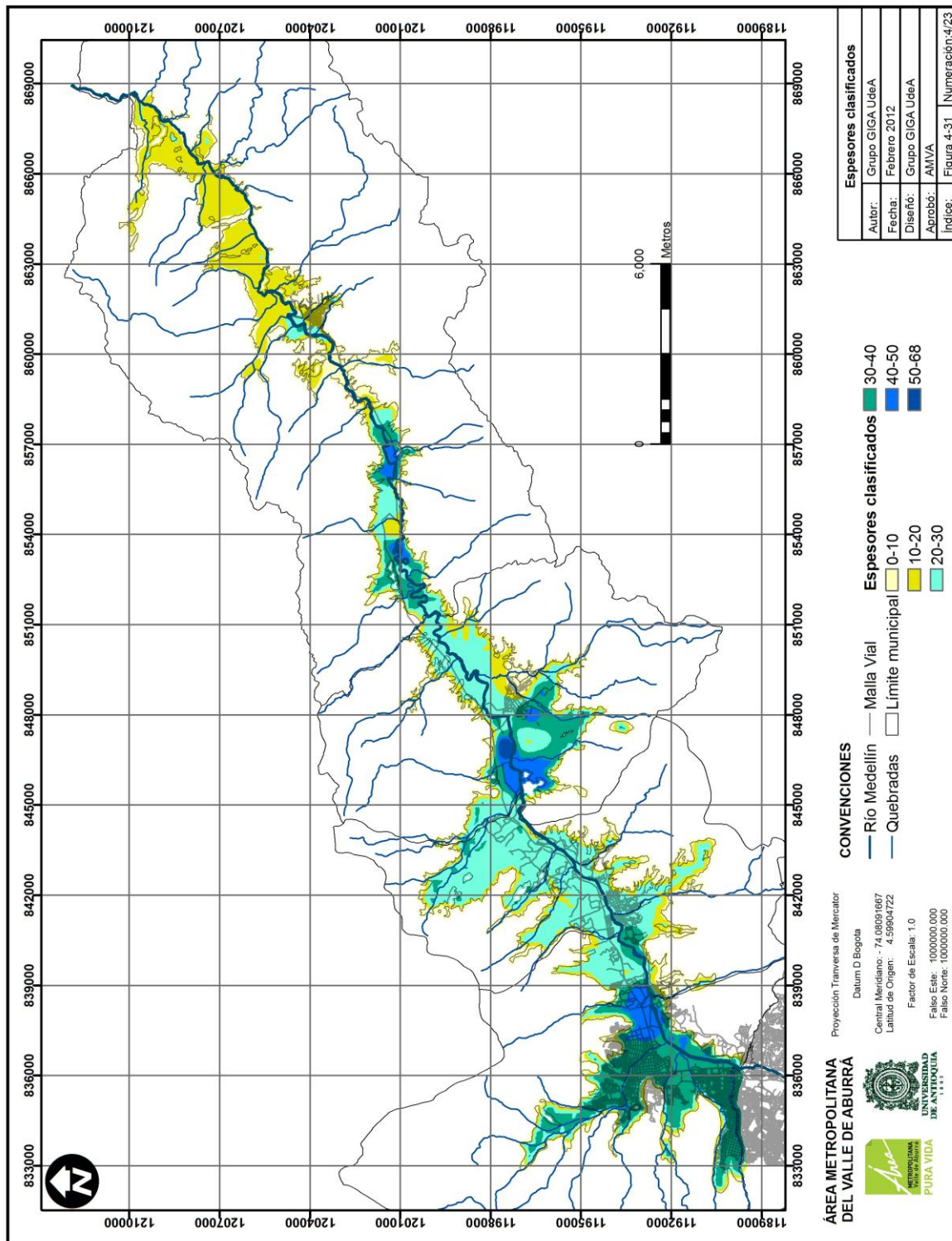


Figura 4.31. Espesores clasificados (Notar las zonas compuestas por los tres tonos de azul más intensos).

### 4.1.3 Balance hídrico

A partir de un análisis conjunto de los registros hidrológicos y las características físico-bióticas de una región, es posible definir, de manera potencial, las interacciones entre las aguas superficiales y subterráneas, y estimar los excedentes de precipitación que potencialmente pueden alimentar los depósitos subterráneos. Ante la ausencia de redes de observación de niveles piezométricos que permiten una estimación directa de la recarga a las unidades acuíferas de interés, se utilizan técnicas que, como el balance hídrico, permiten abordar el problema de la recarga potencial de manera indirecta, a partir de registros hidrometeorológicos. Este método permite, para diferentes escalas temporales y espaciales, estimar valores de recarga por exceso de precipitación, sin consideración de los fenómenos locales de intercambio hídrico con las corrientes, ni la dinámica horizontal de los flujos superficiales y subsuperficiales.

El método de balance se puede utilizar en sitios específicos (balance por estación) para la estimación del potencial de recarga directa sobre acuíferos libres. En el caso de este estudio, este método se usa para la determinación de recarga potencial sobre las formaciones acuíferas del norte del Valle de Aburrá a partir de información de estaciones localizadas cerca o directamente sobre los acuíferos libres. Los cálculos se ejecutaron para el periodo de referencia asociado a las características de la red hidrometeorológica de la cuenca, e incluye escenarios hidrológicos típicos en la escala de balance anual: comportamiento húmedo, seco y cercano al medio mensual multianual. Adicionalmente, el método se puede utilizar también como una aproximación distribuida en el espacio que permite determinar, de manera general, las características potenciales de la recarga en las zonas definidas como objeto de las medidas de protección que se proponen en este trabajo; para este ejercicio se utilizó el balance distribuido para la estimación de la recarga bajo la condición hidrológica seca (para un año típicamente seco) que corresponde a la situación más crítica y en la que las características de uso y protección de las condiciones superficiales resultan más cruciales para garantizar efectivamente la recarga a las formaciones acuíferas.

#### 4.1.3.1 Métodos

- **Información de entrada para la estimación del balance:**

Se solicitó al Área Metropolitana información hidrometeorológica de 78 estaciones manejadas por el IDEAM o por Empresas Públicas de Medellín, localizadas dentro o en los alrededores del Valle de Aburrá, en zonas hidrológicamente conectada con el área de estudio. Se obtuvo información de precipitación, con resolución mensual, para 12 estaciones en el periodo 2004-2010, y de 8 estaciones con resolución diaria, para el periodo 2000-2010 así, 6 estaciones de precipitación y 2 climatológicas (Tabla 4.5). Las estaciones climatológicas proveen información que permite cuantificar la evapotranspiración, un componente fundamental del balance. Sin embargo, tras revisar la calidad y consistencia de las series para el periodo de registro, hubo necesidad de descartar la información de una de las estaciones (hacienda El Progreso) y utilizar únicamente la información de la estación Tulio Ospina, asumiendo que los valores de evapotranspiración que en ella se registran son generalizables a la zona baja del norte del Valle de Aburrá (un supuesto razonable teniendo en cuenta que las condiciones atmosféricas y de superficie en el fondo del valle, particularmente en el área de estudio, son relativamente uniformes). A pesar de que en los

catálogos de estaciones meteorológicas aparece información sobre los periodos globales de funcionamiento de las estaciones, consistente en su fecha de instalación y suspensión (en los casos que aplica), la mayoría de las series no están completas y se registran periodos considerables con datos faltantes, lo que hace que los periodos coincidentes en el registro entre estaciones se recorte y que la disponibilidad de información para un análisis de recarga se limite a esos periodos comunes. Esta condición se convierte entonces en un criterio, que sumado a las características hidrológicas específicas de cada año, se utiliza para la selección de años típicos en el cálculo del balance hídrico. Cuando fuera necesario, los valores mensuales de precipitación se completaron a partir de análisis de regresión con estaciones cercanas y los valores diarios de evapotranspiración se completan a partir del valor de la media móvil de los cinco días anteriores.

**Tabla 4.5. Estaciones seleccionadas para la estimación de los balances diario y mensual.**

CÓDIGO	NOMBRE	PERIODO DE DATOS	TIPO*	ESCALA	FALTANTES (DÍAS)
2308023	Las Palmas	2005-2010	PG	Mensual	65
2308026	La Mosca	2000-2010	PG	Mensual	10
2308074	Concepción	2000-2010	PM	Diaria	0
2701035	Chorrillos	2004-2010	PG	Mensual	76
2701037	Fabricato	2004-2010	PG	Mensual	26
2701038	San Antonio de Prado	2004-2010	PG	Mensual	1
2701045	Villa Hermosa Planta de Filtros	2004-2010	PG	Mensual	2
2701046	San Cristóbal	2004-2010	PG	Mensual	6
2701056	Girardota	2004-2010	PM	Mensual	2
2701057	Barbosa	2004-2010	PM	Mensual	40
2701076	Niquía	2004-2010	PG	Mensual	161
2701080	Meseta San Pedro	2000-2010	PM	Diaria	0
2701081	Santa Helena	2000-2010	PM	Diaria	153
2701082	La Cuchilla	2000-2010	PM	Diaria	0
2701111	Astilleros	2000-2010	PM	Diaria	92
2701112	La Iguaná	2000-2010	PG	Diaria	521
2701115	Astillero	2004-2010	PG	Mensual	52
2701509	Tulio Ospina	2000-2010	CO	Diaria	--
2701515	Hacienda el progreso	2000-2010	CO	Diaria	--

\* PG: Pluviográfica; PM: Pluviométrica; CO: Climatológica Ordinaria.

- **Identificación de estaciones para el cálculo de la recarga directa:**

Para el ejercicio de estimación de la recarga directa sobre los acuíferos libres, se seleccionaron las estaciones Hacienda El Progreso (2701515), La Cuchilla (2701082), Tulio Ospina (2701509) y La Iguaná (2701112), esta última, aunque fuera de los límites específicos de la zona de estudio, está conectada hidrológicamente con los acuíferos libres de ella, y por tanto, sus características de recarga potencial deben ser considerados en el análisis (Figura 4.32). Estas estaciones, así como las demás proporcionadas en el proyecto se encuentran en el Feature Class: SD\_Hidrometeorologico, proporcionado en Geodatabase del proyecto. Paralelamente, los datos que fueron empleados para el balance se encuentran en las tablas TBL\_EVP, que corresponden con la evapotranspiración; TBL\_Temperatura, que es la temperatura máxima, mínima y promedio; y TBL\_Precipitacion que contiene los datos de lluvia.

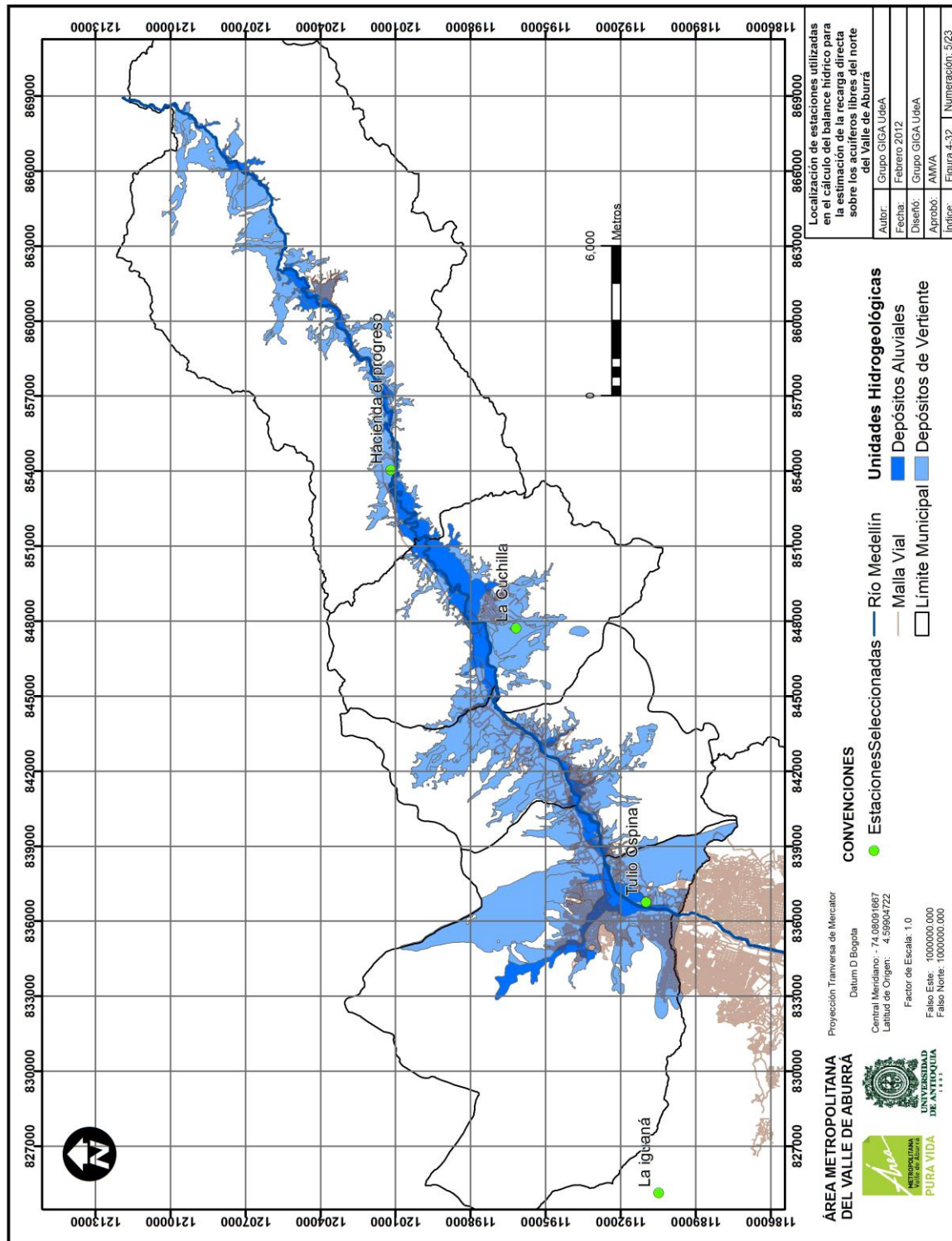
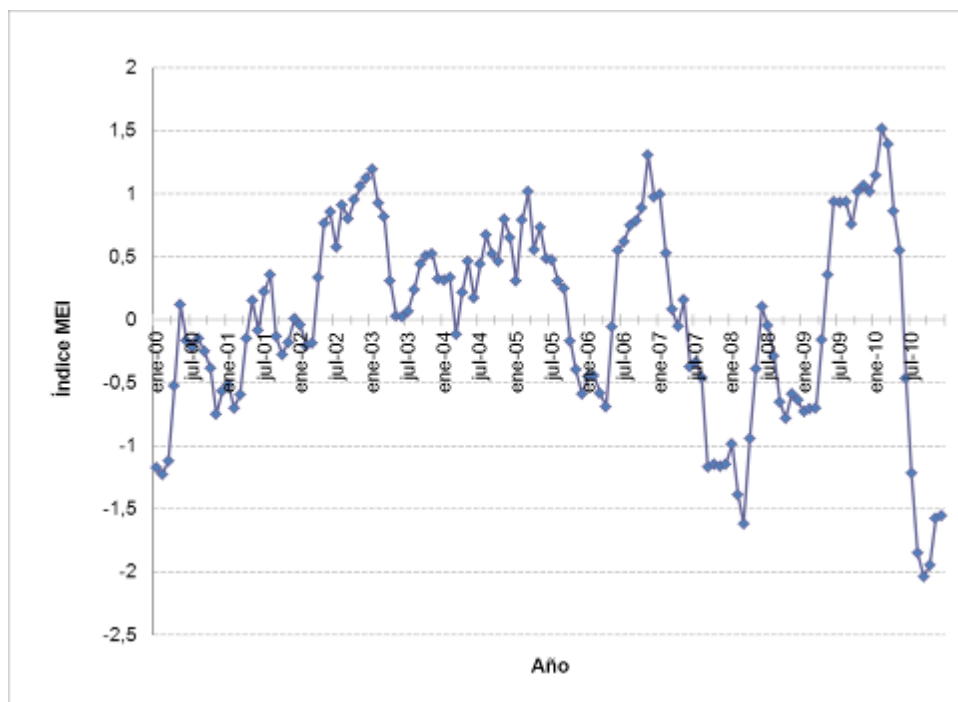


Figura 4.32. Localización de estaciones utilizadas en el cálculo del balance hídrico para la estimación de la recarga directa sobre los acuíferos libres del norte del Valle de Aburrá.



- **Selección de años típicos para balance:**

El ejercicio de balance hídrico por estación se aplicó para tres condiciones hidrológicas típicas en cuanto a la disponibilidad de precipitación. Específicamente, se seleccionaron años hidrológicos seco, húmedo y promedio. Un año hidrológico corresponde a periodo entre el comienzo de una temporada lluviosa en un año hasta el inicio de la temporada correspondiente en el año calendario inmediatamente siguiente, para el caso de este estudio corresponde al periodo abril-marzo. Para la selección de los años típicos inicialmente se utilizó el índice MEI (Multivariate ENSO Index; NOAA), que es un indicador eficiente de las condiciones Niño y Niña que determinan periodos lluviosos o relativamente secos en Colombia. Valores positivos del índice MEI corresponden a periodos Niño, cuya señal corresponde a periodos más secos que el promedio; del mismo modo, valores negativos del MEI corresponden a periodos Niña, que se caracterizan por regímenes de precipitación más alta que el promedio (Figura 4.33).



**Figura 4.33. Serie anual del índice MEI (NOAA) para el periodo de estudio 2000-2010. Valores positivos indican condiciones Niño y valores negativos condiciones Niña.**

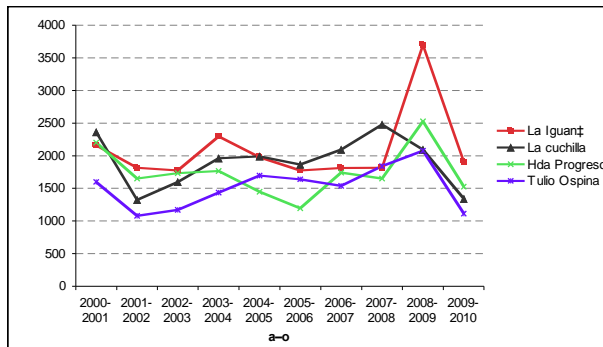
A partir de la información del MEI y contrastando las series de precipitación para las cuatro estaciones en que se desarrolla el balance hídrico por estación (Figura 4.34 (a)), se seleccionó el año hidrológico 2003-2004 como año hidrológico medio (anomalías de precipitación cercanas a cero o sin una dirección evidente entre las estaciones, aunque el índice MEI muestra una señal Niño débil; Figura 4.34 (b)), el año 2008-2009 como año húmedo (anomalías positivas en las cuatro estaciones e índice MEI negativo; Figura 4.34 (b)) y el año 2009-2010 como año seco (anomalías negativas en todas las estaciones e índice MEI positivo; Figura 4.34 (b)). En la Tabla 4.6 se resume, a escala mensual, los valores de precipitación para las estaciones seleccionadas en los escenarios hidrológicos

considerados. La Tabla 4.7 presenta los valores anuales de precipitación para cada año hidrológico.

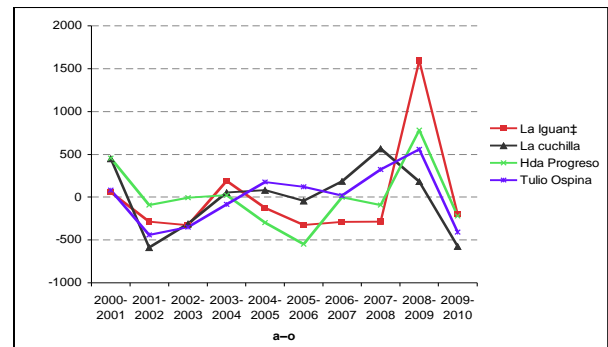
**Tabla 4.6. Datos de precipitación y evaporación potencial mensual de las estaciones seleccionadas para el balance en milímetros (mm).**

MES-AÑO	AÑO HIDROLÓGICO	PRECIPITACIÓN			EVAPORACIÓN	
		HACIENDA EL PROGRESO	LA CUCHILLA	LA IGUANÁ	TULIO OSPINA	
abr-03	Medio	224.0	150.0	241.0	120.2	137.5
may-03		195.0	192.0	185.0	184.5	145.7
jun-03		317.0	280.0	218.0	201.3	125.3
jul-03		78.3	72.0	119.0	50.1	179.4
ago-03		156.0	189.0	97.0	103.9	168.5
sep-03		93.0	233.0	221.0	206.6	135.8
oct-03		202.0	225.0	435.0	224.2	107.1
nov-03		156.0	184.0	370.0	104.3	111.6
dic-03		90.0	151.0	87.0	59.0	120.2
ene-04		49.0	55.0	86.0	71.8	145.7
feb-04		66.0	78.0	131.0	71.6	161.2
mar-04		142.0	155.0	108.0	37.5	166.0
abr-08	Húmedo	108.0	142.0	285.5	202.9	113.2
may-08		189.0	251.0	417.0	312.0	103.2
jun-08		318.1	236.0	305.3	205.6	107.4
jul-08		413.0	252.0	300.0	203.1	109.7
ago-08		441.0	283.0	339.1	272.9	101.1
sep-08		106.2	180.0	442.0	175.8	116.2
oct-08		290.8	268.0	413.2	260.0	94.0
nov-08		172.7	172.0	464.0	169.5	74.6
dic-08		35.4	11.0	54.0	37.5	100.0
ene-09		149.0	94.0	147.5	70.4	92.3
feb-09		123.0	70.0	108.0	56.5	86.9
mar-09		183.0	135.0	424.0	112.1	98.4
abr-09	Seco	162.0	145.0	237.0	118.6	107.3
may-09		199.0	155.0	186.0	125.6	116.1
jun-09		186.0	142.0	249.0	140.2	97.4
jul-09		176.0	71.0	120.6	59.9	139.8
ago-09		235.0	216.0	174.0	92.9	137.1
sep-09		78.0	75.0	159.0	79.4	148.4
oct-09		162.0	226.0	297.5	205.2	93.3
nov-09		128.0	125.0	268.0	166.4	96.2

MES-AÑO	AÑO HIDROLÓGICO	PRECIPITACIÓN			EVAPORACIÓN	
		HACIENDA EL PROGRESO	LA CUCHILLA	LA IGUANÁ	TULIO OSPINA	
dic-09	Seco	63.0	83.0	91.1	42.8	74.4
ene-10		13.0	18.0	14.0	15.0	76.6
feb-10		42.0	26.0	21.0	25.9	117.1
mar-10		81.0	55.0	87.0	38.9	155.6



(a)



(b)

Figura 4.34. (a) Valores totales anuales de precipitación (años hidrológicos entre 2000-2010) para las estaciones en que se calcula la recarga directa; (b) anomalías de precipitación (desviaciones con respecto al promedio) para las mismas estaciones.

Tabla 4.7. Valores totales anuales de precipitación para las estaciones seleccionadas medidos en mm de agua en milímetros (mm).

AÑO HIDROLÓGICO (ABRIL A MARZO)	PRECIPITACIÓN ANUAL			
	HACIENDA EL PROGRESO	LA CUCHILLA	LA IGUANÁ	TULIO OSPINA
2000-2001	2203.6	2364	2160	1601.1
2001-2002	1652.1	1322.4	1819.5	1076.7
2002-2003	1737.4	1599	1776.8	1168.4
2003-2004	1768.3	1964	2298	1435
2004-2005	1447	1992	1978.9	1697.2
2005-2006	1195	1868	1778.6	1639.6
2006-2007	1743	2097	1815.7	1537.5
2007-2008	1653	2479.3	1818.5	1842.3
2008-2009	2529.2	2094	3699.6	2078.3
2009-2010	1525	1337	1904.2	1110.8
<b>Promedio</b>	<b>1745.36</b>	<b>1911.67</b>	<b>2104.98</b>	<b>1518.69</b>

- **Método de balance de suelo (SWB):**

El cálculo del balance hídrico, tanto en la escala diaria para la recarga directa, como en la escala mensual para la estimación del potencial de recarga indirecta, se desarrolló a partir del método SWB. En este método el volumen de control es el suelo o la zona no saturada. En este sentido, se considera la precipitación (P) como el flujo de entrada principal y como flujos de salida, la escorrentía (Es), la evapotranspiración real (ETR) y la recarga total (Rt).

$$\Delta S = P - (Es + ETR + I)$$

Donde, (I) es la infiltración y ( $\Delta S$ ) es el cambio en el almacenamiento en el suelo. Todas las variables están en unidades de flujo por unidad de tiempo (mm en una unidad de tiempo).

La escorrentía superficial (Es) se calcula mediante el uso del método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) para abstracciones o método de número de curva aplicado a escala diaria, descrito en Chow et. al, 1999. Para ello, se define un valor de número de curva de escorrentía para cada estación (o píxel en el balance distribuido) en función de las características físicas de los suelos y de las condiciones de uso de la tierra; en este estudio estas condiciones se extrajeron del Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Antioquia (IGAC, 2007).

La Evapotranspiración Real se calcula por la fórmula de TURC, a partir de los datos de ETP obtenidos en tanque evaporímetro. Una vez se obtiene (Es), se estima la infiltración (I) como la diferencia entre (P) y (Es). Por su parte, el almacenamiento en el suelo varía entre el punto de marchitez permanente (pmp) y la capacidad de campo (cc). Respecto a la evapotranspiración real (ETR), esta se calcula en función de la evapotranspiración potencial (ETP): si la humedad en el suelo, más la infiltración diaria menos la evapotranspiración potencial es mayor o igual al punto de marchitez permanente del suelo, la evapotranspiración real será equivalente a la evapotranspiración potencial; (ETR) es equivalente a cero si la humedad en el suelo más la infiltración diaria, es menor o igual al punto de marchitez permanente; o (ETR) es igual al almacenamiento en el suelo más la infiltración menos el punto de marchitez permanente (pmp), si la humedad en el suelo más la infiltración diaria es mayor a (pmp). Las características hidráulicas del suelo (pmp y cc) dependen de las condiciones texturales, estructurales y de contenido de materia orgánica y pueden estimarse a partir de las relaciones empíricas propuestas por Saxton y Rawls (2006). En este estudio, la composición textural de los suelos y su contenido de materia orgánica se extrajo de IGAC (2007).

Para hallar las condiciones de humedad del suelo en tiempo actual, se estiman primero las condiciones de humedad en el tiempo anterior. La humedad en el suelo del día anterior es igual a la suma de la humedad en el suelo más la infiltración diaria menos la evapotranspiración real, si el valor resultante es mayor que la capacidad de campo, entonces la humedad en el suelo será equivalente a la capacidad de campo, en caso contrario, será igual al valor obtenido en la operación. Por último, la recarga total directa es igual a la diferencia entre la humedad en el suelo y la capacidad de campo del suelo si la humedad potencial en el suelo es mayor a la capacidad de campo.

#### 4.1.3.2 Resultados

- **Características de suelo y cobertura vegetal para el cálculo del balance por estación:**

En términos generales, las zonas donde están localizadas las estaciones en las que se desarrolló el balance corresponden a dos tipos principales de suelos: los primeros derivados de la Asociación Poblano, ubicados en los municipios de Barbosa y Girardota, presentan texturas moderadamente finas a gruesas, superficiales a profundos con drenaje pobre a moderado; los segundos corresponden a la Asociación Tequendamita, ubicados principalmente en los municipios de Medellín y Bello, son suelos profundos a moderadamente profundos, bien drenados y de texturas medias. Es de anotar que la estación Tulio Ospina se encuentra cerca de las zonas urbanas. En general los suelos se encuentran dedicados a actividades de ganadería, pastos y cultivos transitorios y han estado bajo estos usos por un tiempo prolongado, lo que implica condiciones de alteración de las características estructurales y de contenido de materia orgánica del suelo, en detrimento de la capacidad de favorecer la recarga. Estas condiciones de uso, que favorecen la escorrentía sobre la infiltración, se ven reflejadas en valores medios a altos de número de curva de escorrentía (Tabla 4.8).

**Tabla 4.8. Principales características de suelo y coberturas vegetales de las zonas donde se ubican las estaciones en las que se calculó el balance. (A partir de estos valores se definieron las características hidráulicas del suelo: Punto de Marchitez permanente (PMP) y capacidad de campo (CC) y el número de curva de escorrentía (NII)).**

ESTACIÓN	TEXTURA	COBERTURA	PROFUNDIDAD EFECTIVA (m)	PMP (%)	PMP (mm)	CC (%)	CC (mm)	NII
Hacienda El Progreso	Franco arcillo arenosa	Pastos – cultivos - ganadería extensiva	0,5	0,12	60	0,23	115	67
La Cuchilla	Franco – arcillo - arenosa	Pastos – ganadería extensiva	0,5	0,12	60	0,23	115	72
Tulio Ospina	Arcillo limosa	pastos – erosión severa –zonas urbanas	0.5	0,11	55	0,22	110	72
La Iguaá	Arcillo limosa	Pastos – cultivos transitorios	0.5	0,11	55	0,22	110	72

- **Dinámica mensual de los componentes del balance – recarga directa:**

En las Tabla 4.9 a Tabla 4.11 y en la Figura 4.35 se presenta un resumen de la dinámica temporal de los resultados de la estimación del balance hídrico superficial para las cuatro estaciones localizadas sobre el acuífero libre del Valle de Aburrá. En general, la mayor parte de la precipitación mensual (P) se convierte en evapotranspiración (ER), dejando una proporción relativamente baja para recarga (Rt) y escorrentía superficial (Es). La magnitud relativa de estos flujos se mantiene para los tres años típicos aunque se resaltan variaciones como la que se presenta para la estación La Iguaá y en Hacienda El Progreso para el año húmedo, en que los valores de evapotranspiración son comparables, y en el caso de la estación La Iguaá incluso menores que los valores de recarga total potencial. La recarga por exceso de lluvia responde a la estacionalidad de la precipitación y alcanza sus valores máximos alrededor de los meses de junio y octubre, para los años húmedo y medio,

una vez los suelos han alcanzado su capacidad de campo. En el año seco se observa en general para las cuatro estaciones que la recarga se presenta un mes después del ascenso en la lluvia. En las épocas menos lluviosas se espera que las formaciones acuíferas contribuyan a mantener las condiciones de humedad de suelo en el punto de marchitez permanente, puesto que no se han observado registros de marchitez de vegetación en la región. Del mismo modo, la recarga calculada en este ejercicio corresponde a la integración de drenaje profundo, que también contribuye al mantenimiento del flujo base de las corrientes superficiales en épocas de limitada escorrentía superficial (años secos o temporadas menos lluviosas).

**Tabla 4.9. Resultados del balance hídrico para el año húmedo.**

MES - AÑO	HACIENDA EL PROGRESO				LA CUCHILLA				TULIO OSPINA				LA IGUANÁ			
	P	ES	ET	RT	P	ES	ET	RT	P	ES	ET	RT	P	ES	ET	RT
abr-08	108	0	91.4	0	142	10.7	116.4	0	202.9	32.8	116.4	19.3	285.5	52.2	116.4	115
may-08	189	4.9	106	53.3	251	29.3	106	107.6	312	59.6	106	151.8	417	122.6	106	195.5
jun-08	318.1	55	107.4	152.6	236	27.9	107.4	108.1	205.6	13.1	107.4	89.5	305.3	21.3	107.4	178.3
jul-08	413	43	109.7	259.7	252	28.3	109.7	103.3	203.1	18.7	109.7	67.2	300	35.3	109.7	146.2
ago-08	441	51.3	101.1	284.8	283	39.6	101.1	138.5	272.9	44.1	101.1	125.4	339.1	51.6	101.1	186.4
sep-08	106.2	8.2	107.7	45.3	180	5.7	116.2	58.1	175.8	8.8	116.2	50.8	442	149.7	116.2	176.1
oct-08	290.8	3.4	103.8	128.6	268	26.3	106.9	139.4	260	20.2	106.9	132.9	413.2	75.6	106.9	230.7
nov-08	172.7	1.1	77	97.2	172	7.3	77	83.1	169.5	0	77	92.5	464	96.6	77	294.5
dic-08	35.4	0	87.8	0	11	0	66	0	37.5	0	79.9	12.6	54	0	96.1	8
ene-09	149	19.8	94.1	2.2	94	7.1	74.1	0	70.4	0	59.5	0	147.5	18.6	79.6	9.2
feb-09	123	5.3	86.9	34	70	0	82.8	0	56.5	1.2	65.3	0	108	0.3	86.9	18
mar-09	183	0.5	104.1	59.5	135	0.5	83.5	0	112.1	0.1	80.4	0	424	137.7	104.1	170.9
<b>TOTAL</b>	<b>2529.2</b>	<b>192.5</b>	<b>1177</b>	<b>1117.2</b>	<b>2094</b>	<b>182.6</b>	<b>1147.1</b>	<b>738.2</b>	<b>2078.3</b>	<b>198.6</b>	<b>1125.8</b>	<b>742</b>	<b>3699.6</b>	<b>761.6</b>	<b>1207.4</b>	<b>1728.7</b>

**Tabla 4.10. Resultados del balance hídrico para el año medio.**

MES – AÑO	HACIENDA EL PROGRESO				LA CUCHILLA				TULLIO OSPINA				LA IGUANÁ			
	P	ES	ET	RT	P	ES	ET	RT	P	ES	ET	RT	P	ES	ET	RT
abr-03	224	22.6	122.9	50.5	150	1.3	125.3	9.5	120.2	0	98.7	0	241	21.7	92	92.7
may-03	195	1.4	145.7	34.8	192	8.5	145.7	28.7	184.5	2.6	145.7	9.8	185	9.6	145.7	19.7
jun-03	317	66.6	125.3	138.5	280	41.1	125.3	145	201.3	20.8	125.3	86.1	218	22.4	125.3	92.7
jul-03	78.3	0	116.4	0	72	0	80.1	0	50.1	0	64.8	0	119	13.3	102.1	0
ago-03	156	12.6	128.8	0	189	42.5	114.4	3.3	103.9	14.6	91.5	0	97	7	115.8	0
sep-03	93	0	109.7	0	233	27.7	140.9	48.3	206.6	35.1	102.4	14.1	221	20.8	116.6	31
oct-03	202	12.1	110.6	31.3	225	17.3	110.6	97.1	224.2	21	110.6	92.6	435	95.9	110.6	226.1
nov-03	156	12.7	111.6	47.9	184	28.6	111.6	55	104.3	0.8	111.6	15	370	105.5	111.6	152.9
dic-03	90	0	118	3.8	151	31.2	112.5	51.1	59	0	91	0	87	0.3	105.8	35.8
ene-04	49	0	49	0	55	0.6	54.4	0	71.8	9.4	62.4	0	86	7.1	78.9	0
feb-04	66	0	35.5	0	78	3.8	51.2	0	71.6	0	54.2	0	131	7.6	67.8	8.4
mar-04	142	0	153	0	155	20.6	146.3	0	37.5	0	54.9	0	108	2.3	138	12.8
<b>TOTAL</b>	<b>1768.3</b>	<b>128</b>	<b>1326.5</b>	<b>306.8</b>	<b>1964</b>	<b>223.3</b>	<b>1318.2</b>	<b>438</b>	<b>1435</b>	<b>104.5</b>	<b>1113</b>	<b>217.6</b>	<b>2298</b>	<b>313.6</b>	<b>1310.2</b>	<b>672.1</b>



**Tabla 4.11. Resultados del balance hídrico para el año seco.**

MES - AÑO	HACIENDA EL PROGRESO				LA CUCHILLA				TULIO OSPINA				LA IGUANÁ			
	P	ES	ET	RT	P	ES	ET	RT	P	ES	ET	RT	P	ES	ET	RT
abr-09	162	0	107.3	50.2	145	17.3	107.3	18.3	118.6	11	107.3	0.9	237	28.6	107.3	102
may-09	199	10.4	116.1	99.7	155	19.6	116.1	59.5	125.6	0.4	116.1	25.7	186	12.3	116.1	91.8
jun-09	186	0.3	97.4	61.6	142	0.7	93.4	15.8	140.2	2.4	92.5	14.2	249	48	97.4	80.5
jul-09	176	20.9	146	49	71	0	116	0	59.9	0	104	0	120.6	17.5	121.8	24.3
ago-09	235	12.9	130.4	53.6	216	49	113.3	2.8	92.9	0	84	0	174	11.7	116.9	0
sep-09	78	0	128.9	0	75	0	125.9	0	79.4	8.2	80.1	0	159	35.3	144	16.7
oct-09	162	37.3	68	18.4	226	31.1	97.8	52.3	205.2	30.3	92.8	39.1	297.5	48.3	102	100.6
nov-09	128	0	98.9	56.2	125	16.7	89.1	64	166.4	28.5	98.9	72.6	268	47.5	98.9	151.1
dic-09	63	0	74.2	0	83	25.7	57.3	0	44.4	0.3	53.5	0	91.1	0.4	89.8	0
ene-10	13	0	13	0	18	0	18	0	25.3	0	25.3	0	14	0	40.4	0
feb-10	42	0	27.8	0	26	0	20.8	0	25.9	0	19.3	0	21	0	21	0
mar-10	81	0	88.3	0	55	0	54.3	0	38.9	0	45.5	0	87	0	75.8	0
<b>TOTAL</b>	<b>1525</b>	<b>81.9</b>	<b>1096.2</b>	<b>388.6</b>	<b>1337</b>	<b>160.1</b>	<b>1009.3</b>	<b>212.7</b>	<b>1122.7</b>	<b>81</b>	<b>919.3</b>	<b>152.6</b>	<b>1904.2</b>	<b>249.6</b>	<b>1131.4</b>	<b>567</b>

- **Valores totales anuales de los componentes del balance hídrico:**

Del mismo modo que se presenta en las series mensuales, para los valores totales anuales, independiente de la naturaleza del año (seco, medio, húmedo), el balance hídrico está dominado por la evapotranspiración y ésta es proporcionalmente más alta a medida que disminuye el valor de la precipitación media anual. Este comportamiento obedece al hecho de que en años secos se presentan condiciones que exacerban el déficit de humedad atmosférica, provocando un mayor flujo superficie-atmósfera y por consiguiente una menor disponibilidad de agua para transferirse de la zona no saturada a la zona saturada del suelo. De los resultados del balance se resalta que, para el caso del Valle de Aburrá, la recarga presenta valores mayores a la generación de escorrentía superficial en todos los años típicos, esto se explica por la cercanía de las estaciones a las corrientes superficiales, lo que permite inferir que una porción importante de la recarga total corresponde al flujo base, sin embargo, no se cuenta con un monitoreo continuo del nivel piezométrico que permita validar esta consideración. En general, los flujos del balance fueron consistentemente más altos en la estación La Iguaná, localizada en la ladera occidental del Valle de Aburrá, cuya precipitación media anual es tan alta como la precipitación para el año húmedo en las otras estaciones localizadas en el fondo del valle. Esta diferencia responde a la distribución espacial de la precipitación que aumenta hacia las laderas, sin embargo, cabe resaltar el comportamiento de la recarga en esta estación para el año húmedo, que es comparable, e incluso supera, el valor de evapotranspiración. Este caso solo se presenta en esta estación. Por el contrario, la estación Tulio Ospina, que registra valores de precipitación comparables con las demás estaciones del fondo del valle, presenta los valores más bajos de recarga potencial llegando a ser incluso inferior al 15% de la precipitación para el año seco. Este comportamiento puede estar asociado a las características edáficas y de uso de la tierra en esta estación, que favorecen la escorrentía sobre la infiltración (Tabla 4.9). Las otras dos estaciones bajo estudio, La Cuchilla y Hacienda El Progreso, localizadas ambas al norte del valle, presentan valores de recarga que representan entre el 16% y el 25% de la precipitación para el año seco, entre el 17% y el 24% para el año medio y entre el 35% y el 45% de la precipitación para el año húmedo (Figura 4.36).

- **Consideraciones finales:**

De acuerdo con las características de la información de entrada para los modelos de cálculo que se utilizan en el ejercicio de balance hídrico, es importante recalcar que los resultados constituyen estimaciones aproximadas de la recarga total potencial que, de ningún modo, pueden emplearse con fines predictivos o de definición de oferta hídrica sino como herramientas de gestión para la definición de zonas de protección y como instrumento para el establecimiento de medidas de ordenamiento ambiental del territorio. En particular, para este ejercicio de balance, en todas las estaciones, el cálculo se desarrolló de modo tal que, deliberadamente, se representaran condiciones de uso de la tierra que, de acuerdo con observaciones de campo, resultan menos favorables para el proceso de recarga. Estas condiciones obedecen a las prácticas de manejo que comúnmente se observan en las áreas dónde se asientan las estaciones y que son el resultado de una historia de intervención que data de siglos atrás, pero que se ha intensificado en las últimas décadas tras la expansión urbana y el creciente aumento demográfico que se evidencia en el Valle de Aburrá. Como resultado de estas condiciones, los valores de recarga que aquí se reportan, aunque medianamente altos en términos absolutos, son relativamente bajos en comparación con otras regiones de climatología, topografía y edafología similar, pero bajo condiciones de uso de la tierra, más sostenibles. En consecuencia, en capítulos sucesivos de este trabajo, se



presentan propuestas de medidas de manejo que, tanto para zonas de recarga directa como indirecta, buscan conciliar la vocación económica de las tierras con la posibilidad de mantener condiciones favorables para sostener y mejorar el flujo hacia los depósitos de agua subterránea en el Valle de Aburrá.

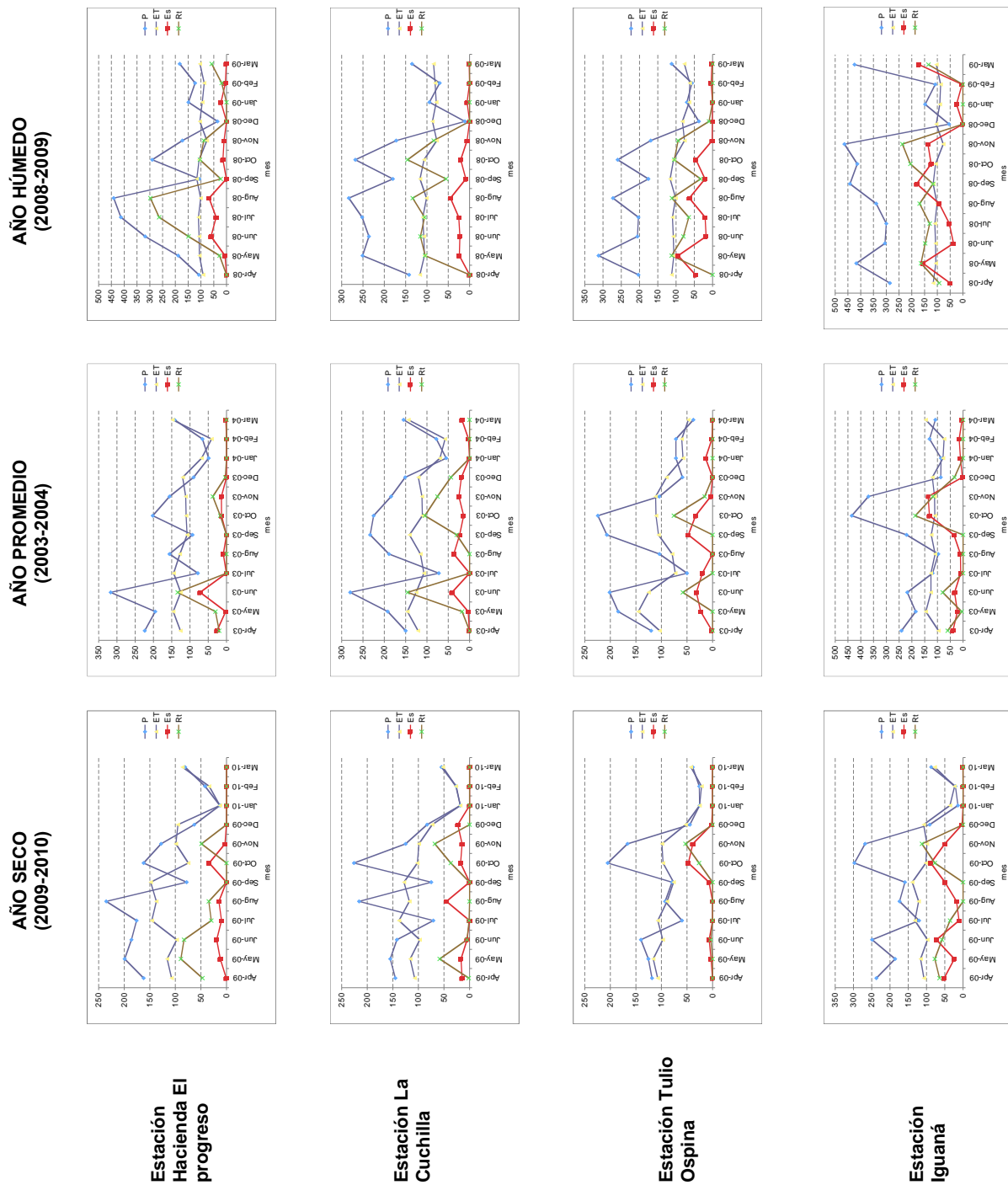
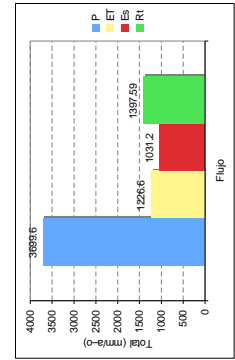
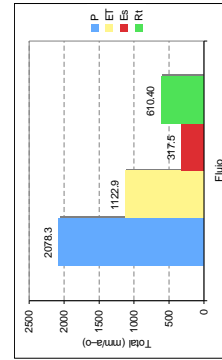
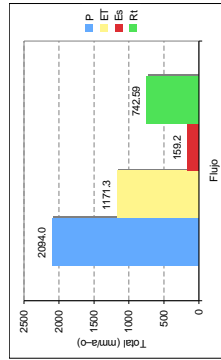
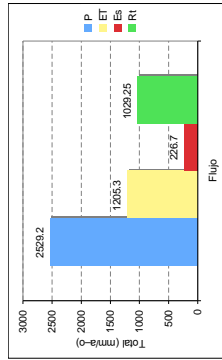
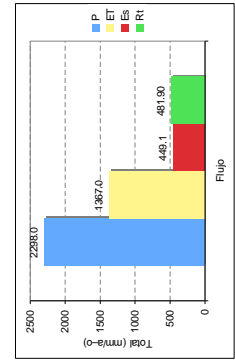
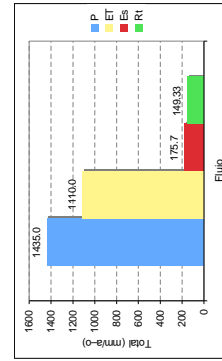
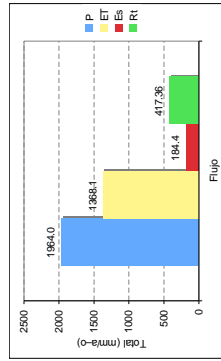
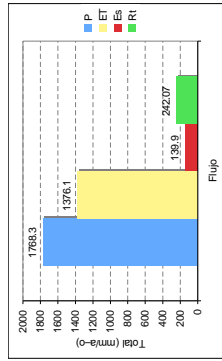


Figura 4.35. Dinámica temporal de los componentes de balance hídrico, calculado por el método SWB, para años típicos en estaciones del norte del Valle de Aburrá localizados sobre acuíferos libres. Los componentes son precipitación (P), evapotranspiración real (ET), escorrentía superficial (Es) y Recarga total (Rt).

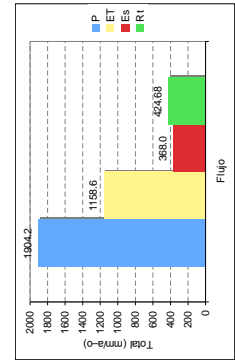
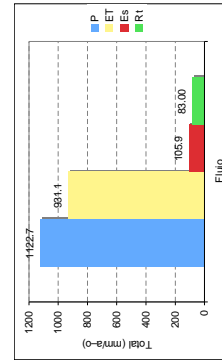
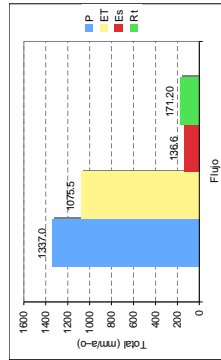
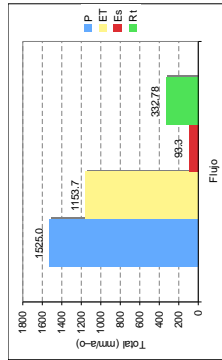
**AÑO HÚMEDO  
(2008-2009)**



**AÑO PROMEDIO  
(2003-2004)**



**AÑO SECO  
(2009-2010)**



**Estación Hacienda El Progreso**

**Estación La cuchilla**

**Estación Tulio Ospina**

**Estación Iguaná**

Figura 4.36. Valores totales anuales de los componentes del balance hídrico en tres años típicos para cuatro estaciones localizadas sobre el acuífero libre del norte del Valle de Aburrá. En las figuras se representan los valores totales de precipitación (P), evapotranspiración (ET), Escorrentía superficial (Es) y recarga potencial (Rt).

**Tabla 4.12. Dinámica temporal de los componentes de balance hídrico, calculado por el método SWB, para años típicos en estaciones del norte del Valle de Aburrá localizados sobre acuíferos libres (mm/año).**

AÑO TÍPICO	ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN	EVAPOTRANSPIRACIÓN	ESCORRENTÍA	RECARGA
Año Húmedo (2008-2009)	Hacienda El Progreso	2529,2	1205,3	226,7	1029,25
	La Cuchilla	2094,0	1171,3	159,2	742,59
	Tulio Ospina	2078,3	1122,9	317,2	610,40
	La Iguaná	3699,0	1120,0	1031,2	1397,59
Año promedio (2003-2004)	Hacienda El Progreso	1768,3	1376,1	139,9	242,07
	La Cuchilla	1964,0	1368,1	184,4	417,36
	Tulio Ospina	1435,0	1110,0	175,7	149,33
	La Iguaná	2298,0	1367,0	449,1	481,90
Año Seco (2009-2010)	Hacienda El Progreso	1525,0	1153,7	93,3	332,78
	La Cuchilla	1337,0	1075,5	136,6	171,20
	Tulio Ospina	1122,7	931,1	105,9	83,00
	La Iguaná	1904,2	1158,6	368,0	424,68

#### 4.1.4 Flujo de agua subterránea

El nivel freático define el límite de saturación del acuífero libre y coincide con la superficie piezométrica. A partir de dicha superficie es posible conocer la dirección que toma el flujo subterráneo, el cual sigue una trayectoria perpendicular a las líneas de igual nivel piezométrico, desde la más alta hacia la más baja.

Con el fin de obtener una superficie piezométrica lo más representativa posible de la zona de estudio, se seleccionaron 45 puntos de agua: 36 manantiales y 9 aljibes, de los cuales 8 hacen parte de la red de nivelación establecida en el proyecto “Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Aburrá en Jurisdicción del Área Metropolitana”-RedRío Fase III, 2011; y los demás se seleccionarán usando criterios como: estado actual (activo/inactivo), posibilidad para hacer la medición y condiciones de accesibilidad. La toma de los niveles piezométricos se realizó simultáneamente con el muestreo hidrogeoquímico a finales del mes de octubre de 2011 (Tabla 4.13); los códigos asignados a las estaciones consta de caracteres alfanuméricos, los dos primeros hacen referencia al municipio (Be para Bello, Ba para Barbosa, Co para Copacabana y Gi para Girardota), las letras siguientes establecen si el punto es un aljibe -A- o un punto de control hidrogeológico en campo -HID- los números con consecutivos asignados durante el inventario de campo. Empleando el método de interpolación Kriging Ordinario, se obtuvo la superficie piezométrica (Figura 4.37).

**Tabla 4.13. Niveles piezométrico tomados en octubre de 2011.**

CÓDIGO	TIPO DE CAPTACIÓN	ESTE (METRO)	NORTE (METRO)	COTA (M.S.N.M.)	NIVEL PIEZOMÉTRICO (M.S.N.M.)
Ba_A_001	Aljibe	860942,973	1204065,743	1279,646	1274,711
Ba_HID_0001	Manantial	855917	1201048	1325	1325,000
Ba_HID_0002	Manantial	856085	1200791	1358	1358,000
Ba_HID_0003	Manantial	856024	1200677	1380	1380,000
Ba_HID_0004	Manantial	859473	1202690	1322	1322,000
Ba_HID_0005	Manantial	859417,250	1202599,105	1360,505	1360,505
Ba_HID_0006	Manantial	860500	1204637	1300	1300,000
Ba_HID_0007	Manantial	853620,980	1201583,937	1356,489	1356,489
Ba_HID_0008	Manantial	851869,22	1201372,05	1420,64	1420,640
Ba_HID_0009	Manantial	851090,75	1200960	1407,52	1407,520
Ba_HID_0010	Manantial	851018	1200985	1431,87	1431,870
Ba_HID_0011	Manantial	851821,495	1199438,781	1408,512	1408,512
Ba_HID_0012	Manantial	852805,233	1199858,645	1386,506	1386,506
Ba_HID_0013	Manantial	859729,9	1208273,9	2157	2157,000
Ba_HID_0014	Manantial	863096,425	1207599,021	1611,911	1611,911
Ba_HID_0015	Manantial	863206	1207514	1637	1637,000
Be_A_014	Aljibe	836184,42	1192584,75	1440,65	1426,210
Be_A_018	Aljibe	835857,44	1191534,31	1441,288	1438,528
Be_A_019	Aljibe	838373,51	1192233,12	1439,506	1435,916
Be_A_022	Aljibe	836335,32	1189692,37	1443,522	1433,642
Be_A_039	Aljibe	835569,93	1193626,17	1450,318	1446,948
Be_A_048	Aljibe	836461,75	1192197,08	1426,288	1423,568
Be_HID_0001	Manantial	830151,451	1199262,331	2546,920	2546,920
Be_HID_0002	Manantial	831327,45	1199194,12	2541	2541,000
Be_HID_0003	Manantial	831452	1198614	2511	2511,000
Be_HID_0004	Manantial	832592,777	1197745,966	2374,425	2374,425
Be_HID_0005	Manantial	835200	1191135	1539	1539,000
Be_HID_0006	Manantial	837946,831	1194865,180	1690,773	1690,773
Be_HID_0007	Manantial	838202,853	1194146,268	1543,163	1543,163
Be_M_023	Manantial	836943,910	1189837,592	1480,562	1480,562
Co_A_008	Aljibe	841221,23	1193958,11	1404,841	1400,316
Co_A_014	Aljibe	839317,96	1192625,09	1421,946	1421,946
Co_HID_0001	Manantial	843441,616	1191110,889	1983,100	1983,100
Co_HID_0002	Manantial	840565,39	1197219,3	2022,39	2022,390
Co_HID_0003	Manantial	840519,513	1197228,114	2018,073	2018,073
Co_HID_0004	Manantial	840411,434	1193202,106	1646,250	1646,250

CÓDIGO	TIPO DE CAPTACIÓN	ESTE (METRO)	NORTE (METRO)	COTA (M.S.N.M.)	NIVEL PIEZOMÉTRICO (M.S.N.M.)
Co_HID_0005	Manantial	840631,165	1193156,532	1619,000	1619,000
Gi_HID_0001	Manantial	848521,5	1197366,7	1421	1421,000
Gi_HID_0002	Manantial	848321	1197554	1410,7	1410,700
Gi_HID_0003	Manantial	848301,5	1197608,6	1393	1393,000
Gi_HID_0004	Manantial	849032,554	1197276,076	1358,351	1358,351
Gi_HID_0005	Manantial	848682,225	1196944,927	1403,695	1403,695
Gi_HID_0006	Manantial	849921	1197554	1646,25	1646,250
Gi_HID_0007	Manantial	848220,306	1196822,582	1444,400	1444,400
Gi_M_001	Manantial	848419,807	1197073,851	1404,873	1404,873



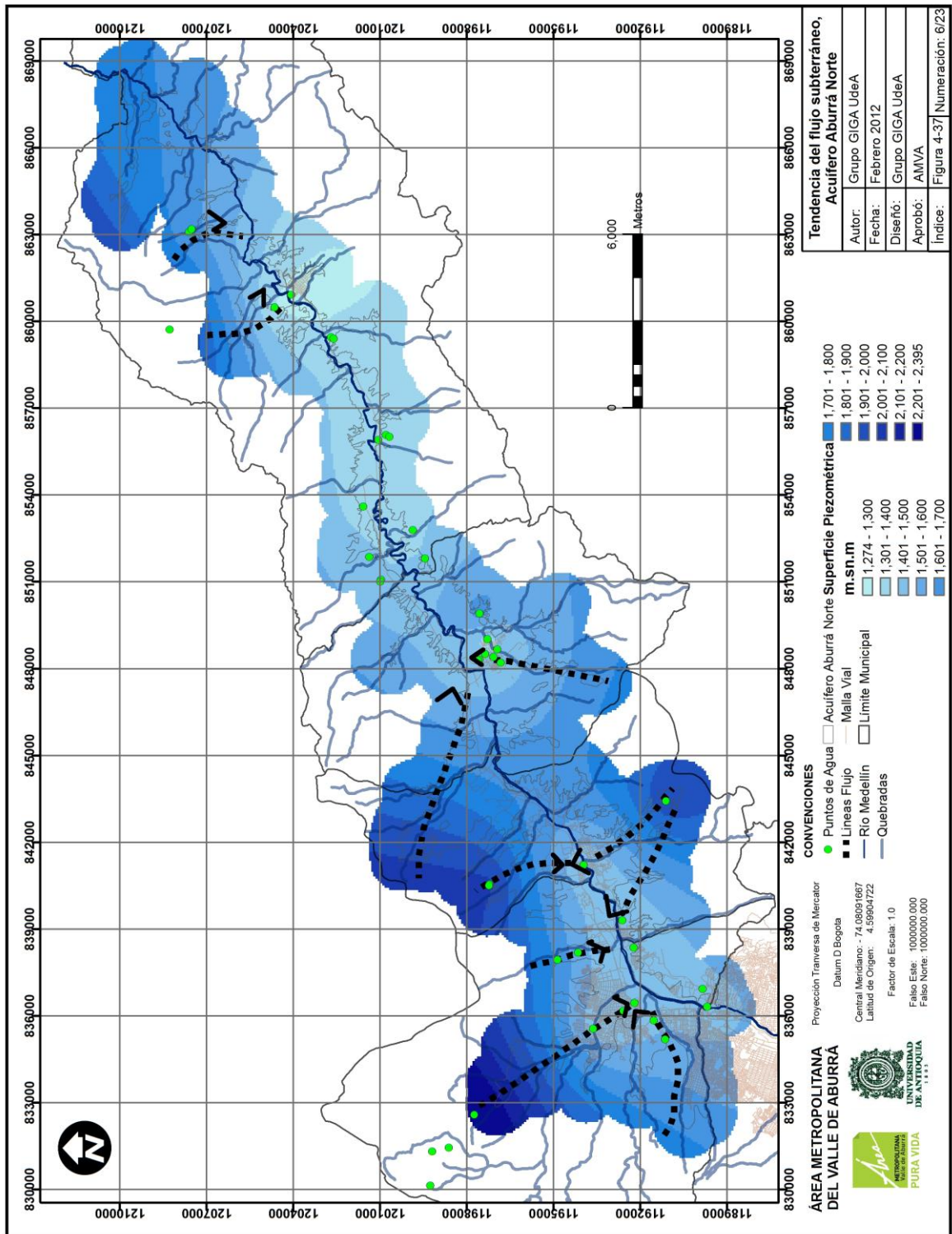


Figura 4.37. Tendencia del flujo subterráneo, Acuífero Aburrá Norte

Se confirma en términos generales la tendencia del flujo subterráneo obtenido durante el proyecto RedRío Fase III, en el cual se menciona que el papel del río Medellín es el de una frontera hidráulica que capta el flujo base.

Como puede verse en la Figura 4.37, la dirección del flujo subterráneo proviene desde las zonas de recarga hacia el río, siguiendo en términos generales el sentido de la pendiente. En el municipio de Barbosa la ubicación de puntos de agua con información del nivel freático no está muy bien distribuida espacialmente, lo cual genera algo de incertidumbre en la superficie piezométrica generada para éste sector.

#### **4.1.5 Propiedades hidráulicas**

Para la determinación de las propiedades hidráulicas de las unidades de interés acuífero que tienen lugar en la zona de estudio se realizaron 22 pruebas de infiltración mediante los métodos del infiltrómetro de aros concéntricos y cilindro excavado, que tienen como propósito evaluar la tasa de infiltración de agua al subsuelo, factor determinante para la recarga y las condiciones de flujo subterráneo.

El método de los anillos se encuentra dentro de los infiltrómetros conocidos como de “carga constante”, que permiten conocer la cantidad de agua que penetra en el suelo en un área cerrada a partir del agua que debe agregarse a dicha área para mantener un tirante constante, que generalmente es de medio centímetro.

Por otra parte, el método de porchet o cilindro excavado consiste en realizar una excavación directamente en el terreno con una profundidad de 30 cm y un diámetro determinado, para ser llenado con agua y definir la tasa de descenso de la columna de agua en el tiempo, introduciendo en la excavación una cinta métrica o regla para tal fin.

De acuerdo con los resultados (Tabla 4.14) las tasas de infiltración varían entre 0 y 24 mm/h, situación que indica que los valores de ingreso de agua al subsuelo son francamente lentos. En el mapa de la Figura 4.38 se observa distribución de estos valores de infiltración. Como se puede observar en la mayoría de las pruebas realizadas en el municipio de Copacabana, la tasa de infiltración dio 0 (impermeable), en los municipios de Barbosa y Girardota la tasa de infiltración varía de lento a moderadamente lento, las pruebas realizadas en el municipio de Bello arrojaron datos muy variables, desde impermeable hasta moderado.

Los datos e interpretaciones de las pruebas de infiltración mediante anillos concéntricos y el método Porchet se pueden consultar en el Anexo 4.6.

En el estudio Actualización del Inventario de Captaciones de Agua Subterránea en la Zona Urbana del Valle de Aburrá, efectuado entre el AMVA y la Universidad Nacional de Colombia, 2008, se realizaron 3 pruebas de bombeo en el municipio de Bello; dado que las magnitudes de los valores de transmisividad y permeabilidad están directamente asociados a las condiciones texturales de las formación hidrogeológicas, en los depósitos aluviales se reportan los valores más altos y en los flujos de lodo los más bajos, Tabla 4.15.

En los 4 piezómetros construidos en este proyecto se efectuaron también pruebas hidráulicas obteniéndose los valores que se indican en la Tabla 4.16.

En la Figura 4.38 se observa la distribución y variación espacial de las pruebas hidráulicas.

**Tabla 4.14. Resultados de las pruebas de infiltración realizadas en campo.**

FID (CÓDIGO ANTERIOR)	CÓDIGO ASIGNADO	MUNICIPIO	TASA DE INFILTRACIÓN ANILLOS CONCÉNTRICOS (MM/H)	TASA DE INFILTRACIÓN ANILLOS CONCÉNTRICOS (CM/H)	CLASIFICACIÓN TASA INFILTRACIÓN
142	Ba_GEO_0052	Barbosa	10.9 – 13.3	1.09 - 1.33	moderadamente lento
14	Ba_GEO_0053	Barbosa	2.9 – 3.2	0.29 - 0.32	lento
143	Ba_GEO_0054	Barbosa	1.9 – 3.5	0.19 - 0.35	lento
131	Ba_GEO_0055	Barbosa	3.2 – 4.6	0.32 - 0.46	lento
130-2	Ba_GEO_0056	Barbosa	0.00	0.00	impermeable
130	Ba_GEO_0057	Barbosa	0.00	0.00	impermeable
34	Ba_GEO_0058	Barbosa	3.0 – 4.0	0.30 - 0.40	lento
32	Ba_GEO_0059	Barbosa	5.0 – 5.5	0.50 - 0.55	moderadamente lento
35	Ba_GEO_0060	Barbosa	0.50	0.05	muy lento
132	Gi_GEO_0029	Girardota	6.0 – 10.0	0.60 - 1.0	moderadamente lento
60	Gi_GEO_0030	Girardota	1.2 – 1.5	0.12 - 0.15	muy lento
66	Gi_GEO_0031	Girardota	0.00	0.00	impermeable
121	Co_GEO_0023	Copacabana	0.00	0.00	impermeable
89	Co_GEO_0024	Copacabana	0.00	0.00	impermeable
83	Co_GEO_0025	Copacabana	0.00	0.00	impermeable
135	Co_GEO_0026	Copacabana	2.4 – 2.6	0.24 - 0.26	lento
79	Co_GEO_0027	Copacabana	0.00	0.00	impermeable
133	Gi_GEO_0032	Girardota	12.8 – 17.1	1.28 - 1.71	moderadamente lento
134	Gi_GEO_0033	Girardota	0.00	0.00	impermeable
116	Be_GEO_0024	Bello	1.2 – 1.4	0.12 - 0.14	muy lento
144	Be_GEO_0025	Bello	21.2 – 24.0	2.12 - 2.40	moderado
138	Be_GEO_0026	Bello	0.00	0.00	impermeable

**Tabla 4.15. Parámetros hidráulicos en el municipio de Bello.**

MUNICIPIO	NOMBRE	UNIDAD HIDROGEOLÓGICA	T (M <sup>2</sup> /DÍA)	K (M/DÍA)	CÓDIGO
Bello	Sede Santa Ana Transportes Hato viejo	A1	4.41	1.50	Be_A_018
	Newtrans. Antes Terpel Fontidueño Ventanas	C	4.41	0.90	Be_A_019
	Bellanita de transportes	A1	9.64	4.92	Be_A_038

**Tabla 4.16. Valores de las pruebas hidráulicas de los piezómetros construidos durante el proyecto**

CÓDIGO ASIGNADO	UBICACIÓN	MUNICIPIO	T (M <sup>2</sup> /DÍA)	K (M/DÍA)
Ba_GEO_0069	Hacienda el Progreso	Barbosa	0.009	$3.7 \times 10^{-3}$
Gi_GEO_0041	COLGRASS	Girardota	0.014	$4.9 \times 10^{-3}$
Co_GEO_0032	Antioqueña de Estibas	Copacabana	0.5	0.28
Ba_GEO_0070	Planta EPM	Barbosa	0.01	$2.6 \times 10^{-3}$



#### 4.1.6 Calidad del agua subterránea

La contaminación de agua subterránea se define como la alteración indeseable en su calidad a consecuencia del desarrollo de actividades humanas (Harter, Thomas; University of California, 2003). El Servicio Geológico Estadounidense define la calidad del agua como una medida de lo apta que puede ser una fuente para un uso particular, basada en el análisis de sus características biológicas, físicas y químicas. En el Anexo 4.7 se consigna toda la información referente a la campaña de muestreo hidrogeoquímico.

Generalmente cada país emite normas acerca de que parámetros deben medirse para cada tipo de uso y cuáles son los límites permisibles. En Colombia las normas de calidad para aguas, cuya destinación será el consumo humano, están regidas por la Resolución 2115 del 22 de junio de 2007, en la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua.

Adicionalmente, en el Decreto 1594 del 1984 se definen criterios de calidad para aguas crudas que van a ser tratadas para consumo humano y para otros usos. En la Tabla 4.17 se presentan los valores admisibles según estas dos normas.

**Tabla 4.17. Síntesis de las normas Colombianas para la calidad del agua, según parámetros analizados.**

CRITERIOS	PARÁMETROS	UNIDADES	VALORES ADMISIBLES			
			RESOLUCIÓN 2115/2007 CONSUMO HUMANO	DECRETO 1594/1984		
				CONSUMO HUMANO Y DOMÉSTICO		USO AGRÍCOLA
				TRATAMIENTO CONVENCIONAL	SÓLO DESINFECCIÓN	
Organolépticos y físicos	Conductividad	micromhos/cm	1000	-	-	-
	pH	-	6.5-9	5 a 9	6.5-8.5	4.5-9
Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana	Nitratos	mg/l NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10	10	10	-
Parámetros microbiológicos	Coliformes totales - (Método filtración por membrana)	UFC/100 cm <sup>3</sup> o microorg./cm <sup>3</sup>	0	20000	1000	5000*
Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana	Calcio	mg/l Ca	60	-	-	-
	Alcalinidad total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	200	-	-	-
	Cloruros	mg/l Cl <sup>-</sup>	250	250	250	-
	Dureza total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	300	-	-	-
Características químicas que	Hierro total	mg/l Fe	0.3	-	-	5

CRITERIOS	PARÁMETROS	UNIDADES	VALORES ADMISIBLES			
			RESOLUCIÓN 2115/2007 CONSUMO HUMANO	DECRETO 1594/1984		
				CONSUMO HUMANO Y DOMÉSTICO		USO AGRÍCOLA
				TRATAMIENTO CONVENCIONAL	SÓLO DESINFECCIÓN	
tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana	Magnesio	mg/l Mg	36	-	-	-
	Sulfatos	mg/l SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	250	400	400	-

Como punto culminante en la definición del modelo hidrogeológico conceptual se determinaron las características de calidad de agua, considerando en este caso las condiciones que debe tener un agua para ser destinada al consumo humano. Durante la ejecución del proyecto se realizaron un total de 24 análisis de calidad, las muestras se procesaron en el Laboratorio de Calidad Ambiental de Corantioquia con certificado para cada uno de los parámetros requeridos. Los puntos de muestreo fueron localizados teniendo en cuenta únicamente criterios hidrogeológicos y la distribución espacial (Tabla 4.18) ya que no se tenía información acerca de fuentes de contaminación local significativa. En los mismos lugares se realizó el monitoreo hidrogeológico.

**Tabla 4.18. Distribución espacial de los puntos**

CÓDIGO	CÓDIGO LABORATORIO	FECHA	MUNICIPIO	ESTE	NORTE
Ba_HID_0014	1609WEC1	24/10/2011	Barbosa	863096	1207599
Ba_A_001	1609WEC2	24/10/2011	Barbosa	860943	1204066
Ba_HID_0006	1609WEC3	24/10/2011	Barbosa	860500	1204637
Ba_HID_0007	1609WEC4	25/10/2011	Barbosa	853621	1201584
Ba_HID_0008	1609WEC5	25/10/2011	Barbosa	851869	1201372
Ba_HID_0012	1609WEC6	25/10/2011	Barbosa	852805	1199859
Co_HID_0001	1609WEC7	25/10/2011	Copacabana	843442	1191111
Co_A_008	1609WEC8	25/10/2011	Copacabana	841221	1193958
Co_A_014	1609WEC9	25/10/2011	Copacabana	839318	1192625
Co_HID_0004	1609WEC10	26/10/2011	Copacabana	840411	1193202
Co_HID_0005	1609WEC11	26/10/2011	Copacabana	840631	1193157
Be_HID_0004	1609WEC12	26/10/2011	Bello	832593	1197746
Be_A_039	1609WEC13	26/10/2011	Bello	835570	1193626
Be_A_014	1609WEC14	26/10/2011	Bello	836184	1192585
Be_A_048	1609WEC15	26/10/2011	Bello	836462	1192197
Be_HID_0006	1609WEC16	26/10/2011	Bello	837947	1194865
Be_HID_0007	1609WEC17	26/10/2011	Bello	838203	1194146
Gi_HID_0006	1609WEC18	31/10/2011	Girardota	849921	1197554
Gi_HID_0007	1609WEC19	31/10/2011	Girardota	848220	1196823
Gi_HID_0002	1609WEC20	31/10/2011	Girardota	848321	1197554
Be_A_019	1609WEC21	31/10/2011	Bello	838374	1192233
Be_M_023	1609WEC22	31/10/2011	Bello	836944	1189838
Be_A_022	1609WEC23	31/10/2011	Bello	836335	1189692
Be_A_018	1609WEC24	31/10/2011	Bello	835857	1191534

Los resultados obtenidos fueron analizados acorde con la normatividad mencionada anteriormente y a continuación se presenta un análisis de los resultados.

Resolución 2115 de 2007:

En la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Acorde con ésta norma el parámetro que menos se cumple en los puntos de agua monitoreados es el de coliformes totales, con un 100% de los sitios muestreados por fuera del valor aceptado en la norma; el siguiente parámetro de importancia que incumple la norma son los nitratos, con un 66.7% de las muestras, ver Tabla 4.19.

**Tabla 4.19. Valoración según resolución 2115 de los puntos monitoreados.**

PARÁMETRO	PUNTOS MENOR QUE EL LIMITE	PUNTOS EN EL LIMITE	PUNTOS MAYOR QUE EL LIMITE
	OCT-2011	OCT-2011	OCT-2011
Alcalinidad	21	-	3
Calcio Soluble	23	-	1
Cloruros	23	-	1
Conductividad	23	-	1
Dureza Total	23	-	1
Hierro ferroso	24	-	-
Magnesio disuelto	19	-	5
Nitratos	8	-	16
pH	22	-	2
Sulfatos	24	-	-
Coliformes totales	-	-	24

Decreto 1594 de 1984:

Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.

Artículo 38: Menciona los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso humano y doméstico, que indican que para su potabilización se requiere solamente tratamiento convencional. En éste orden de ideas, el parámetro correspondiente a nitratos es el que más sobrepasa los límites establecidos, con un 66.7% de las muestras, ver Tabla 4.20.

**Tabla 4.20. Valoración según decreto 1594 de 1984, artículo 38 de los puntos monitoreados.**

PARÁMETRO	PUNTOS MENOR QUE EL LIMITE	PUNTOS EN EL LIMITE	PUNTOS MAYOR QUE EL LIMITE
	OCT-2011	OCT-2011	OCT-2011
Cloruros	23	-	1
Nitratos	8	-	16
pH	24	-	-
Sulfatos	24	-	-
Coliformes	20	-	4

Artículo 39: Se refiere a los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso hídrico para consumo humano y doméstico, e indica que para su potabilización se requiere solo desinfección. El análisis de las muestras bajo estos criterios define a los nitratos y



coliformes como los parámetros más problemáticos en cuanto a calidad se refiere. Ver Tabla 4.21.

**Tabla 4.21. Valoración según decreto 1594 de 1984, artículo 39 de los puntos monitoreados.**

PARÁMETRO	PUNTOS MENOR QUE EL LIMITE	PUNTOS EN EL LIMITE	PUNTOS MAYOR QUE EL LIMITE
	OCT-2011	OCT-2011	OCT-2011
Cloruros	23	-	1
Nitratos	8	-	16
pH	24	-	-
Sulfatos	24	-	-
Coliformes	20	-	4

Siendo los coliformes y nitratos el grupo de parámetros que registran condiciones más críticas, se presenta en la Figura 4.39 y Figura 4.40, el comportamiento de cada uno de éstos en la zona de estudio.

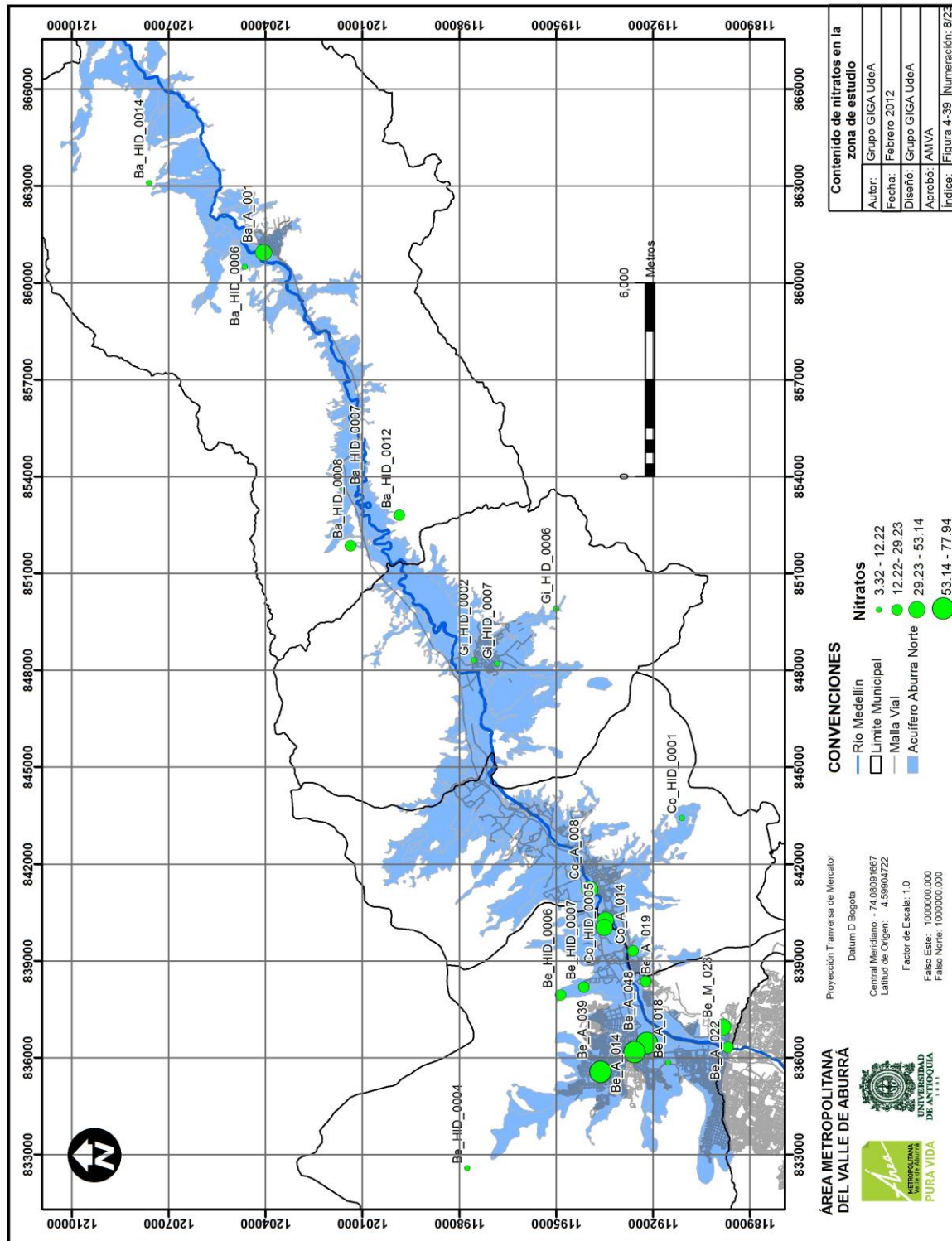


Figura 4.39. Contenido de nitratos en la zona de estudio

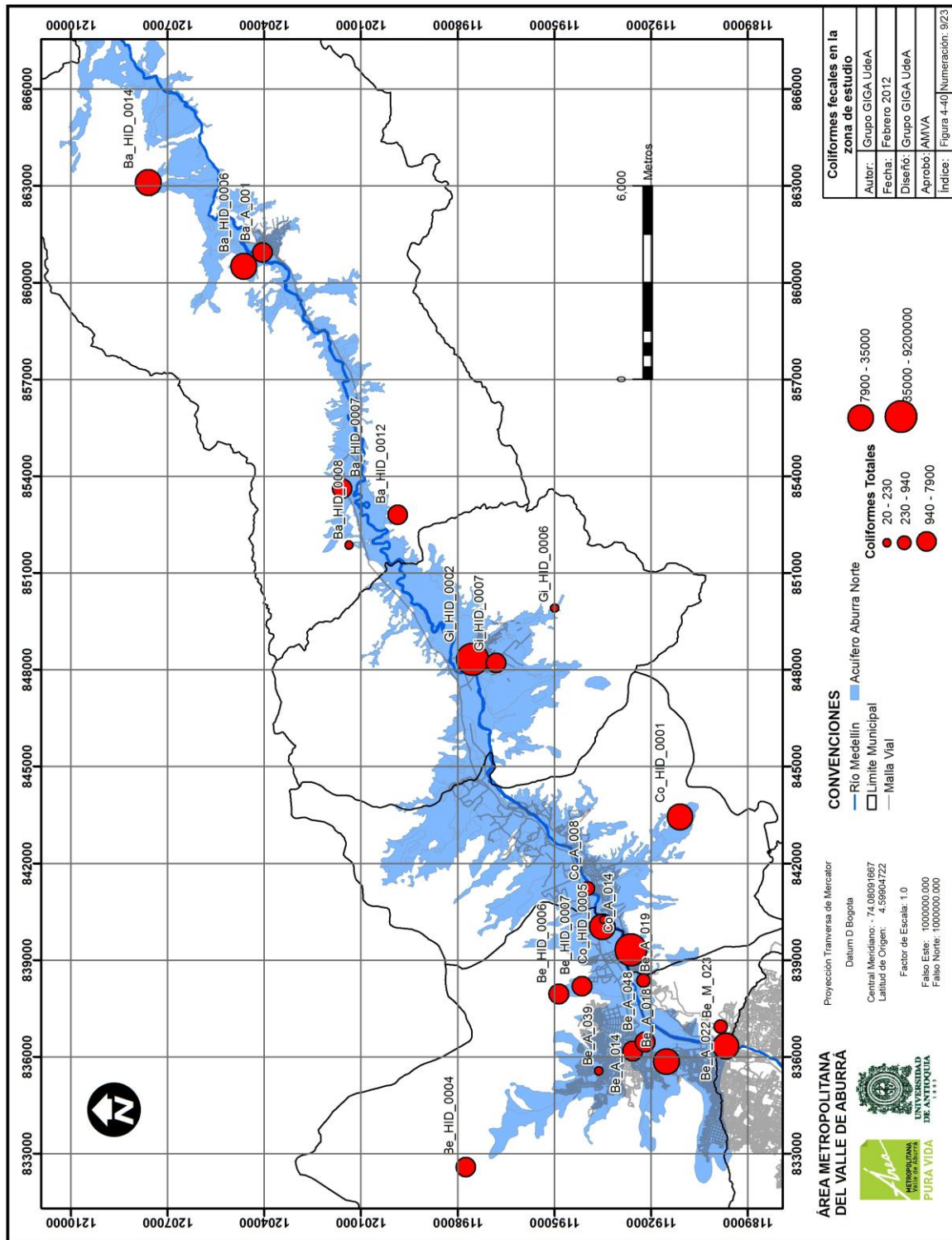


Figura 4.40. Coliformes fecales en la zona de estudio.

#### 4.1.7 Índice de calidad del agua subterránea

Durante el desarrollo de la investigación: “Propuesta de implementación de metodologías para la evaluación Hidrogeoquímica y de calidad de las aguas subterráneas y aplicación a la zona del Bajo Cauca antioqueño” de 2007, se construyó un índice de calidad de agua subterránea para consumo humano, que se retoma en el presente informe. Para esta metodología se tomó como referencia lo propuesto en el proyecto RedRío Fase II, el cual a su vez se apoya en la propuesta de Martínez, 2006.

El índice de calidad ICA-AS está diseñado para evaluar la calidad del agua subterránea que quiere usarse con fines domésticos, en relación con la normatividad colombiana sobre el tema. Se puede usar para determinar si es posible consumir el agua de la captación solo con un tratamiento de desinfección, resultados que interesan además a las Autoridades Ambientales y entes territoriales respectivos.

La propuesta del índice de calidad se construye a partir del Decreto 475 de 1998 donde se dan las normas para agua potable y segura y el decreto 1594 de 1984 donde se normalizan los parámetros para aguas crudas que requieren tratamiento convencional y para aguas crudas que requieren sólo desinfección. Se seleccionaron los parámetros cuya presencia según el decreto 475 de 1998 pueden afectar directamente la salud de los usuarios y los que alteran la calidad del agua en lo que se refiere a criterios organolépticos y químicos que pueden limitar su uso doméstico, estos son: Coliformes fecales, Nitratos, Hierro, Dureza, pH, Color y Turbidez.

Cabe anotar, que aunque este índice fue construido con base en los valores admisibles para estos parámetros registrados en el Decreto 475 de 1998 que fue derogado por el decreto 1575 y por la resolución 2115 de 2007, estos valores no cambiaron, excepto por el valor de dureza que en la normatividad reciente es más laxo.

El índice de calidad para agua subterránea se calcula según la siguiente Ecuación:

$$ICA-AS = \sum (Y_i \times P_i)$$

Dónde:

(Y<sub>i</sub>): valor de calificación que depende del cumplimiento o no de la norma

(P<sub>i</sub>): valor de peso de cada parámetro.

Los valores de peso (P) se determinaron de acuerdo a la afectación que tiene cada parámetro sobre la calidad del agua para uso doméstico, los parámetros más críticos son los coliformes fecales y los nitratos, por esta razón tienen pesos de 0.3 y 0.25 respectivamente. La turbiedad y el color afectan la calidad estética del agua y puede limitar su uso considerablemente y reciben un valor de peso de 0.12. El pH, el hierro y la dureza limitan el uso del agua pero no de una manera tan significativa porque no tienen efecto adverso directo sobre la salud de los consumidores o la apariencia del agua y reciben un valor de peso de 0.07. En la Tabla 4.22 se muestran los valores de P y Y para cada parámetro.

**Tabla 4.22. Valores de Y y P para cada parámetro.**

PARÁMETRO DE CALIDAD	CONCENTRACIÓN	VALOR CALIFICACIÓN QUE DEPENDE DEL CUMPLIMIENTO O NO DE LA NORMA Y	VALOR DE PESO DE CADA PARÁMETRO P
Coliformes Fecales (microor/cm <sup>3</sup> ) o (UFC/cm <sup>3</sup> )	0	10	0.3
	0-500	$4 \cdot 10^{-5} X^2 - 0.04X + 10$	
	500-1000	0	
	1000-5000	-2	
	5000-10000	-3	
Nitratos (mg N-NO <sub>3</sub> /L)	>10000	-4	0.25
	10 o <10	10	
	10-25	$0.0177 X^2 - 1.2849X + 21.068$	
pH	>25	0	0.07
	<2.5 o >10	0	
	6.5-9	10	
	2.5-6.5	$2.5X - 6.25$	
Dureza (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	9-10	$-10X + 100$	0.07
	160 o <160	10	
	160-200	$-0.25X + 50$	
Hierro (mg Fe/L)	>200	0	0.07
	0.3 o <0.3	10	
	0.3-1	$17.191X^2 - 36.393X + 19.266$	
Turbiedad (UNT)	>1	0	0.12
	5 o <5	10	
	5-25	$-0.5X + 12.5$	
Color (UPC)	>25	0	0.12
	15 o <15	10	
	15-35	$-0.5X + 17.5$	
	>35	0	

**Tabla 4.23. Calificación para los valores del ICA-AS.**

VALOR ICA-AS	CALIFICACIÓN
10	Excelente
9-10	Muy buena
6-9	Buena
5-6	Regular
2.5-5	Mala
0-2.5	Muy mala

Aplicando ésta metodología a los resultados obtenidos durante el muestreo realizado en el proyecto, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 4.24 y en la Figura 4.41. Valoración según el ICA-AS a los puntos del muestreo Hidrogeoquímico.

**Tabla 4.24. Calificación para los valores del ICA-AS a las muestras analizadas durante el proyecto.**

CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE	FECHA	ICA-AS	CALIFICACIÓN
Ba_A_001	Terpel Puerta del Nordeste	24/10/2011	3,9	Mala
Ba_HID_0006	Manantial-Estación del ferrocarril	24/10/2011	5,8	Regular
Ba_HID_0007	Manantial- Rancho Laura	25/10/2011	6,1	Buena
Ba_HID_0008	Manantial- Finca el agua	25/10/2011	6,9	Buena

CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE	FECHA	ICA-AS	CALIFICACIÓN
Ba_HID_0012	Manantial- Finca el Divino Niño	25/10/2011	4,4	Mala
Ba_HID_0014	Manantial-Vereda El Guayabo	24/10/2011	5,8	Regular
Be_A_014	San Antonio 1	26/10/2011	3,6	Mala
Be_A_018	Sede Santa Ana transportes Hato viejo	31/10/2011	5,3	Regular
Be_A_019	Newtrans	31/10/2011	4,1	Mala
Be_A_022	Estación de Servicio Los Ángeles	31/10/2011	2,7	Mala
Be_A_039	Bellanita transporte	26/10/2011	6,6	Buena
Be_A_048	Parqueadero PH	26/10/2011	3,9	Mala
Be_HID_0004	Manantial-Cuartas	26/10/2011	6,4	Buena
Be_HID_0006	Manantial Cerro quitasol (telesilla)	26/10/2011	3,9	Mala
Be_HID_0007	Manantial Cerro quitasol (vía q conduce a las telesillas)	26/10/2011	4,7	Mala
Be_M_023	Mobil La Autopista	31/10/2011	3,8	Mala
Co_A_008	Parqueadero Julián Autos	25/10/2011	4,4	Mala
Co_A_014	Motel Ciudadela Doresky	25/10/2011	4,0	Mala
Co_HID_0001	Manantial - Los Guarangos	25/10/2011	5,8	Regular
Co_HID_0004	Conasfaltos	26/10/2011	6,0	Buena
Co_HID_0005	Conasfaltos	26/10/2011	3,1	Mala
Gi_HID_0002	Manantial - Vía Principal hacia Barbosa	31/10/2011	5,8	Regular
Gi_HID_0008	Manantial- Jamundí	31/10/2011	7,9	Buena
Gi_M_001	Parqueadero Girardota Plaza	31/10/2011	6,1	Buena

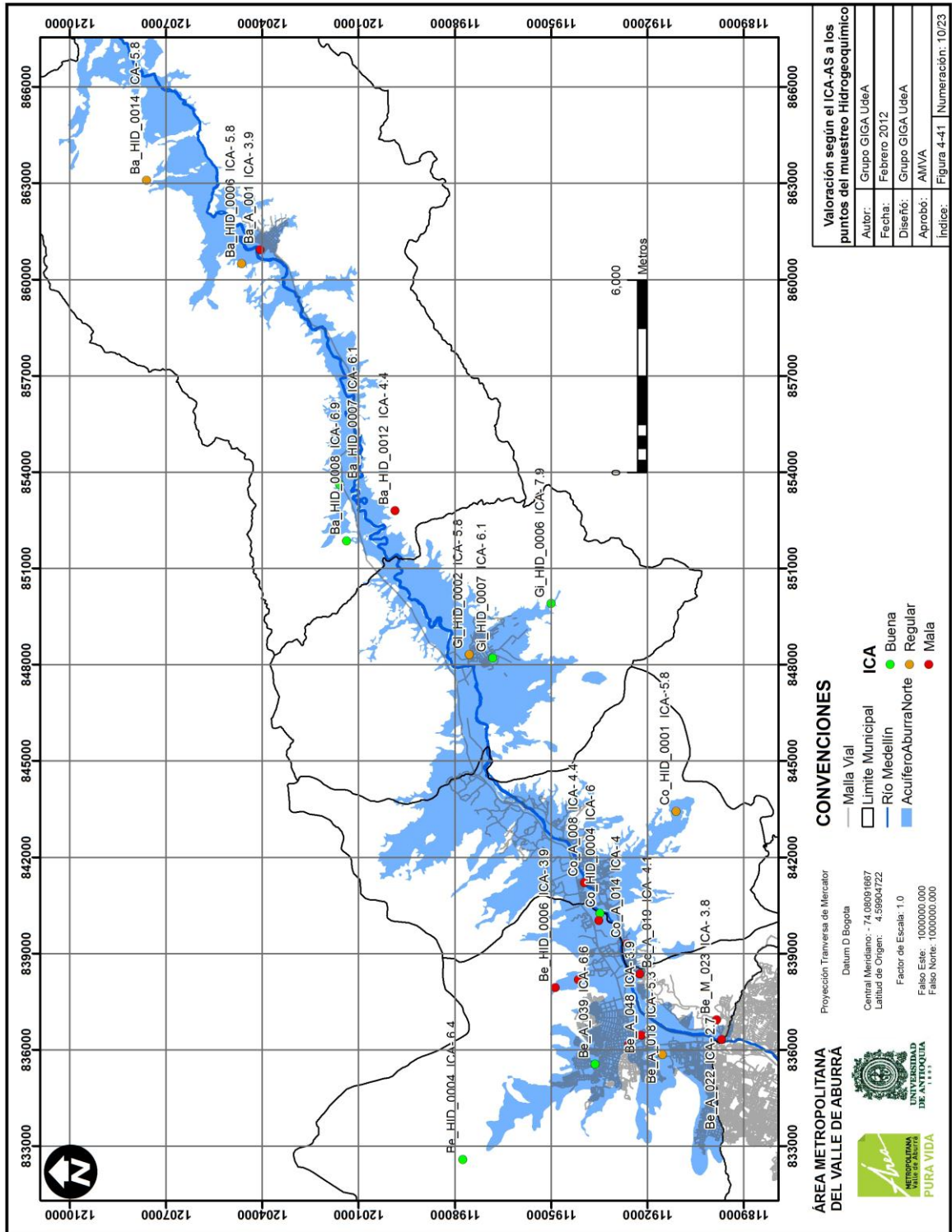


Figura 4.41. Valoración según el ICA-AS a los puntos del muestreo Hidrogeológico.

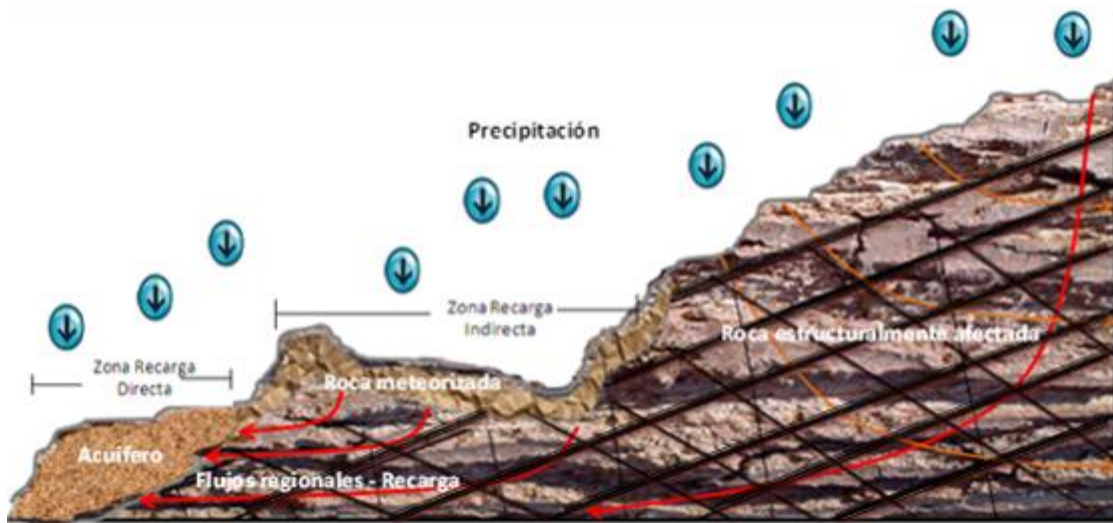
## 4.2 ÁREAS Y FUENTES DE RECARGA

La distribución espacial de las unidades hidrogeológicas, los atributos geomorfológicos del paisaje, las características estructurales de las rocas que encajan a los acuíferos, la hidrografía, el tipo de cobertura, las características hidráulicas de los suelos y las condiciones hidrometeorológicas, son factores que condicionan la recarga de un sistema acuífero.

Para la zona de estudio se considera como hipótesis la existencia de tres posibles fuentes de recarga: i) En principio se tiene una recarga distribuida a lo largo y ancho de las superficies libres en donde afloran las unidades acuíferas, ii) en segundo lugar se produciría recarga a través de la interacción hidráulica que existe entre los principales cuerpos de agua superficial como lo son el río Aburrá-Medellín y los afluentes principales, y iii) finalmente se daría recarga lateral indirecta desde las rocas ígneas y metamórficas encajantes del sistema.

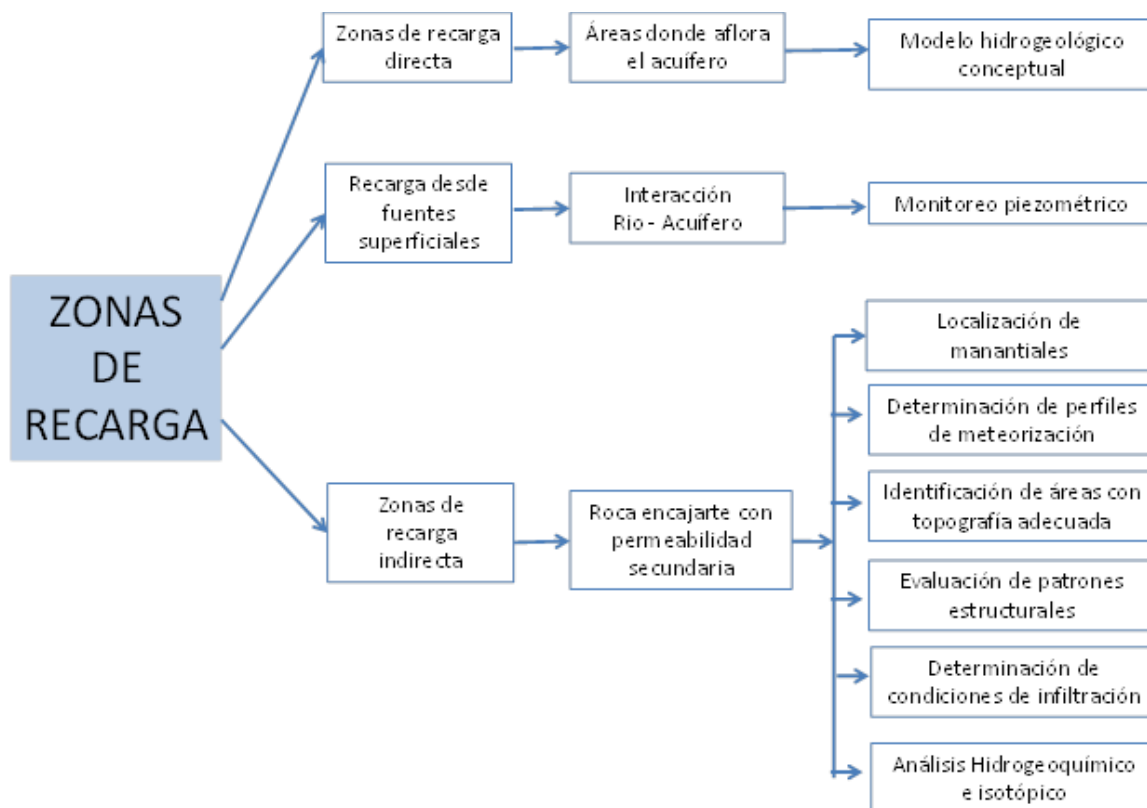
En el esquema de la Figura 4.42 se ilustran los procesos de recarga directa e indirecta a un acuífero. Tal y como está establecido en el esquema conceptual del ciclo hidrológico, el agua que precipita en una región determinada puede tomar varias rutas según las cuales podría regresar a la atmosfera como evapotranspiración o podría fluir directamente sobre la superficie del terreno como escorrentía superficial directa. También podría almacenarse temporalmente en depresiones del terreno o infiltrarse, constituyendo estas dos opciones fuentes posibles de recarga. En las áreas donde los acuíferos afloran en superficie es propicia la recarga directa, ella ocurre a tasas variables dependiendo de las condiciones texturales de la zona no saturada. Las características topográficas del terreno representan el primer factor determinante para favorecer o no la escorrentía superficial, solo en aquellas áreas donde se registren paisajes planos, suaves u ondulados puede ocurrir el almacenamiento o retención en superficie que posibilite luego la infiltración; sin embargo para que se de este proceso es preciso que el suelo posea ciertas condiciones de permeabilidad según las cuales los grados de humedad del suelo alcancen dimensiones propicias para el flujo de agua a través de él. La permeabilidad secundaria en rocas duras se adquiere mediante procesos de meteorización física y química que pueden convertir los saprolitos en suelos o que pueden configurar rutas preferenciales para el movimiento de fluidos según disposición, apertura y densidad de las diaclasas. Así, el agua que se almacena y fluye por un acuífero puede provenir de la recarga directa a partir de los excedentes de la precipitación local o puede involucrar flujos regionales que en ocasiones llegarían a involucrar largas distancias y prolongados tiempos de recorrido.





**Figura 4.42 Esquema pictórico sobre procesos de recarga directa e indirecta.**

Recogiendo este conjunto de ideas, en el diagrama de la Figura 4.43 se resumen los elementos y actividades consideradas en este estudio para la determinación de las zonas de recarga de los acuíferos del norte del Valle de Aburrá.



**Figura 4.43. Diagrama conceptual para la identificación de zonas de recarga.**

#### 4.2.1 Zonas de Recarga Directa

El mapa de unidades hidrogeológicas permite ubicar los acuíferos, y para ellos, las áreas donde afloran y no han sido impermeabilizados en su superficie por acción de los procesos de urbanización. Esas zonas constituyen las áreas de recarga directa.

Para este proyecto, la identificación de la recarga directa se realizó superponiendo los mapas hidrogeológico y áreas urbanas.

#### 4.2.2 Zonas de Recarga Indirecta

Este tipo de recarga se da normalmente a partir de rocas encajantes del sistema acuífero, que han adquirido condiciones de porosidad y permeabilidad secundaria. Para identificar las áreas que adquieren esta condición de fuente de recarga indirecta se realiza el análisis cruzado de una serie de características de las unidades hidrogeológicas que sirven de basamento a los embalses subterráneos:

- **Localización de manantiales:** Siendo los manantiales puntos de agua en los cuales el agua subterránea aflora de manera natural, su presencia y las posibilidades de aforar en ellos caudal y de tomar muestras de agua, los convierte en fuentes de información indicadora de las rutas de tránsito del recurso hídrico subterráneo.
- **Determinación de perfiles de meteorización:** La evaluación de las propiedades texturales de la zona no saturada, característica que se hereda de la roca madre de acuerdo con los procesos de meteorización física y química que ella haya sufrido, arroja elementos de juicio para estimar la dimensión que puede cobrar el flujo vertical de agua a través de ellos como potencial contribución a la recarga.
- **Identificación de áreas con topografía adecuada:** Los mapas de pendientes y la realización de secciones topográficas transversales permite ubicar sectores en los que se presenten relieves suaves, o peldaños en las vertientes, en los que sea posible temporalmente un almacenamiento superficial que de origen a la infiltración.
- **Evaluación de patrones estructurales:** El objetivo de esta actividad es el de identificar familias y patrones de diaclasamiento que posibiliten el flujo regional hacia las unidades acuíferas. Se deben considerar direcciones y ángulos de buzamiento de las estructuras, densidad de diaclasamiento, apertura de fracturas y características de rugosidad de los planos.
- **Determinación de condiciones de infiltración:** En las zonas donde se cumplan condiciones de topografía adecuada, perfiles de meteorización y patrones estructurales propicios para la infiltración, se practican pruebas de infiltración para evaluar condiciones de permeabilidad.
- **Análisis hidrogeoquímico e isotópico:** La hidrogeoquímica y la isotopía constituyen metodologías para la validación de fuentes y rutas del agua.

La relación topológica que exista entre las potenciales zonas de recarga indirecta y los acuíferos, se suman a las condiciones aquí descritas para poder combinar el análisis de criterios que permitan, además de identificar, jerarquizar el potencial de recarga. Dentro de este estudio, para efectuar la categorización de zonas de recarga, se aplicaron calificaciones entre uno y cinco como se indica en la Tabla 4.25.

**Tabla 4.25. Categorización de las zonas de recarga.**

CALIFICACIÓN	TIPO DE ZONA DE RECARGA	CRITERIOS
5	zona de recarga directa	Son las áreas de recarga más importante en términos de magnitud de esta variable y tiempo de tránsito y residencia del agua en el subsuelo
4	zona de recarga indirecta de importancia alta	Se aplica a áreas en las que se conjugan varios criterios de los aplicados (numeral 4.2.2) a la determinación de zonas de recarga y que tendrían direcciones de flujo preferencial según estructuras hacia extensas unidades acuíferas vecinas
3	zona de recarga indirecta de importancia media	Se aplica a áreas en las que se conjugan varios criterios de los aplicados (numeral 4.2.2) a la determinación de zonas de recarga y que tendrían direcciones de flujo preferencial según estructuras hacia algunas unidades acuíferas vecinas
2	zona de recarga indirecta de importancia baja	Se aplica a áreas en las que se conjugan varios criterios de los aplicados (numeral 4.2.2) a la determinación de zonas de recarga y que tendrían dentro de sus posibles direcciones de flujo algunas según estructuras hacia unidades acuíferas vecinas de poca extensión.
1	zona de recarga indirecta de importancia muy baja	Se aplica a áreas en las que se conjugan varios criterios de los aplicados (numeral 4.2.2) a la determinación de zonas de recarga y que tendrían dentro de sus posibles direcciones de flujo alguna según estructuras hacia poco extensas unidades acuíferas vecinas.

### 4.2.3 Zonas de recarga al norte del Valle de Aburrá

Como se anunció en los párrafos precedentes, para el norte del Valle de Aburrá se han recolectado evidencias que permiten identificar recarga directa a partir de los excedentes de precipitación en las zonas donde el acuífero libre está aflorando y recarga indirecta desde las unidades geológicas encajantes de los depósitos aluviales y de vertiente.

La Figura 4.44 muestra la distribución de los manantiales reconocidos en campo (Anexo 4.8) lo que constituye un primer indicio para sustentar los argumentos según los cuales existen, en las partes altas y a través de las vertientes que circundan el Valle de Aburrá, zonas a través de las cuales el agua fluye subterráneamente desde cotas altas hacia el centro del valle, aflorando hacia zonas donde las condiciones texturales y estructurales orientan el flujo.



En el capítulo 3 se describieron los perfiles de meteorización para las distintas unidades de roca que existen en la zona de estudio, en todos ellos se reconocen desarrollos de suelo que bajo condiciones hidrológicas y topográficas adecuadas podrían dar origen a procesos de infiltración.

Teniendo en cuenta las características geomorfológicas del norte del Valle de Aburrá, considerando que las trazas de las fallas pueden incorporar alineamiento de silletas y que unidades geomorfológicas como los Depósitos Aluviales, las Anfibolitas, el Batolito Antioqueño y las Dunitas de Medellín, pueden presentar condiciones favorables al almacenamiento en el suelo y posterior infiltración, se realizaron varios cortes topográficos que permitieron identificar y localizar sectores donde las características del relieve fueran propicias para el almacenamiento temporal de agua en superficie, estos rasgos corresponden básicamente a los sectores del altiplano y a escalones o peldaños que obedecen principalmente a controles estructurales. En la Figura 4.45 se muestran algunos de los cortes practicados destacando la ubicación de potenciales áreas de recarga indirecta, y en la Figura 4.46 se presentan los perfiles de cada corte. Este proceso de realización de cortes transversales fue fundamental para la posterior localización de los sitios en los que se harían pruebas hidráulicas de infiltración.

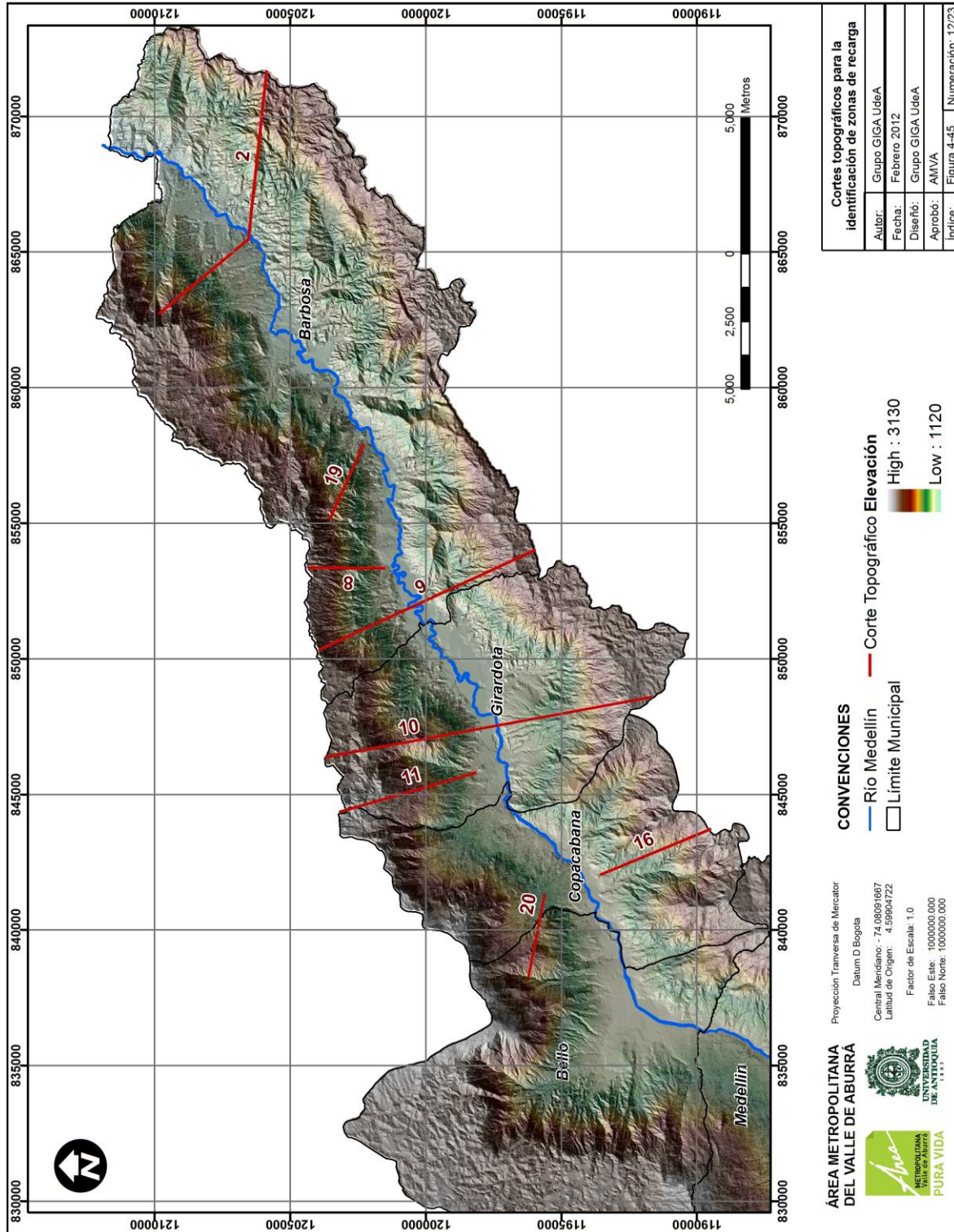
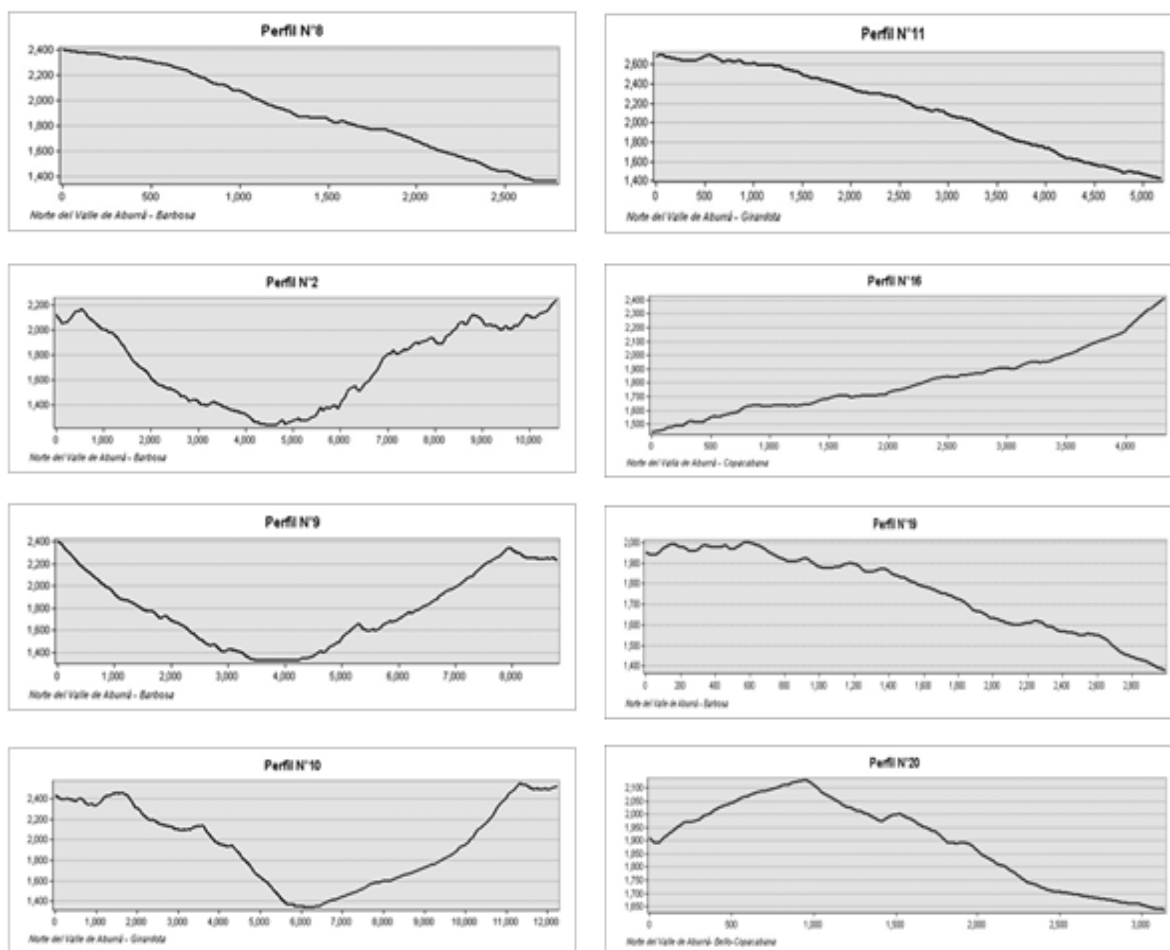


Figura 4.45. Cortes topográficos para la identificación de zonas de recarga.



**Figura 4.46. Perfiles de los cortes topográficos.**

En el Anexo 4.9 se presentan los resultados e interpretación del trabajo de campo correspondiente a las principales estructuras geológicas, detectadas en superficie, de las formaciones litológicas más importantes presentes en el norte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (municipios de Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa), así como el análisis de los datos de campo con el objeto de identificar familias de diaclasas predominantes en el área, tratando de discernir dentro de ellas las tendencias que podrían seguir los flujos de agua subterránea en el subsuelo.

Cada una de las unidades litológicas analizadas presenta un conjunto de datos obtenidos en campo, las cuales fueron procesadas luego con el programa Stereonet para obtener, según direcciones y buzamientos, los diagramas de rosas y densidad de polos.

El análisis final se efectúa localizando esta información sobre mapas que tienen en cuenta cada unidad geológica estudiada y su localización hacia la margen izquierda o derecha del río Aburrá-Medellín.

Con los datos recolectados durante las salidas de campo realizadas a los municipios de Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa, se registraron 57 estaciones de medición, de los cuales se obtuvo 211 datos estructurales, que sumados a 54 datos extraídos de EMSVA

(AMVA, 2007), se generó una base de datos estructurales de 265 datos que incluyen rumbo, buzamiento, rugosidad, densidad y espaciamiento de las principales familias de diaclasa encontradas para cada litología.

Basados en los análisis ejecutados se presenta, para cada una de las litologías, diagramas de rosas que determinan la preferencia de las direcciones de rumbo (de color rojo) y de direcciones de polos (de color azul) de los datos analizados además de diagramas de densidades de contornos (de color negro). Estos diagramas permiten conocer la dirección preferencial del rumbo de los planos analizados además de las zonas de concentración de polos asociados a los planos de diaclasas obtenidos, por medio de los cuales se puede determinar cuál es la dirección de buzamiento que predomina entre las diaclasas de cada tipo de roca. A continuación se sintetizan los resultados más relevantes para cada unidad geológica, separando las condiciones según la vertiente del río en la que se localice.

En la Figura 4.47 y Figura 4.48 se muestra la disposición de estructuras para las anfibolitas de Medellín. Respecto a la margen derecha del río, las familias de diaclasas predominantes (NE/NW y N-S/W), podrían alimentar los acuíferos de la parte baja de la ladera. En relación a la vertiente izquierda del río, los sistemas a partir de los cuales se puede esperar flujo que alimente los acuíferos de la parte baja son las familias de diaclasas NW/E, NS/E, NW/SE, NW/NE.



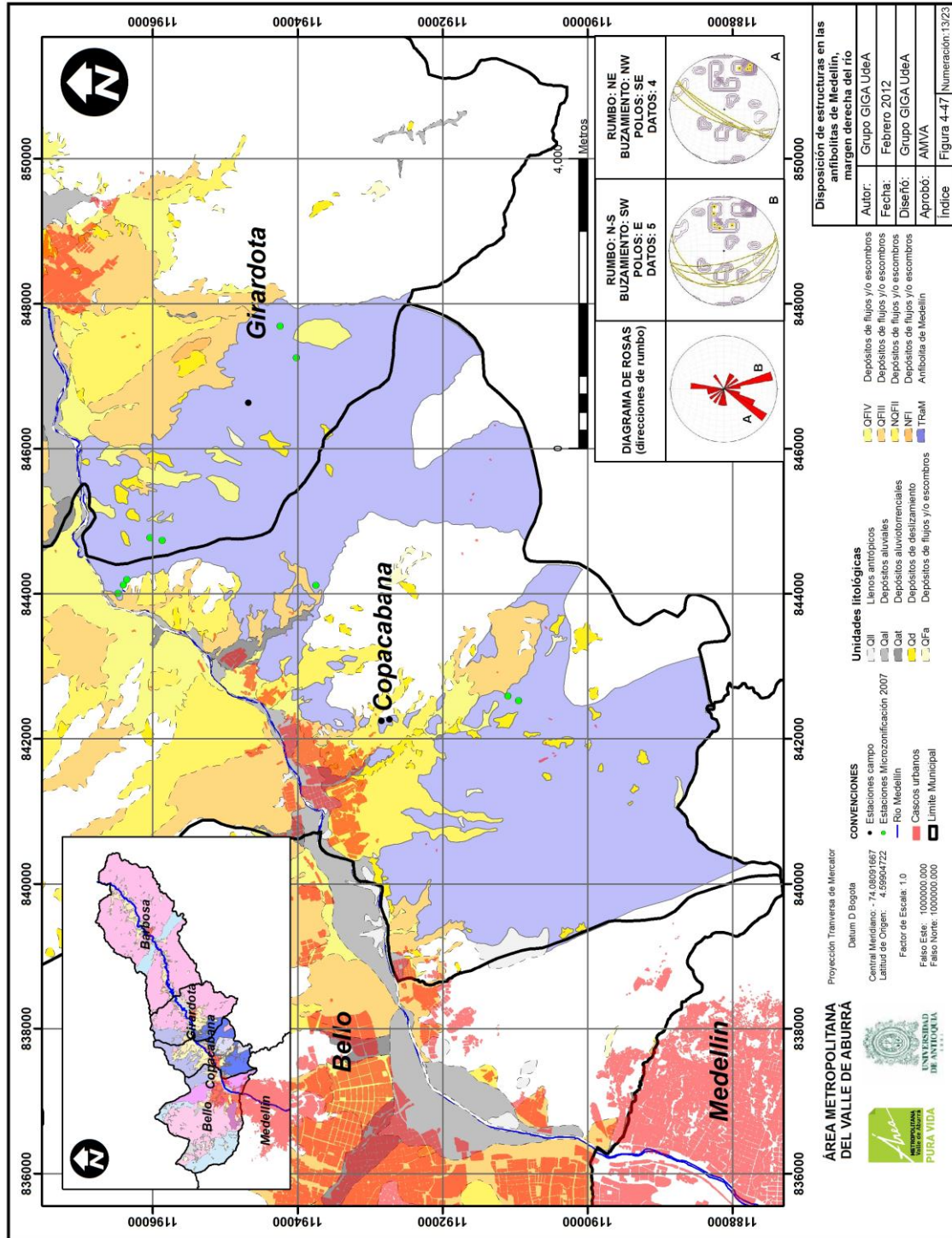


Figura 4.47. Disposición de estructuras en las anfibolitas de Medellín, margen derecha del río.

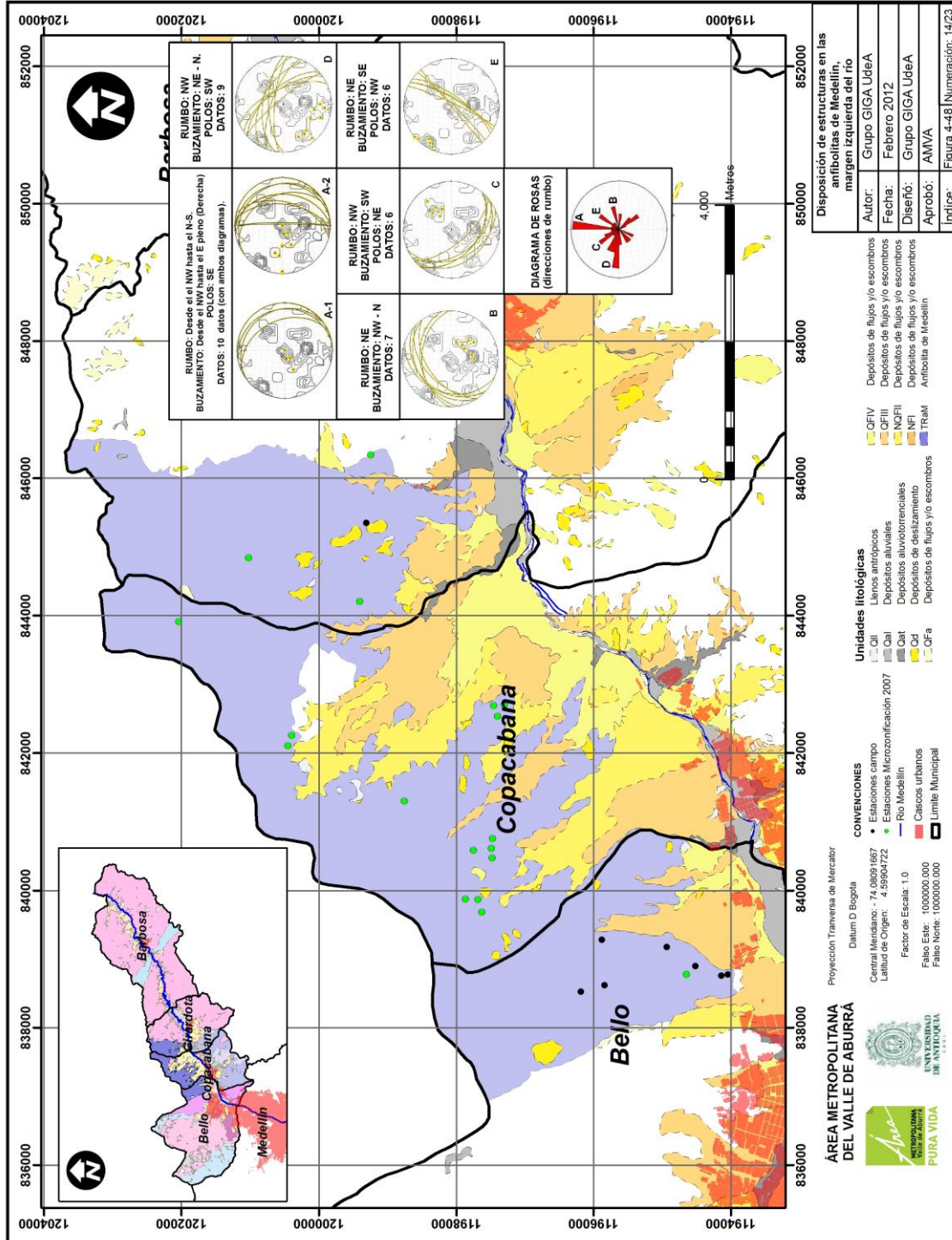


Figura 4.48. Disposición de estructuras en las anfibolitas de Medellín, margen izquierda del río.

Considerando el Batolito Antioqueño y sus vertientes izquierda (Figura 4.49) o derecha (Figura 4.50), es posible establecer que existen sectores donde la recarga directa se favorece. Sobre la margen izquierda la familia NE/SE representa las estructuras que más aportarían a la recarga de acuíferos en la parte baja de la ladera, mientras las familias NE/NW, NW/NE tienen pocas posibilidades como rutas de recarga debido a que sus buzamientos se dirigen al altiplano. Para la margen derecha, el buzamiento de las familias de diaclasas genera una conductividad hidráulica isotrópica dentro de la roca, sin embargo existe una dirección de rumbo y buzamiento que favorece el flujo del agua hacia la parte baja de la ladera –la familia NE/NW.

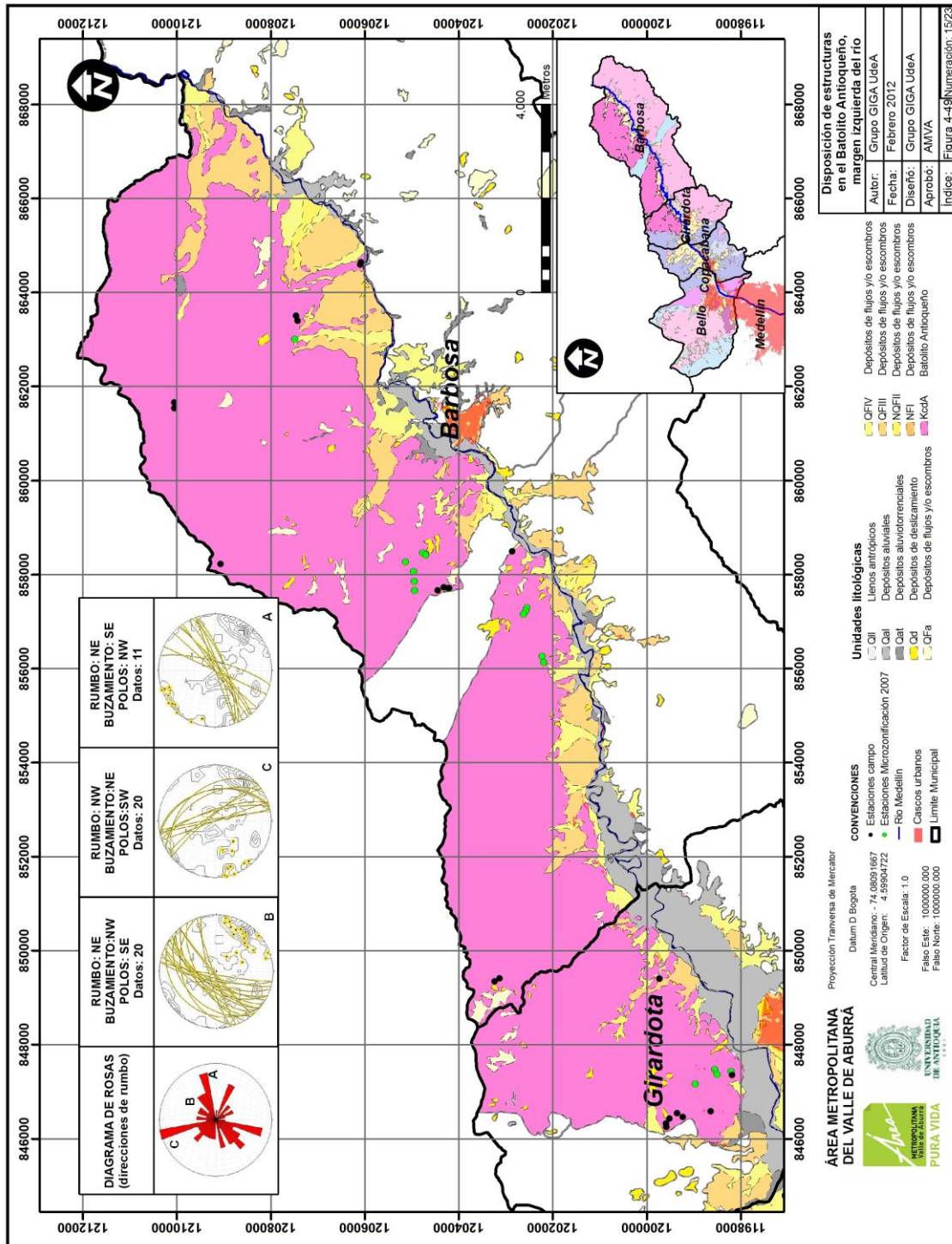


Figura 4.49. Disposición de estructuras en el Batolito Antioqueño, margen izquierda del río.

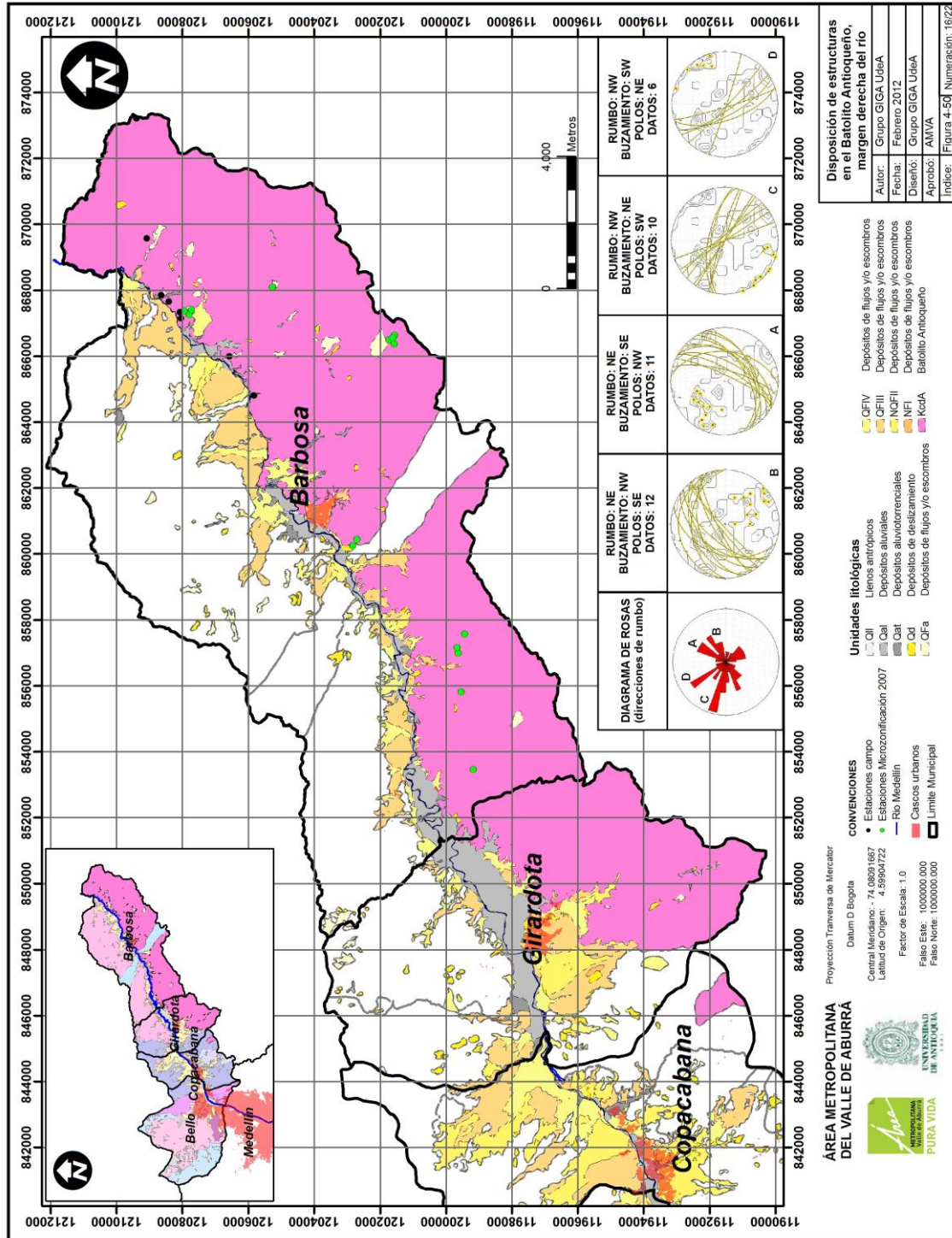


Figura 4.50. Disposición de estructuras en el Batolito Antioqueño, margen derecha del río.

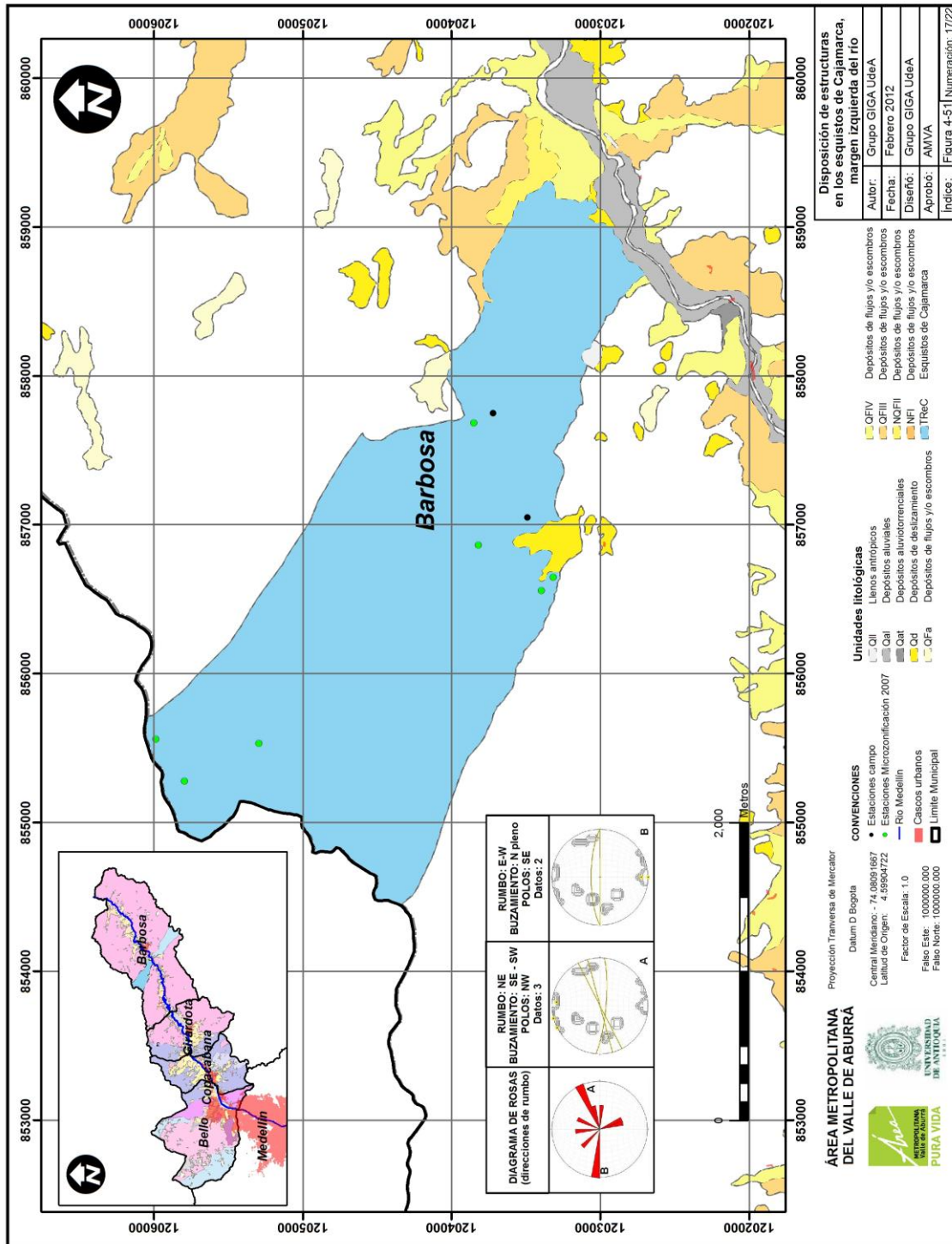


Figura 4.51. Disposición de estructuras en los esquistos de Cajamarca, margen izquierda del río.

Los esquistos de Cajamarca no constituirían áreas de interés como fuente de recarga, según puede leerse de la Figura 4.51 correspondiente a la vertiente izquierda de esta unidad con relación al río Aburrá-Medellín. Un comportamiento similar se presenta hacia la vertiente derecha del río sobre esta misma unidad geológica.

La información sobre relieve, perfiles de meteorización, localización de manantiales y análisis estructural fue objeto de ejercicios de comparación y superposición para definir una serie de sitios en los que se practicarían pruebas de infiltración, para los cuales se tuvo en cuenta criterios de selección como: humedad del suelo, vegetación y geomorfología. Los sitios seleccionados comprenden áreas definidas como fuentes de recarga directa e indirecta.

Los elementos hasta aquí expuestos aportan argumentos suficientes para precisar los límites de las zonas de recarga a los acuíferos del Valle de Aburrá. En la Tabla 4.26 se describen las unidades geológicas que tienen ese carácter y se indica la extensión de ellas, así mismo, en el mapa de la Figura 4.52 se pueden identificar estas áreas.

**Tabla 4.26. Zonas de recarga a los acuíferos del Norte del Valle de Aburrá.**

UNIDAD GEOLÓGICA	DESCRIPCIÓN	FLANCO DEL RÍO	CALIFICACIÓN	UBICACIÓN
Qal	Depósitos aluviales	Ambos	5	Ambas márgenes del río Medellín desde Bello hasta Barbosa
NQFIII	Flujos de escombros y/o lodos	Ambos	5	Ambas márgenes del río Medellín desde Bello hasta Barbosa
QFIV	Flujos de escombros y/o lodos	Ambos	5	Ambas márgenes del río Medellín desde Bello hasta Barbosa
KtO	Stock de Ovejas	Izquierdo	1	Al occidente de la zona de estudio en el municipio de Bello
TReaB	Esquistos de las Baldías	Izquierdo	1	Al occidente de la zona de estudio en el municipio de Bello
JKuM	Dunita de Medellín	Izquierdo	3	Al occidente de la zona de estudio en el municipio de Bello
TRaM	Anfibolitas de Medellín	Derecho	1	Municipio de Copacabana y occidente de Girardota
TRaM	Anfibolitas de Medellín	Izquierdo	4	Municipio de Copacabana y occidente de Girardota Municipio de Barbosa desde Esquistos de Cajamarca hacia el nororient
KcdA	Batolito Antioqueño	Derecho	4	Municipio de Girardota y occidente de Barbosa
KcdA	Batolito Antioqueño	Izquierdo	3	Girardota y Barbosa entre Anfibolitas de Medellín y esquistos de Cajamarca
KcdA	Batolito Antioqueño	Derecho	1	Municipio de Barbosa (excepto sector occidental)

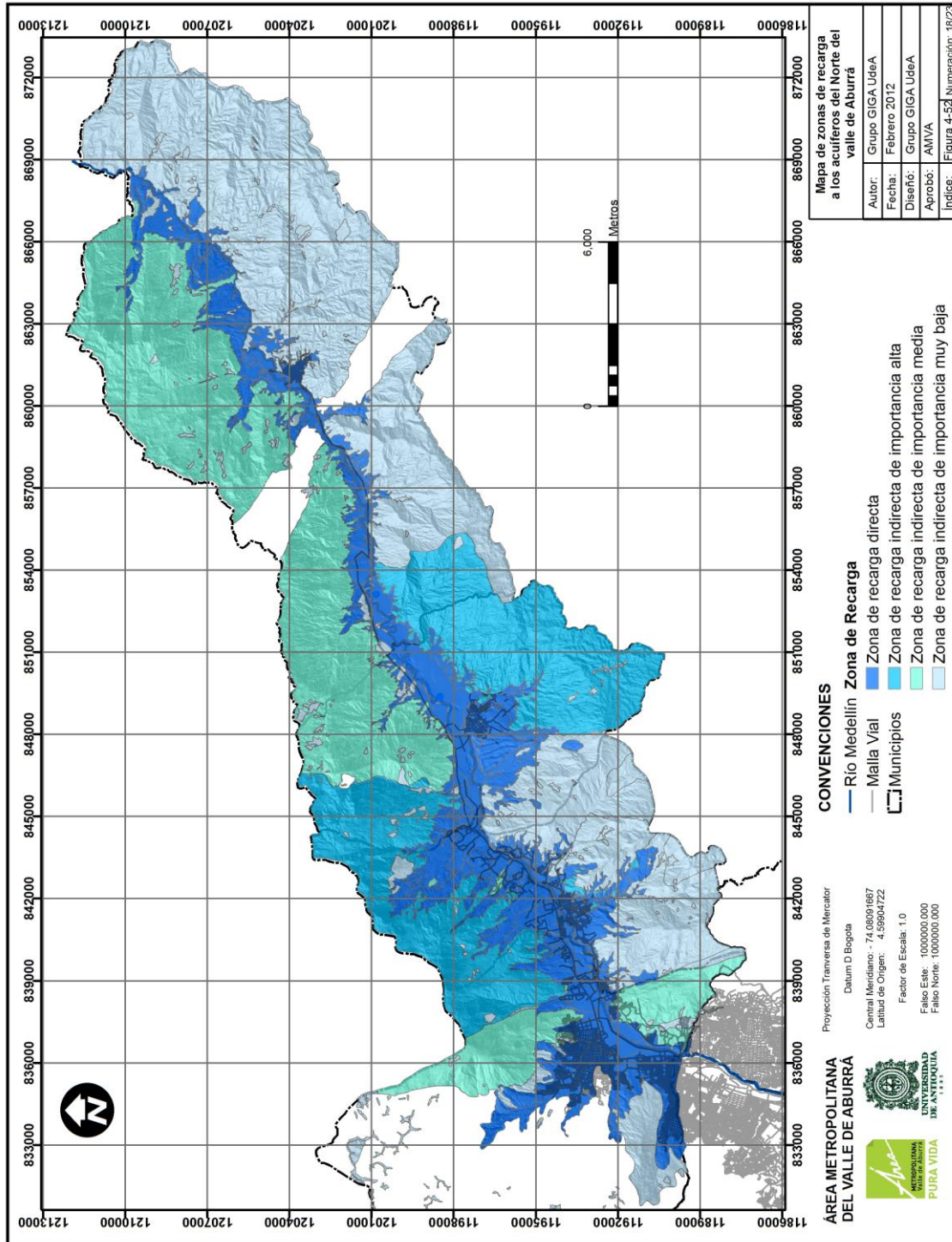


Figura 4.52. Mapa de zonas de recarga a los acuíferos del Norte del Valle de Aburrá..



#### 4.2.4 Validación de Zonas de Recarga

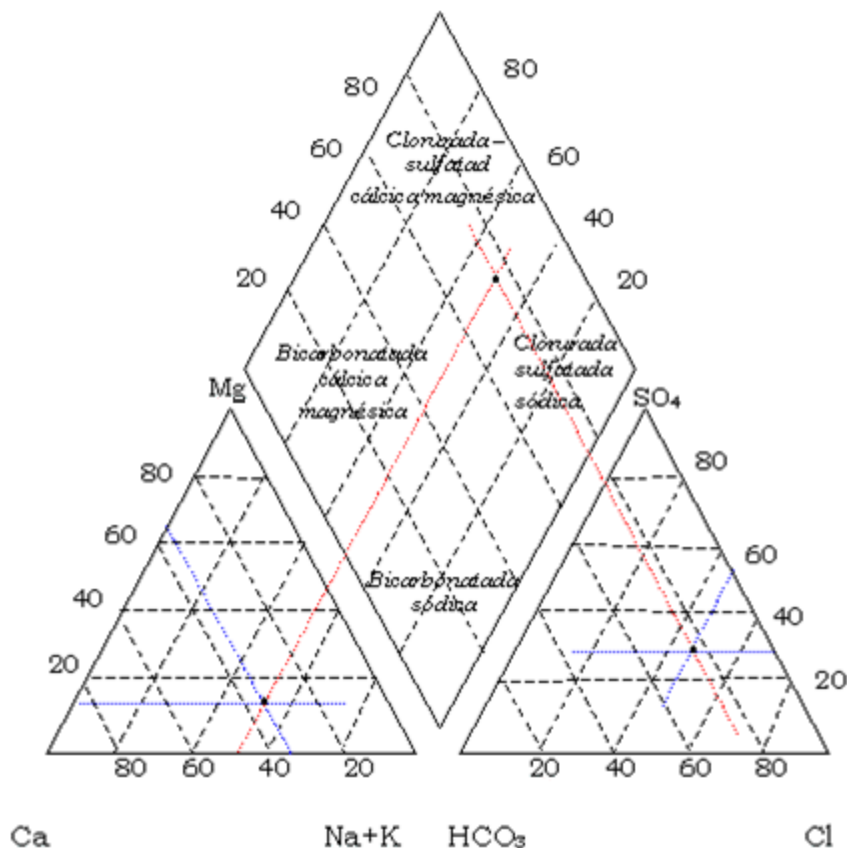
Tres aspectos se tienen en cuenta para la validación de las fuentes de recarga, el primero está relacionado con el punto de origen de las direcciones de flujo hidrogeológico obtenido a partir de información levantada en campo durante el inventario de manantiales y los datos de nivelación piezométrica disponible. Tal como se observó en la Figura 4.37, el flujo de agua subterráneo se orienta hacia el eje del río proviniendo desde las vertientes izquierda y derecha del mismo, este hecho afirma, desde la hidráulica, que las zonas de recarga se localizan hacia la parte alta del valle. Luego la información hidrogeoquímica e isotópica (Anexos 4.7 y 4.10) apuntan de manera más certera a la validación de esta hipótesis.

- **Caracterización Hidrogeoquímica**

La geoquímica es la ciencia que explora los procesos que controlan la composición química del agua subterránea (Appelo & Postma, 2005). En los últimos 50 años, avances en los métodos y enfoques geoquímicos han ayudado a la interpretación de estos procesos y la han convertido en una herramienta para identificar zonas de recarga, relaciones agua superficial – agua subterránea y direcciones de flujo en estudios de contaminación del agua subterránea, procesos de intrusión marina, entre otras.

Considerando que el agua guarda en sus moléculas la historia de su recorrido; un análisis hidrogeoquímico parte del análisis de parámetros físico químicos como pH, temperatura (T), conductividad y potencial REDOX (Eh); de la concentración de los iones mayoritarios presentes como lo son el calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), el sodio ( $\text{Na}^+$ ), el magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), el potasio ( $\text{K}^+$ ), los bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), los sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y de la relación que éstos presentan con la geología y la mineralogía del sistema acuífero.

En los diagramas triangulares, como es el caso del diagrama Piper, las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas, para ello se ubica, en dos triángulos equiláteros alineados, la composición porcentual de los cationes y de los aniones expresados en mili equivalentes, la composición obtenida en cada uno de los triángulos es proyectada en un rombo central en el cual se encuentran diferenciadas cuatro zonas geoquímicas, ver Figura 4.53.



**Figura 4.53. Configuración de un diagrama Piper.**

Durante el mes de octubre de 2011 se realizó una campaña de monitoreo hidrogeoquímico en que se de muestrearon 24 puntos de agua de los cuales 11 son aljibes y 13 manantiales; en el Anexo 4.7 se entregan los resultados reportados por el Laboratorio de Calidad Ambiental de Corantioquia para cada una de las muestras de agua subterránea recolectadas en campo.

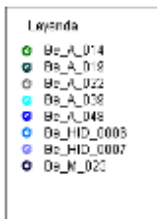
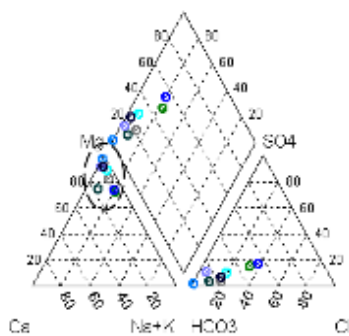
Tal como se menciona en (Sánchez, 2004), las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son generalmente bicarbonatadas, después predomina el sulfato y las aguas más salinas son cloruradas, en su equivalencia catiónica la secuencia análoga sería  $Ca^{2+} \rightarrow Mg^{2+} \rightarrow Na^+$ . Todo esto sujeto a la naturaleza del sustrato rocoso y el tiempo de permanencia del agua, lo cual condiciona la abundancia y solubilidad de las sales.

El diagrama Piper construido a partir de los resultados de la campaña, se obtuvo teniendo en cuenta los puntos de monitoreo cuyo error en balance iónico se encontraba por debajo del 10% (Figura 4.54). De las 24 muestras analizadas solo se descartaron por este criterio 2.

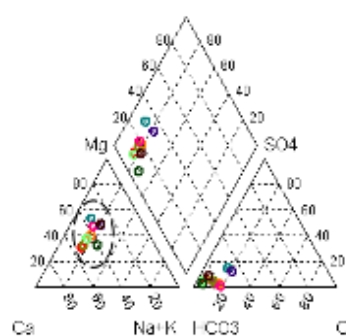
A partir de ésta figura se pueden definir tres configuraciones químicas diferentes en el agua, un primer grupo corresponde al tipo bicarbonatada cálcica a magnésica, luego se tiene



**Piper Bicarbonatadas Magnésicas**



**Piper Bicarbonatadas Cállicas**



**Figura 4.55. Muestras bicarbonatadas magnésicas localizadas en el municipio de Bello.**

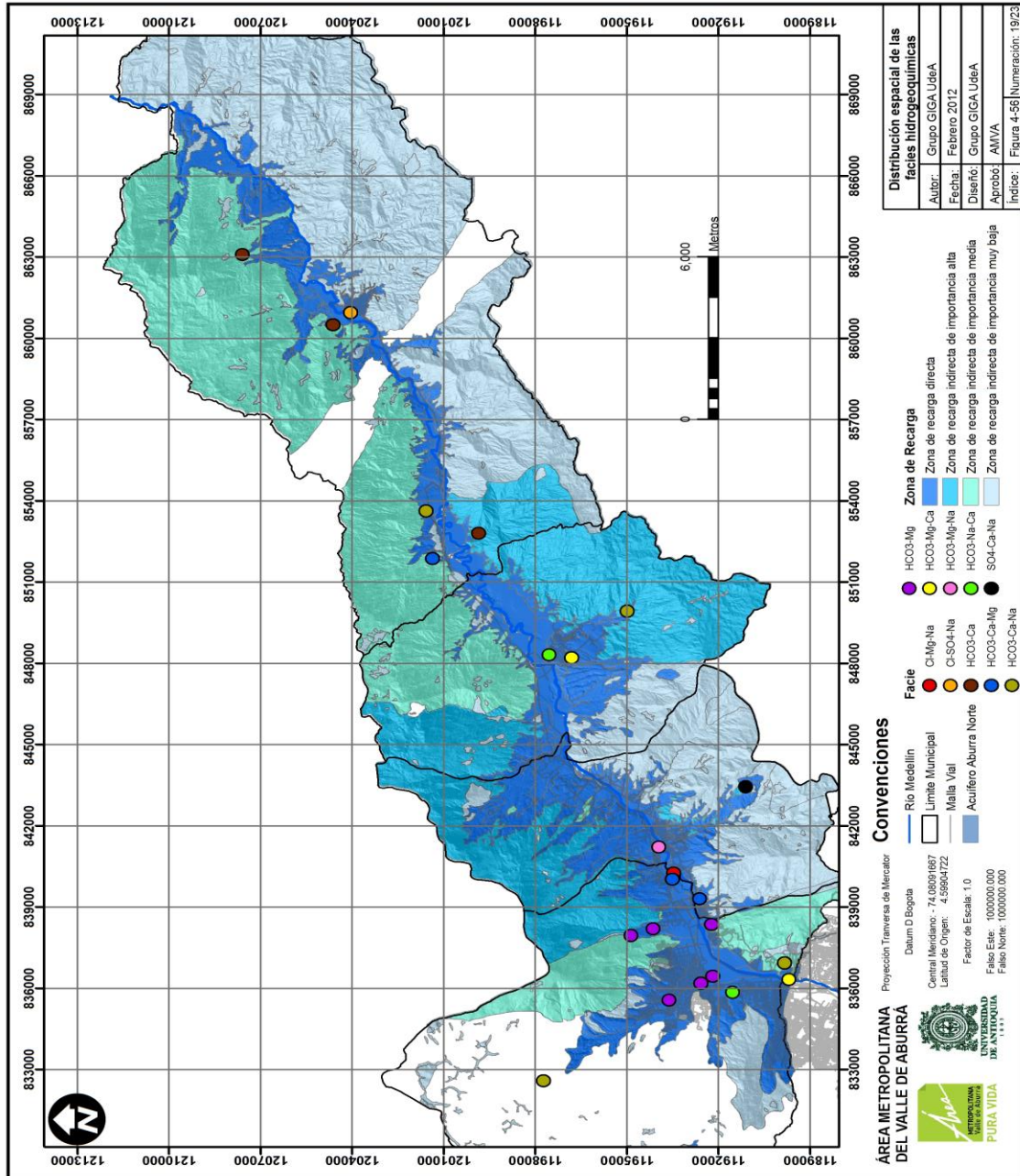


Figura 4.56. Distribución espacial de las facies hidrogeoquímicas.

#### 4.2.5 Caracterización isotópica

Un mismo elemento químico puede tener diferentes núcleos, dando lugar a los llamados Isótopos, los cuales se definen como átomos del mismo elemento que tienen diferente número de neutrones. Para referirse a determinado isótopo se utiliza una convención gráfica en la que un superíndice a la izquierda del símbolo del elemento denota el número de masa, la suma de los neutrones y de los protones, en el isótopo, por ejemplo uno de los isótopos del hidrógeno, el deuterio, denotado como D ó  $^2\text{H}$ , tiene en su núcleo además de un protón, que es característico para el elemento hidrógeno, un neutrón, por su parte el tritio,  $^3\text{H}$ , posee además del protón dos neutrones y así una masa de 3.

Existen dos tipos importantes de isótopos, los naturales y los artificiales, dentro de los isótopos naturales se encuentran los isótopos ambientales, que son aquellos que existen en la atmósfera y la hidrósfera por procesos naturales y pueden ser estables o radioactivos.

Los isótopos radiactivos (inestables) son nuclides (isótopos de un átomo específico) que se desintegran espontáneamente en el tiempo para formar otros isótopos. Por su parte los isótopos estables son nuclides que no presentan decaimiento a otros isótopos durante la escala de tiempo geológico, pero ellos mismos pueden ser el resultado de un decaimiento radioactivo de isótopos.

Tanto los isótopos estables como los radioactivos pueden ser utilizados como trazadores sirviendo para marcar una masa de agua o una cierta cantidad de la misma.

La mayoría de los elementos presentes en sistemas acuíferos tienen algún isótopo, solo los que se encuentran en mayor cantidad como los isótopos del H, C, N, O y S, son de interés hidrogeológico. Dentro de los isótopos más utilizados son los de los elementos que conforman la molécula del agua, es decir los isótopos de H y O, particularmente el  $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$ .

La variación isotópica del agua lluvia en el tiempo y el espacio se expresa mediante la denominada línea de precipitación (o recta meteórica), la cual es equivalente a la relación entre las cantidades de deuterio (D,  $^2\text{H}$ ) y oxígeno 18 ( $^{18}\text{O}$ ) en el agua lluvia. La recta meteórica se representó a nivel mundial (GMWL) mediante la ecuación:

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10\% \text{ SMOW} \text{ (Craig, 1961, citado en Clark and Fritz, 1998)}$$

A nivel local esta recta puede cambiar debido a fenómenos de fraccionamiento isotópico, generados por particularidades físicas y meteóricas, denominándose línea meteórica local (LML). Cualquier estudio detallado de recarga de agua subterránea usando  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ , debe intentar definir lo mejor posible la LML, la cual debe ser construida con mínimo un año de información isotópica mensual.

Los contenidos de los isótopos estables pesados de oxígeno ( $^{18}\text{O}$ ) e hidrógeno ( $^2\text{H}$  o D) son utilizados como trazadores del origen de las aguas subterráneas dado que sus contenidos se consideran conservativos una vez que el agua ha entrado en el acuífero, es decir, sus contenidos (relación: isótopo pesado/isótopo liviano) no se ven afectados por las interacciones del agua con la matriz rocosa del acuífero; los únicos procesos que modifican la abundancia isotópica original son la evaporación y la mezcla de dos tipos diferentes de aguas.

Para observar la relación entre aguas lluvia y subterránea se evalúa sobre un gráfico  $\delta^{18}\text{O}$  vs.  $\delta^2\text{H}$  la posición de las muestras de agua subterránea de cada unidad hidrogeológica con relación a las tendencias meteóricas a las que se asocian según las posibles hipótesis de fuente de recarga, así se determina la homogeneidad o no de los datos, que se traduce en un indicio de que tan buena es la mezcla del agua en el acuífero. También se identifica si la recarga se ha producido directamente desde la precipitación o desde fuentes que han sufrido evaporación según como las muestras se ubiquen por encima o por debajo de la línea meteórica local (Hunt et al, 2005).

Durante la ejecución de este proyecto se recolectaron, desde 5 estaciones totalizadoras de lluvia, 15 muestras, correspondientes a los meses agosto, septiembre y octubre. Se tomaron 3 muestras de agua del río Medellín y 38 muestras de agua subterránea; las aguas superficiales y subterráneas se muestrearon entre los meses de septiembre y octubre de 2011. Los análisis a  $18\text{O}$  y  $2\text{H}$  fueron practicados en el espectrómetro laser del laboratorio de calidad ambiental de CARSUCRE, facultado por la Agencia Internacional de Energía Atómica para este tipo de análisis. Los resultados se consignan en el Anexo 4.10.

En la Tabla 4.27 se sintetizan los datos isotópicos obtenidos en este estudio, y en el mapa de la Figura 4.57 la espacialización de los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y su relación con las zonas de recarga.

**Tabla 4.27. Datos isotópicos obtenidos en este estudio**

CÓDIGO	NOMBRE	TIPO	FECHA	NORTE	OESTE	COTA	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
Me_HID_0001	Santa Elena	Lluvia	31/10/2011	843179	1177305	2607	-14.09	-97.90
Me_HID_0001	Santa Elena	Lluvia	31/08/2011	843179	1177305	2607	-12.88	-87.53
Me_HID_0001	Santa Elena	Lluvia	29/09/2011	843179	1177305	2607	-9.50	-63.10
Me_HID_0002	Santo Domingo	Lluvia	31/10/2011	837785	1188140	1891	-13.44	-96.64
Me_HID_0002	Santo Domingo	Lluvia	31/08/2011	837785	1188140	1891	-12.35	-86.78
Me_HID_0002	Santo Domingo	Lluvia	29/09/2011	837785	1188140	1891	-8.72	-58.67
Me_HID_0003	San Cristóbal	Lluvia	31/10/2011	828013	1186357	1871	-12.91	-91.11
Me_HID_0003	San Cristóbal	Lluvia	29/09/2011	828013	1186357	1871	-9.01	-65.30
Me_HID_0003	San Cristóbal	Lluvia	31/08/2011	828013	1186357	1871	-11.61	-88.30
Me_HID_0004	San Félix	Lluvia	31/10/2011	831834	1192080	2381	-14.32	-93.14
Me_HID_0004	San Félix	Lluvia	29/09/2011	831834	1192080	2381	-10.56	-69.09
Me_HID_0004	San Félix	Lluvia	31/08/2011	831834	1192080	2381	-12.64	-89.76
Me_HID_0005	Universidad de Antioquia	Lluvia	29/09/2011	835030	1185152	1491	-9.31	-64.10
Me_HID_0005	Universidad de Antioquia	Lluvia	31/08/2011	835030	1185152	1491	-10.67	-80.14
Me_HID_0005	Universidad de Antioquia	Lluvia	31/10/2011	835030	1185152	1491	-13.07	-89.10
Ba_A_001	Terpel puerta del Nordeste	Subterránea	24/10/2011	860971	1204087	1280	-9.78	-63.68
Ba_HID_0001	El Cortado	Subterránea	21/08/2011	855917	1201048	1325	-9.88	-66.87
Ba_HID_0004	Versalles la Chorrera	Subterránea	21/08/2011	859473	1202690	1322	-9.02	-70.56
Ba_HID_0004	Versalles la Chorrera	Subterránea	21/08/2011	859473	1202690	1322	-9.33	-68.19
Ba_HID_0006	Estación Ferrocarril	Subterránea	24/10/2011	860500	1204637	1300	-9.63	-75.31
Ba_HID_0007	Corozal	Subterránea	22/08/2011	853621	1201584	1356	-9.65	-72.50
Ba_HID_0007	Corozal	Subterránea	25/10/2011	853621	1201584	1356	-10.01	-65.63
Ba_HID_0008	Machete	Subterránea	22/08/2011	851869	1201372	1421	-10.04	-74.53
Ba_HID_0008	Machete	Subterránea	25/10/2011	851869	1201372	1421	-10.57	-69.14
Ba_HID_0012	Finca Divino Niño	Subterránea	25/10/2011	852805	1199859	1387	-10.13	-77.25

CÓDIGO	NOMBRE	TIPO	FECHA	NORTE	OESTE	COTA	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
Ba_HID_0013	La Fondita	Subterránea	24/08/2011	859729	1208274	2157	-11.20	-80.43
Ba_HID_0014	Guayabo1	Subterránea	24/10/2011	863096	1207599	1612	-10.15	-69.24
Ba_HID_0014	Guayabo1	Subterránea	24/08/2011	863096	1207599	1612	-10.12	-68.25
Be_A_014	San Antonio 1	Subterránea	26/10/2011	836184	1192585	1441	-11.38	-73.37
Be_A_018	Transportes Hato Viejo	Subterránea	31/10/2011	835857	1191534	1441	-10.40	-74.50
Be_A_019	Newtrans	Subterránea	31/10/2011	838374	1192233	1440	-10.11	-77.26
Be_A_022	EDS los Ángeles	Subterránea	31/10/2011	836335	1189692	1444	-10.98	-76.85
Be_A_039	Bellanita	Subterránea	26/10/2011	835570	1193626	1450	-10.52	-78.17
Be_A_048	Parqueadero ph	Subterránea	26/10/2011	836462	1192197	1426	-11.03	-77.91
Be_HID_0001	La China	Subterránea	19/08/2011	830151	1199262	2547	-11.89	-88.61
Be_HID_0003	La China	Subterránea	19/08/2011	831452	1198614	2511	-11.12	-84.83
Be_HID_0004	La China (Vereda Cuartas)	Subterránea	19/08/2011	832593	1197746	2374	-11.42	-82.30
Be_HID_0004	La China (Vereda Cuartas)	Subterránea	26/10/2011	832593	1197746	2374	-11.31	-81.65
Be_HID_0006	Quitazol (Telesillas)	Subterránea	26/10/2011	837947	1194865	1691	-10.03	-77.20
Be_HID_0007	Quitazol (Telesillas)	Subterránea	26/10/2011	838203	1194146	1543	-10.18	-75.75
Be_HID_0007	Quitazol (Telesillas)	Subterránea	20/08/2011	838203	1194146	1543	-10.15	-75.97
Be_M_023	Mobil la autopista	Subterránea	30/10/2011	836944	1189838	1481	-10.14	-77.04
Co_A_008	Parqueadero Julian Autos	Subterránea	25/10/2011	841221	1193958	1405	-11.01	-82.25
Co_A_014	Motel ciudadela Doresky	Subterránea	25/10/2011	839318	1192625	1422	-11.24	-75.80
Co_HID_0001	Los Guarangos	Subterránea	20/08/2011	843442	1191111	1983	-11.48	-75.22
Co_HID_0001	Los Guarangos	Subterránea	25/10/2011	843442	1191111	1983	-11.11	-80.64
Co_HID_0003	Villa Roca	Subterránea	20/08/2011	840520	1197228	2018	-11.47	-80.50
Co_HID_0004	Conasfaltos	Subterránea	26/10/2011	840631	1193157	1619	-11.17	-80.07
Co_HID_0005	Conasfaltos	Subterránea	26/10/2011	840411	1193202	1646	-10.09	-72.06
Gi_HID_0002	Girardota	Subterránea	31/10/2011	848321	1197554	1411	-11.33	-87.54
Gi_HID_0006	El Salado	Subterránea	22/08/2011	849922	1195000	1646	-11.18	-78.30
Gi_HID_0007	Manga del Inder	Subterránea	31/10/2011	848220	1196823	1444	-9.55	-76.96
Gi_HID_0008	Jamundi	Subterránea	31/10/2011	849922	1195000	1646	-10.52	-74.68
Me_HID_0006	Río Medellín	Superficial	29/09/2011	834549	1184699	1456	-10.26	-77.60
Me_HID_0006	Río Medellín	Superficial	31/08/2011	834549	1184699	1456	-10.85	-77.79
Me_HID_0006	Río Medellín	Superficial	31/10/2011	834549	1184699	1456	-11.02	-82.93



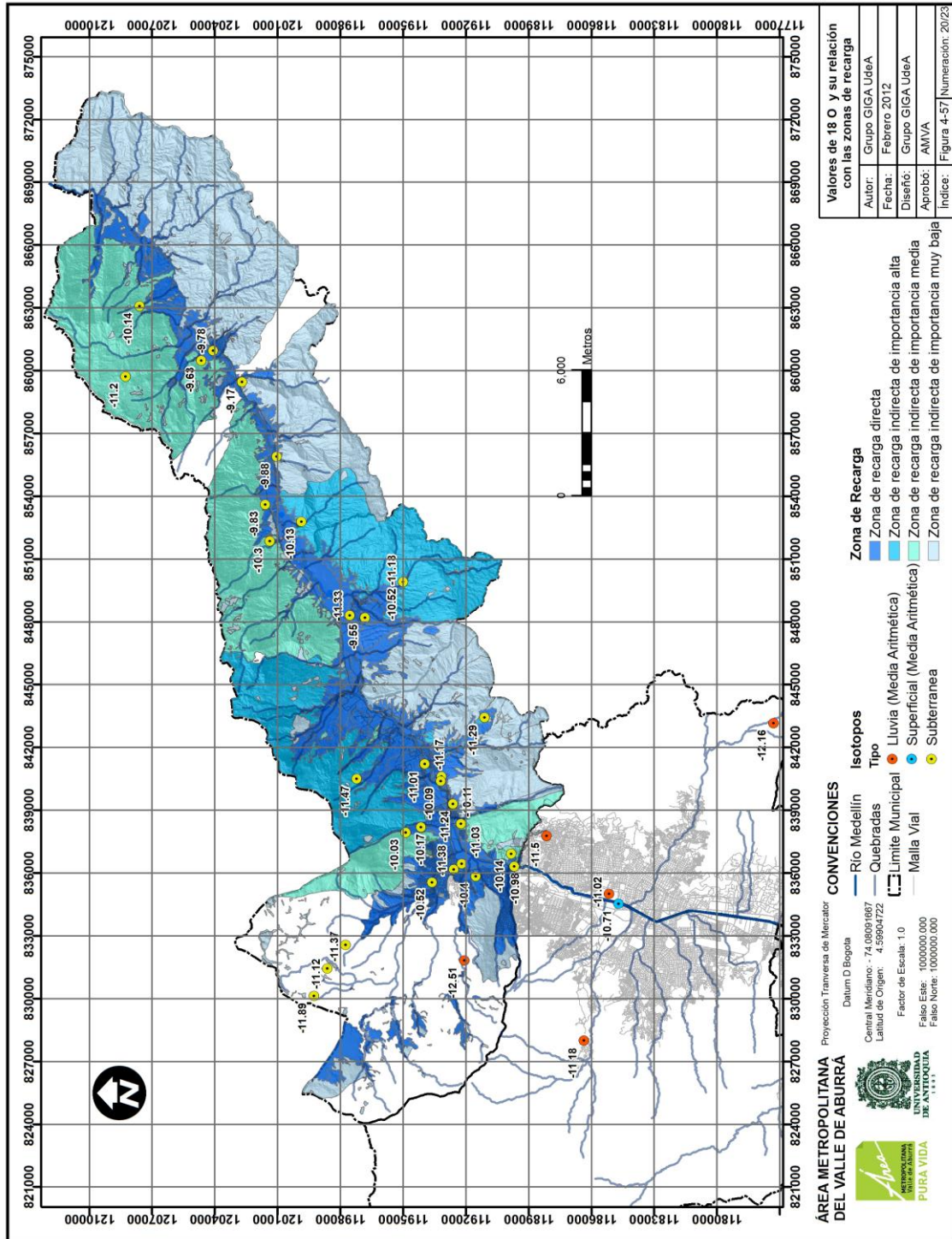


Figura 4.57. Distribución espacial de datos isotópicos obtenidos en este estudio

La variación isotópica en el agua lluvia refleja claramente los efectos estacionales, las muestras más empobrecidas –para las cinco estaciones– corresponden a las provenientes de la lluvias registradas en el mes de octubre, temporada más lluviosa y en la que la temperatura ambiente es menor que el promedio. El efecto altitudinal muestra que efectivamente se presenta un gradiente por fraccionamiento desde Santo Domingo hacia Santa Elena en la margen oriental del Valle de Aburrá, y desde San Cristóbal hasta San Félix en el occidente; la marca isotópica de las lluvias del fondo del valle se desvían de los efectos altitudinales, situación que seguramente es consecuencia de las complejas circulaciones de la atmósfera que ocasionan mezclas de masas de vapor de agua de diferentes orígenes. La relación de los datos de lluvia con la Línea Meteórica Mundial se puede observar en la Figura 4.58. Los datos colectados hasta ahora no permiten interpolar una línea meteórica local.

En la misma (Figura 4.58), se puede observar la relación de las aguas subterráneas y superficiales con la LMG y las lluvias locales, todos los datos de agua subterránea están contenidos en valores intermedios entre los máximos y mínimos registros de desviación de la composición isotópica, así se verifica que las aguas subterráneas del Valle de Aburrá proceden de la recarga que se origina desde los excedentes de precipitación que ocurren a diferentes alturas. Específicamente para el área de Barbosa, donde las aguas subterráneas se ven más enriquecidas isotópicamente en relación con los demás sectores del norte, se puede deducir que la fuente de recarga para los acuíferos se da desde las lluvias locales. Esta situación está en perfecta consonancia con el carácter de zona de recarga indirecta de importancia muy baja definida para el batolito antioqueño.

Las aguas superficiales insinúan mezclas de aguas procedentes de precipitación con aportes de flujo base.

Otro resultado relevante obtenido de los análisis isotópicos tiene que ver con las diferencias marcadas en dos muestras tomadas en la cantera de Conasfaltos, las muestras procedentes de diferentes costados de la cantera y de diferentes alturas, una a 120 metros de la superficie (-10,09, -72,1) y otra a 50 metros (-11,17, -80,1), evidencian dos fuentes de recarga distinta que obedecerían a la ocurrencia simultánea de flujos locales y flujos regionales; es decir, se valida la ocurrencia de recarga directa y recarga indirecta desde la unidad litológica de la anfíbolita de Medellín, definida como zona de recarga indirecta de importancia alta.

Para obtener resultados más contundentes, en términos de la relación lluvia–recarga, se requiere un monitoreo permanente y completar datos suficientes para determinar la línea meteórica local, ella se logra tras –mínimo– una serie de campañas de muestreo mensual durante dos años.

Las muestras tomadas en el municipio de Barbosa se encuentran más enriquecidas que las del resto del Valle (Figura 4.58), lo cual podría obedecer a un gradiente de temperatura. Otra particularidad observada es el comportamiento isotópico de las muestras localizadas en predios de Conasfaltos cuyas marcas isotópicas son diferentes, lo cual también es evidenciado en los análisis hidrogeoquímicos.

Con el fin de establecer mejor la relación entre el agua lluvia y el agua subterránea y analizar la influencia de zonas de recarga distante, es necesario continuar el monitoreo isotópico del agua lluvia al menos por dos años.

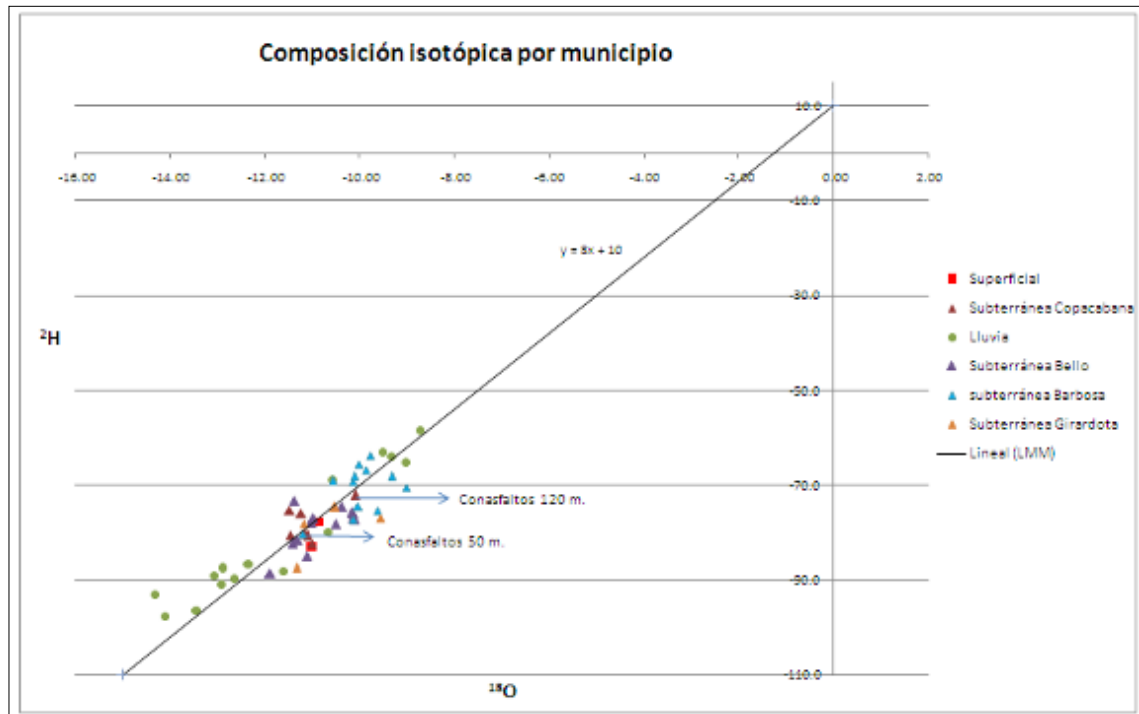


Figura 4.58. Composición isotópica por municipios del norte del Valle de Aburrá.

#### 4.2.6 Aproximación a la estimación de la recarga distribuida

Con el fin de estimar las características potenciales de la recarga asociada a las fuentes dónde esta se da, se efectuó un ejercicio de aproximación a la recarga distribuida mensual mediante la aplicación de una modificación del método de balance de suelo diario, usado para la estimación de recarga en las cuatro estaciones hidrometeorológicas presentes en el acuífero libre (Ver numeral 4.1.3). Las consideraciones y modificaciones del método, así como los resultados obtenidos, se explican a continuación.

##### 4.2.6.1 Métodos y variables de entrada

El método de balance se aplicó al periodo abril de 2009 – marzo de 2010, considerado como un escenario hidrológico seco, según el índice MEI, debido a que es en el periodo seco en el que se pueden evidenciar las condiciones más críticas para el proceso de recarga.

A partir de los datos mensuales de 19 estaciones distribuidas en la zona de estudio (Figura 4.59), se halló la distribución espacial de la precipitación para cada mes con el método de interpolación Spline Tensión, disponible en el módulo Spatial Analyst del software ArcGIS 9.3. A partir de la correlación entre las estaciones se estableció el número de vecinos para la aplicación del método. Se utilizó este método debido a la distribución espacial de las



estaciones y al hecho de que es el que presenta mejor ajuste a los parámetros de entrada y al comportamiento regional de la precipitación en el valle. En la Figura 4.60 se observa la distribución de lluvia anual para el periodo de referencia del balance.



Debido a la ausencia de estaciones climatológicas distribuidas en el Valle de Aburrá, se empleó, en primera instancia, la ecuación de Cenicafé para estimar la evapotranspiración potencial distribuida en función de la altura sobre el nivel del mar. Con estos valores se hizo un primer balance, sin embargo los resultados obtenidos de evapotranspiración potencial fueron considerablemente altos en comparación con la precipitación mensual, de manera que el balance se orientaba a satisfacer la cuota de evapotranspiración y por lo tanto no había recarga en ninguno de los meses. Debido a esto se decidió emplear los datos de evaporación de la estación Tulio Ospina (Tabla 4.28), los mismos empleados en el balance diario, asumiendo que la evapotranspiración potencial es la misma para la zona de estudio. Esta consideración es razonable para el fondo del valle pero añade incertidumbre al balance y es por ello que los resultados aquí obtenidos resultan ser una aproximación a la estimación.

Las condiciones límites de humedad en el suelo fueron obtenidos a partir del Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Antioquia, (IGAC, 2007) y del levantamiento semidetallado de Coberturas Terrestres para el Departamento de Antioquia (IGAC, 2007). Con los datos de los perfiles modales por asociación de suelo de IGAC, 2007, se hizo un análisis estadístico y se obtuvieron las características texturales predominantes en cada asociación. Estos datos se emplearon para obtener los valores de capacidad de campo (cc) y punto de marchitez permanente (pmp) con las ecuaciones empíricas de Saxton y Rawls (2006) (Tabla 4.29); y junto con la condición de drenaje de cada asociación se obtuvo el Grupo Hidrológico de Suelo. Posteriormente se estimó la profundidad de raíces promedio para cada cobertura terrestre (Tabla 4.30) y finalmente se interceptó el mapa de suelos con el mapa de coberturas terrestres para obtener el valor de capacidad de campo, el punto de marchitez en la zona de raíces y el valor de número de curva II según el Grupo Hidrológico de Suelos.

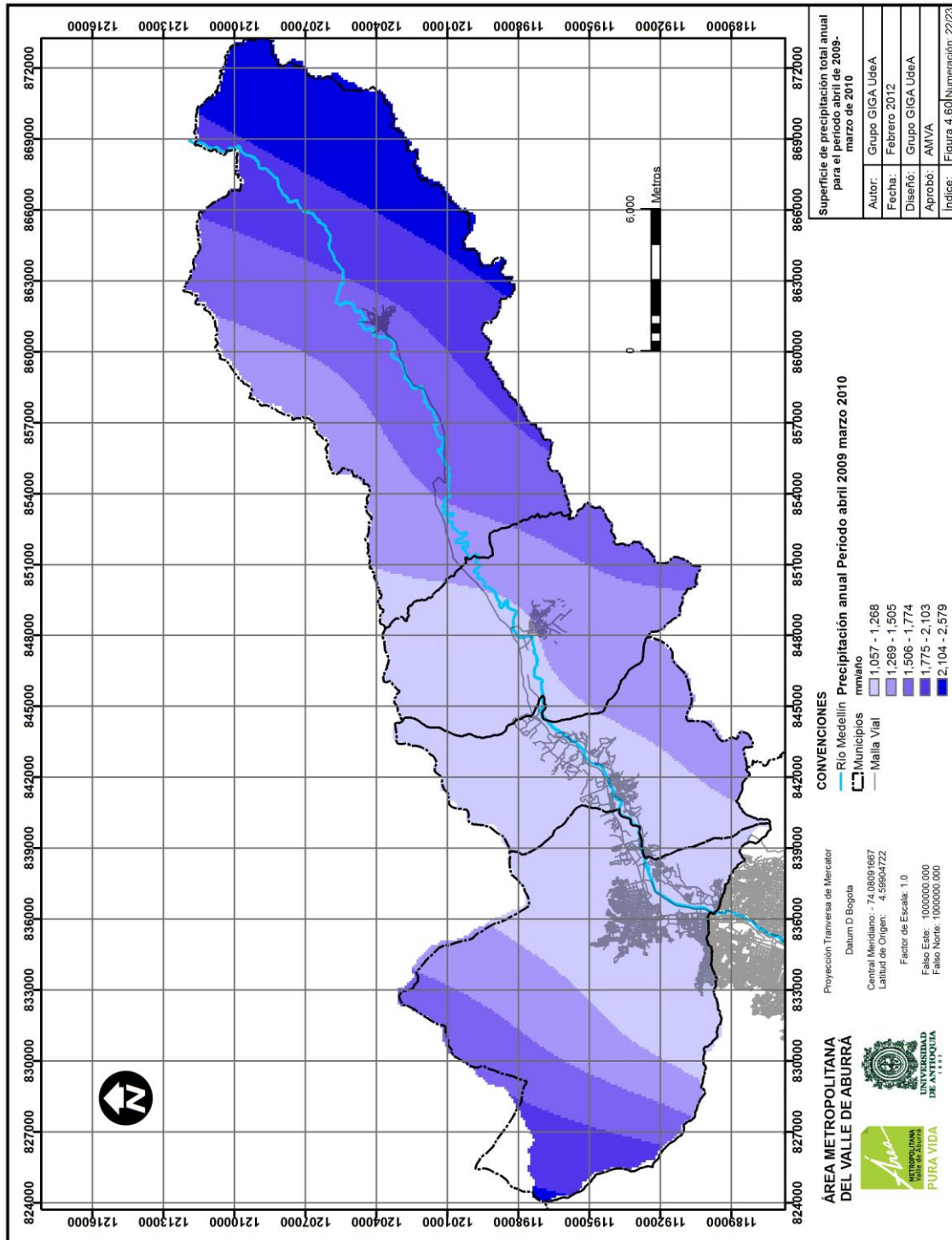


Figura 4.60. Superficie de precipitación total anual para el periodo abril de 2009 - marzo de 2010.

**Tabla 4.28. Valores de evaporación mensual obtenidos a partir de datos diarios en la estación Tulio Ospina.**

MES-AÑO	ETP(MM/MES)
feb-09	93
mar-09	99
abr-09	112
may-09	111
jun-09	101
jul-09	142
ago-09	137
sep-09	153
oct-09	98
nov-09	103
dic-09	114
ene-09	130
feb-10	140
mar-10	139

**Tabla 4.29. Capacidad de campo y Punto de marchitez permanente para las asociaciones de suelo presentes en la zona de estudio.**

SIGLA DE LA ASOCIACIÓN	NOMBRE DE LA ASOCIACIÓN	CC (CM3 AGUA/CM3 SUELO)	PMP (CM3 AGUA/CM3 SUELO)
LP	Complejo La Pulgarina	0.21	0.07
GD	Guadua	0.17	0.07
RN	Rionegro	0.19	0.08
LL	Llano Largo	0.18	0.09
HB	Horizontes	0.24	0.11
TE	Tequendamita	0.22	0.11
YA	Yarumal	0.24	0.12
PO	Poblanco	0.23	0.12
ZL	Zulaibar	0.24	0.13
GS	Complejo Girardota	0.36	0.19
IT	Ituango	0.34	0.21
AG	Andes	0.35	0.22
NQ	Niquía	0.37	0.23
TG	Tuntuna	0.34	0.23
JD	Yalí	0.36	0.26
SA	Sabaneta	0.45	0.32
2308	Zonas urbanas	0	0



**Tabla 4.30. Profundidad de raíces asumida según la cobertura terrestre presente en la zona de estudio.**

COBERTURA TERRESTRE SEGÚN LA CLASIFICACIÓN CORINELANDCOVER	PROFUNDIDAD DE RAÍCES (CM)
Bosque Natural denso	150
Tierras desnudas o degradadas	10
Pastos enmalezados o enrastrados	50
Bosque natural fragmentado	150
Pastos naturales y sabanas herbáceas	50
Café	30
Zonas mineras, de extracción de materiales de construcción	10
Mosaico de cultivos	50
Zonas Urbanizadas, Comerciales o Industriales	25
Arbustos y matorrales	75
Coníferas y latifoliadas	150
Embalses y cuerpos de agua artificiales	0
Mosaico de pastos y cultivos y otras variedades de pastos	50
Zonas Verdes Artificializadas no agrícolas	50
Bosque ripario	150
Pastos limpios	50

#### 4.2.6.2 Resultados obtenidos y discusión

La tendencia de los valores de recarga sigue, en casi todos los meses, la distribución espacial de la lluvia. De esta manera entre diciembre de 2009 y marzo de 2010 se observan los valores más bajos de recarga, mientras que en los meses de mayo a junio se presentan los valores más altos. Entre los meses de Julio y Agosto los valores de recarga disminuyen en las zonas donde el potencial de recarga es mayor y vuelven a aumentar en los meses de octubre y noviembre, este último es un mes de transición que marca el final de la época de lluvias. La recarga disminuye hacia el final del año hidrológico (mes de diciembre), lo que es consecuente con el hecho de que en el periodo abril de 2009 a marzo de 2010 se presentó uno de los eventos del fenómeno del Niño más intensos de los últimos 10 años (Figura 4.61). Es importante anotar que los valores obtenidos de recarga distribuida, obedecen a condiciones ideales de infiltración, dadas principalmente por las características texturales y de uso del suelo, y sin tener en cuenta aspectos estructurales de la geología que fueron caracterizados en este estudio. Los mapas de distribución mensual de recarga obtenidos con el método de balance se encuentran en el Anexo 4.11 y también se incorporaron en la base de datos espacial que contiene los resultados del proyecto.

Respecto a la distribución espacial, los valores más altos de recarga se presentan hacia el nororiente, en el municipio de Barbosa, y hacia el noroccidente, municipio de Bello. Sin embargo, y siendo consecuentes con las zonas de recarga identificadas, esos valores no tienen en cuenta las limitaciones reales de infiltración presentes en las unidades geológicas existentes en dichas zonas, por lo que es posible que gran parte de lo que se reporta como

recarga total directa escurra subsuperficialmente y retorne a la superficie como caudal base o se desplace hacia el acuífero libre presente en el fondo del valle. Esta consideración es apoyada por lo obtenido en la identificación de estructuras geológicas y en lo observado en las superficies piezométricas.

En general, en los meses donde se presentan mayores valores de recarga en las zonas con mayor potencial de recarga, la relación entre la precipitación y la recarga total no supera el 35% (Tabla 4.31). De ello se infiere que los valores de recarga neta para los acuíferos libres son solo una pequeña porción de la lluvia. Los valores de recarga total para el periodo se presentan en la Figura 4.61.

En las zonas con mayor potencial de recarga las magnitudes, obtenidas con el método, son bajas, lo que se debe a que las condiciones de los suelos y sus usos han desmejorado la calidad de los mismos y han favorecido la escorrentía sobre la infiltración. La consideración de que la evapotranspiración en toda la zona de estudio es homogénea, añade incertidumbre al método, de tal manera que, para garantizar mejores resultados en la estimación, deberá contarse con estaciones climatológicas en las partes altas del valle. De forma similar, para la rectificación de los valores de recarga obtenidos, es necesario contar con puntos de observación de nivel piezométrico continuos.

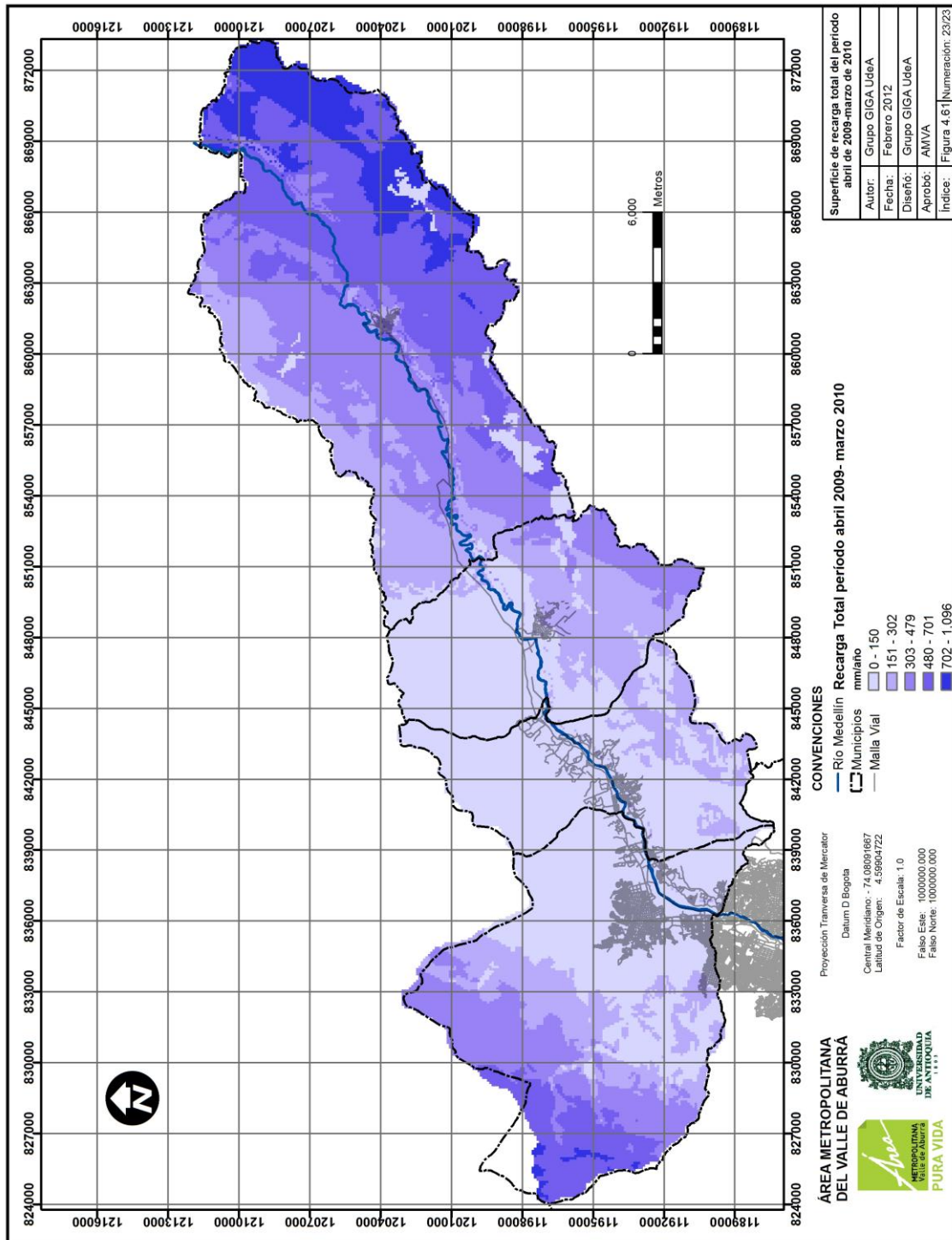


Figura 4.61. Superficie de recarga total del periodo abril de 2009, marzo de 2010.

**Tabla 4.31. Relación entre la recarga total y la precipitación para cada zona de recarga directa e indirecta.**

TIPO DE ZONA	(%) RECARGA/PRECIPITACIÓN DESDE ABRIL DE 2009 - MARZO DE 2010											
	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	
Recarga indirecta de importancia baja	27	28.8	35.1	15	27.7	3.8	28.7	5.8	0	0	0.1	
Recarga directa	11.2	18.8	26.5	3.6	11.9	0.3	15.6	0	0	0	0	
Recarga indirecta de importancia media	15.1	26.9	31.6	5.5	24.2	0.2	12.9	0	0	0	0	
Recarga indirecta de importancia alta	11.9	23.4	29.8	0.7	14.1	0	13.6	0	0	0	0	

## 5 MEDIDAS DE PROTECCIÓN DE ZONAS DE RECARGA DE ACUÍFEROS

La importancia de las aguas subterráneas en el Valle de Aburrá, como recurso reserva para abastecer necesidades futuras de la población o como una alternativa que haga menos dependiente de fuentes externas a la región circundante, hace que las zonas de recarga se conviertan en áreas estratégicas para la sostenibilidad del recurso y que ameriten un manejo especial de las mismas. Por tal razón y ante el inminente proceso de crecimiento urbanístico que se viene -y se continuará- dando en el norte del Valle de Aburrá, el AMVA identificó la necesidad de establecer medidas de protección para las fuentes de agua subterránea dando origen al presente proyecto. Esta necesidad fue identificada en el diagnóstico del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Aburrá-Medellín (POMCA), y en su formulación se propuso el proyecto: Las aguas subterráneas en la cuenca del río Aburrá, que tiene como objetivo: "Conocer la interacción agua superficial, agua subterránea que existe en el valle de Aburrá, principalmente en zonas rurales". Dentro de sus acciones está: "Identificación y preservación de las zonas de especial interés hídrico", que se materializa en identificación de las zonas de recarga de los acuíferos del Valle de Aburrá y en la propuesta de manejo de las mismas.

En consonancia con esto, en el Acuerdo No. 02 del 2007 de Comisión Conjunta de la Cuenca del Río Aburrá (Conformada por Corantioquia, Cornare y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la cual mediante convenio interadministrativo formuló el POMCA), se aprobó los resultados obtenidos en dicho Plan, en su Artículo 7, numeral 7.4, establece que: "...las Autoridades Ambientales y/o la Comisión Conjunta deberán desde los proyectos para desarrollar el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá (POMCA), comprobar con estudios de detalle y trabajo de campo las zonas de recarga de acuíferos...".

Las medidas de manejo aquí propuestas, las cuales buscan la conservación y protección del recurso hídrico subterráneo del norte del Valle de Aburrá, se convierten en insumos de los planes de ordenamiento territorial de los municipios localizados en esta parte del Área Metropolitana, ya que se pueden considerar como determinantes ambientales en los términos del Artículo 10, numeral a, de la Ley 388 de 1997, que dice: "...Determinantes de los Planes de Ordenamiento Territorial. En la elaboración y adopción de sus planes de ordenamiento territorial los municipios y distritos deberán tener en cuenta las siguientes determinantes que constituyen normas de superior jerarquía en sus propios ámbitos de competencia, de acuerdo con la Constitución y las leyes: 1. Las relacionadas con la conservación y protección del medio ambiente, los recursos naturales y la prevención de amenazas y riesgos naturales...".

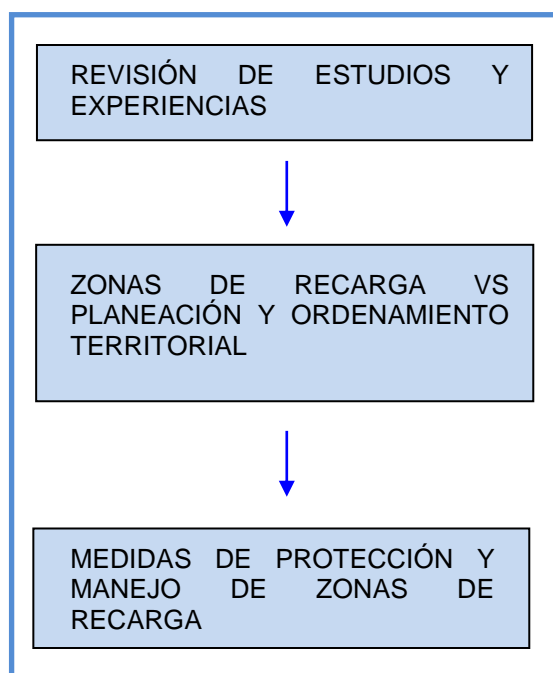
Es de aclarar que aunque el AMVA viene liderando este proceso, las competencias en el tema son compartidas con Corantioquia, ya que la jurisdicción de la primera es la zona urbana del Valle de Aburrá, mientras que la segunda en la zona rural, por lo tanto, una gestión compartida de ambas corporaciones haría más eficiente la misma.

Este capítulo, con el cual se concluye el informe de este proyecto dando cumplimiento al objetivo general de él, está organizado en cuatro secciones. Inicialmente se presenta de forma breve la metodología seguida para la formulación de las medidas de protección de las zonas de recarga; luego en el numeral 5.2 se incluye un contexto normativo en torno a la

planificación y ordenamiento ambiental de las zonas de recarga; después se presentan las medidas de manejo propuestas y finalmente se discute la manera de implementarlas.

## 5.1 METODOLOGÍA

Para la definición de las medidas de protección de las zonas de recarga del norte del Valle de Aburrá se siguió un proceso metodológico (Figura 5.1) que partió de la revisión de estudios y experiencias nacionales e internacionales concernientes al tema, luego se procedió a ubicar y evaluar la distribución y localización de las zonas de recarga definidas en esta investigación de acuerdo al contexto de planificación y ordenación regional, metropolitano y municipal, finalmente se dio una discusión técnica en relación con la aplicabilidad a la zona de estudio de las medidas propuestas en los trabajos revisados y a la identificación de otras nuevas acciones nuevas.



**Figura 5.1. Metodología seguida para la definición de medidas de protección de zonas de recarga.**

- **Revisión de estudios y experiencias**

Como un primer paso en la definición de los lineamientos para la protección de las áreas de recarga del acuífero del Valle de Aburrá, se hizo una revisión de estudios y experiencias adquiridas en el país y otros lugares del mundo con el fin de conocer avances en el tema e identificar su aplicabilidad dentro del contexto sociocultural, económico y ambiental. En países europeos, Estados Unidos y América Latina se han desarrollado estrategias que buscan la protección de las aguas subterráneas debido a que estas son las principales fuentes de abastecimiento de agua de sus comunidades. Estas estrategias, que son de carácter preventivo y remedial, se pueden agrupar en legales, técnicas y administrativas.

Dentro de las estrategias preventivas se encuentran la protección de los perímetros de las captaciones, como se denominan en España y otros países europeos, y de las zonas de recarga de los acuíferos. Las primeras cuentan con desarrollos legislativos y técnicos que han permitido su aplicación. Las segundas –referentes a la protección de las zonas de recarga- apenas si son mencionadas en los estudios consultados de Europa y Norteamérica, aunque en todos los casos se reconoce la importancia de su adecuado manejo en la protección de las aguas subterráneas.

Como se muestra en la Tabla 5.1 y en el Anexo 5.1, donde se hace un resumen de los principales estudios revisados y las medidas allí propuestas, en Centro América, específicamente en Costa Rica, el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) ha realizado algunas tesis de grado donde se proponen medidas generales para el manejo de las zonas de recarga, de las cuales se destacan aquellas orientadas al trabajo integral y coordinado entre las diferentes instituciones presentes en la cuenca, la restauración ecológica y protección de los recursos naturales y la producción sostenible en lo que respecta a la agricultura. Dada la importancia del acuífero de la zona Metropolitana de la Ciudad de México, ya que es la principal fuente de abastecimiento de la ciudad, la Universidad Autónoma Metropolitana realizó el estudio: “Repensar la Cuenca: La Gestión de los Ciclos del Agua en el Valle de México”, en el cual se propone una serie de medidas que hacen énfasis en el aspecto normativo, siendo especialmente importante, la inclusión de las zonas de recarga en los POT municipales.

**Tabla 5.1. Principales estudios consultados y las medidas propuestas en los mismos**

NOMBRE DEL ESTUDIO	AUTOR Y SITIO DONDE SE REALIZÓ	MEDIDAS PROPUESTAS
Ordenación del territorio y protección del agua subterránea: análisis de integración en la sierra de Cañete (Málaga).	Jiménez Madrid, A.; Martínez Navarrete, C. y Carrasco Cantos, F. 2009	Ordenación del territorio. Inclusión de restricciones en los desarrollos urbanos que se localicen en zonas de recarga. Las zonas de recarga moderada y alta como suelo no urbanizable de especial protección. Inclusión en los planes de ordenación urbana.
Aguas subterráneas: gestión del recurso invisible.	UNESCO 2011	Establecimiento de las áreas de protección. Las cuales pueden ser definidas como "parques hidrológicos". Reglamentar usos del suelo. Mantenimiento vegetación natural. Mantener el porcentaje de vegetación natural en las áreas de recarga. Controlar las densidades de población en las áreas rurales dispersas. Limitar crecimiento población. Adquisición de terrenos de las zonas de recarga.
Water Plan de actualización 2009, Volumen 2: Estrategias de Gestión de Recursos.	Department of Water Resources, California. 2009	Zonificación de las áreas de recarga. Control al uso del suelo en las zonas de recarga.
Repensar la cuenca: la gestión de los ciclos del agua en el Valle de México	Universidad Autónoma Metropolitana. México. 2011	Inclusión del concepto de recarga en el marco Manifiestos de impacto ambiental para cambios de uso del suelo en zonas de recarga. No autorizar los cambios de uso en los pozos. Contemplar el efecto nocivo de obras y actividades sobre las zonas de recarga y la afectación en la cantidad y calidad del agua infiltrada. Definición de los usos del suelo en las zonas de recarga: inclusión en los POT municipales. Definición de las zonas de recarga como "No Urbanizables". Protección forestal: valoración del papel fundamental de los bosques en la regulación hidrológica de las

NOMBRE DEL ESTUDIO	AUTOR Y SITIO DONDE SE REALIZÓ	MEDIDAS PROPUESTAS
<p>Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua</p>	<p>Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación Escuela de Posgrado del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Cuenca del río Jucuapa, Matagalpa, Nicaragua 2007</p>	<p>cuencas. Estrategias y acciones para mejorar la infiltración del agua en el suelo y recuperación de fuentes de agua: Reforestación en parte alta de la subcuenca y ribera de ríos. Establecimiento y manejo de obras de conservación de suelo y agua para favorecer la infiltración como acequias, lagunetas, cajuelas, diques, barreras vivas y muertas, manejo de rastrojos, no quemar. Conservar especies nativas. Incentivos para reforestar. Pago por servicios ambientales. No continuar ampliando la frontera agrícola. Protección de fuentes de agua. Establecimiento de sistemas agroforestales y silvopastoriles. Rotación de potreros.</p>
<p>Plan de ordenamiento territorial participativo para la gestión de zonas potenciales de recarga hídrica en la microrregión hidrográfica Balalaica, Turrialba, Costa Rica.</p>	<p>Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 2008</p>	<p>Desarrollo agropecuario sostenible. Desarrollo forestal. Restauración ecológica y protección de los recursos naturales. Gestión y protección de recursos hídricos. Asentamientos humanos y de expansión urbana. Gestión de riesgos. Infraestructura vial Fortalecimiento institucional.</p>
<p>Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí.</p>	<p>Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Subcuenca del río Zaratí en Panamá. 2008</p>	<p>Una nueva ley de agua en donde se especifique las normativas para el manejo y gestión de las zonas de recarga hídrica. Trabajo integral y coordinado entre las diferentes instituciones presentes en la cuenca. Crear un material didáctico educativo con un lenguaje entendible a nivel comunitario sobre identificación y manejo de las zonas potenciales de recarga, que pueda servir de guía para replicar el proceso metodológico. Crear programas de agricultura sostenible con proyectos agroforestales encaminados a mejorar la producción y cuidado de las zonas de recarga hídrica. Realizar campañas de concientización y educación ambiental encaminadas a proteger las zonas de recarga hídrica. Plan de ordenamiento territorial participativo.</p>
<p>Acuerdo 042 de julio de 2010, por medio del cual se adopta la Reglamentación Integral para la Gestión de las Aguas Subterráneas en el departamento del Valle del Cauca.</p>	<p>Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). 2010</p>	<p>En la zona de recarga de acuíferos la CVC limitará la construcción de nuevos aprovechamientos de aguas subterráneas. Se prohíbe la instalación en la zona de recarga de rellenos sanitarios, cementerios, industrias con actividades potencialmente peligrosas para la contaminación de las aguas subterráneas, estaciones de servicios con tanques enterrados, lagunas de tratamiento de aguas residuales y aplicación sobre el suelo de productos que al lixiviarse por su composición físico, química y bacteriológica puedan afectar las características de las aguas subterráneas. Las actividades de protección de las aguas subterráneas estarán articuladas a los planes de ordenamiento de cuencas, planes de ordenamiento territorial, el plan de manejo de las aguas subterráneas y demás planes, programas y proyectos relacionados con el recurso hídrico. El uso del suelo en las zonas de recarga deberá respetar las disposiciones establecidas en los planes</p>



NOMBRE DEL ESTUDIO	AUTOR Y SITIO DONDE SE REALIZÓ	MEDIDAS PROPUESTAS
		<p>de ordenamiento territorial, plan de ordenamiento de la cuenca y demás disposiciones que establezca la CVC.</p> <p>Todas las actividades de recarga artificial de acuíferos deberá ser autorizada por la CVC y requiere de un estudio previo.</p> <p>Prohíbe la aplicación de subproductos de vinazas en las zonas de recarga de acuíferos.</p>

- **Revisión de las zonas de recarga del acuífero del norte del Valle de Aburrá en el contexto de la planificación y el manejo del recurso hídrico subterráneo a nivel metropolitano y municipal.**

Utilizando las potencialidades de análisis espacial de los Sistemas de Información Geográfica, se confrontaron los mapas de recarga de acuíferos con la clasificación del suelo de los planes de ordenamiento territorial de los municipios en cuya jurisdicción se localizan éstas y con el de zonificación ambiental del Plan de Ordenación y Manejo del Río Aburrá (POMCA).

En este ejercicio de superposición y análisis cartográfico se lograron identificar coincidencias y zonas donde para proteger las zonas de recarga de las aguas subterráneas se hace necesario restringir usos del suelo; esta condición aplica a las medidas establecidas en los POT's y el POMCA; en los planes de ordenamiento territorial se deberán considerar nuevas restricciones dentro de las diferentes clases de suelo propuestas; y en el caso del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá-Medellín, en donde el uso actual lo permita, se deberá cambiar la categoría propuesta a la de Protección Ambiental.

- **Discusión técnica de la aplicabilidad de medidas propuestas en otros estudios e identificación de nuevas medidas.**

Soportados en el conocimiento del territorio, en la ubicación de las zonas de recarga en el contexto de la planificación y ordenación ambiental, local y Metropolitano, y considerando un abanico de medidas de protección de posible aplicabilidad, se definió la propuesta de manejo para las zonas de recarga del norte del Valle de Aburrá.

## 5.2 MARCO NORMATIVO AMBIENTAL DE LAS ZONAS DE RECARGA EN EL ÁMBITO NACIONAL Y METROPOLITANO

En el marco de la normatividad ambiental nacional, el tema del recurso hídrico ha sido considerado bajo distintas perspectivas hasta llegar a lo que actualmente se conoce como la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH), enfoque adoptado por la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Dicha gestión, según la CEPAL (1992): "...es el proceso de control que el hombre ejerce sobre el flujo del agua en su cantidad, calidad, lugar y tiempo de ocurrencia durante el ciclo hidrológico...". Esta gestión, que busca compatibilizar la oferta hídrica con la demanda de la misma, considera la oferta de dos formas: como se manifiesta en ciclo hidrológico (agua marina, superficial, subterránea o meteórica) y desde la perspectiva del sistema natural que la contiene, lo cual permite un mejor entendimiento de su dinámica que conlleva a una gestión más acertada del recurso.

La Gestión Integral del recurso hídrico guiada por la Política Nacional para la Gestión Integral del Agua, parte de la concepción de que el agua es un bien natural de uso público

administrado por el Estado a través de las corporaciones autónomas regionales, las de desarrollo sostenible y las autoridades ambientales urbanas. Es por ello que a continuación se hace un breve recuento de las normas que regulan las zonas de recarga en el orden nacional, metropolitano y local.

### **5.2.1 Marco normativo y política nacional**

Por otra parte, en la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2010), en materia de agua, tiene como objetivo orientar la planificación, administración, seguimiento y monitoreo del recurso hídrico a nivel nacional bajo un criterio de gestión integral del mismo. Se parte de la concepción de decir que el agua es un bien natural de uso público administrado por el Estado a través de las Corporaciones Autónomas Regionales, de Desarrollo Sostenible y Autoridades Ambientales Urbanas, reconociendo además el carácter estratégico del agua para todos los sectores sociales, económicos y culturales del país, y en este sentido, integrar a esta gestión el diagnóstico, formulación e implementación de los Planes de Manejo de Acuíferos que incluya aspectos de manejo, y conservación mediante estrategias articuladas con las normas urbanísticas municipales y normas asociadas a la planificación urbana, además de la realización de estudios para el conocimiento del sistema acuífero, su evaluación en cantidad y calidad, los aspectos legales y normativos y las amenazas sobre la calidad y cantidad del agua subterránea.

Las aguas subterráneas son un recurso que apenas se empieza a planificar y proteger en el país y es aún muy poco lo que se conoce del mismo, es así, que el Decreto 1729 de 2002 que reglamenta los planes de ordenación y manejo de cuencas, principal instrumento para la gestión del recurso hídrico, no hace explícito el manejo de los acuíferos y menos de las zonas de recarga, aunque en su Artículo 11, que establece los elementos que debe contener el diagnóstico, define entre ellos, las zonas de recarga de acuíferos como uno de los elementos que deben ser identificados, delimitados y localizados.

Por tal razón, en la propuesta de modificación del Decreto 1729 de 2002, que se encuentra actualmente en curso en el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se establece que para aquellos acuíferos que no hagan parte de un Plan de Ordenación y Manejo de una Cuenca Hidrográfica, la Autoridad Ambiental competente elaborará el Plan de Manejo Ambiental de Acuífero PMAA, cuyo objeto será la planificación y administración del agua subterránea mediante la ejecución de programas y proyectos de conservación, protección y remediación del recurso; además, la Autoridad Ambiental competente, las entidades territoriales y demás entidades del orden nacional, departamental o municipal, asentadas y con responsabilidades en el acuífero deberán en el marco de sus competencias invertir en la ejecución de los proyectos de conservación, protección y remediación del recurso. Con esto se espera avanzar en la gestión del recurso agua subterránea

Antes del Decreto 1729 de 2002, ya existían los Decretos 2811 de 1974, 1541 de 1978, 2857 de 1981 y la Ley 99 de 1993, los cuales aunque no hacen referencia a las zonas de recarga, si definieron un camino en la evolución de la gestión integral del recurso hídrico en la cual se incluye el recurso subterráneo y las zonas de recarga.

El Decreto Ley 2811 de 1974 o Código de los Recursos Renovables, establece las bases para los planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas, las define y las

considera como áreas de manejo especial (título II, capítulo III), lo que hace que se incluya en la gestión del recurso hídrico, el sistema natural que lo contiene. Además, entrega a la administración pública la responsabilidad de la protección, la prevención, manejo, uso, coordinación y aprovechamiento de los recursos naturales asociados a las cuencas hidrográficas con énfasis en el recurso agua.

El Decreto 1541 de 1978, aunque no hace referencia específica a las zonas de recarga, si especifica, como medida para la protección de las aguas subterráneas, las inclusión de obligaciones tendientes a proteger este recurso en las concesiones otorgadas a otras actividades que no tengan como objeto el aprovechamiento de éstas aguas, tales como explotación de minas y canteras, trabajos de avenamiento, alumbramiento de gases o hidrocarburos, establecimientos de cementerios, depósitos de basuras o de materiales contaminantes.

El Decreto 2857 de 1981 reglamenta el 2811 de 1974 en lo que respecta a los planes de ordenamiento de las cuencas hidrográficas (secciones II, III y IV), precisándose los criterios y prioridades para su ordenación, competencias, fases, contenidos y proceso de adopción de los planes de ordenación, así como las responsabilidades en la ejecución y seguimiento al mismo e instrumentos de financiación. Este Decreto es retomado y derogado por el Decreto 1729 de 2002, el cual se actualiza con los nuevos escenarios institucionales y de competencias del Sistema Nacional Ambiental establecido en la Ley 99 de 1993.

La Ley 99 de 1993, aunque no tiene como fin la reglamentación de la gestión del recurso hídrico, considera entre los Principios Generales Ambientales que debe seguir la política ambiental colombiana (Artículo 1, numeral 4): "que las zonas de páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial", quedando establecida la importancia de las zonas de recarga dentro de la gestión ambiental nacional y la obligatoriedad de su inclusión dentro de las políticas ambientales.

Por otra parte, en la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010), cuyo enfoque es el ciclo de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH), que a la vez tiene como base el ciclo hidrológico del agua, introduce las aguas subterráneas como parte del mismo y como un elemento importante de la oferta del recurso en el país, que es necesario proteger y conservar. Es por ello que en cada una de las estrategias propuestas para el logro del objetivo que busca: "Conservar los sistemas naturales y los procesos hidrológicos de los que depende la oferta de agua para el país", el agua subterránea es incluida. El agua subterránea también se hace explícita en la mayoría de las estrategias de los demás objetivos que hacen parte de la Política. Las zonas de recarga no son mencionadas como estrategia de protección pero quedan implícitas en los planes de manejo de los acuíferos, cuya guía viene desarrollando el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

### **5.2.2 La planificación y la ordenación ambiental en lo metropolitano**

Las directrices para la planificación y ordenación ambiental del territorio metropolitano deben ser definidas por Corantioquia y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, esta última según el Artículo 66 de la Ley 99 de 1993 y el Artículo 214 de la Ley 1450 DE 2011 (por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014), ejerce, dentro del perímetro urbano, las mismas funciones asignadas a las Corporaciones Autónomas

Regionales (CAR) en lo referente a la protección y conservación del medio ambiente, y específicamente le corresponde los humedales y acuíferos ubicados en su jurisdicción. Es así como las zonas rurales de los municipios son competencia de Corantioquia y las urbanas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

- **Políticas ambientales regionales**

En el Plan de Gestión Ambiental Regional para la jurisdicción de Corantioquia, instrumento de planificación reglamentado por Decreto 1200 de 2004 y que define la planificación estratégica de largo plazo para la Corporación, incluye en dicho plan como eje articulador de su gestión, el recurso agua. De esta forma, en la Línea Estratégica 3: Gestión Integral de las áreas estratégicas y de los recursos naturales para el desarrollo sostenible de las regiones, se proponen acciones encaminadas a proteger y conservar áreas estratégicas que garanticen el abastecimiento del agua, entre ellas el sistema hidrogeológico del Valle de Aburrá. Lo anterior, viabiliza desde las políticas de Corantioquia un manejo compartido de dichos acuíferos, lo cual, se sustenta desde lo jurídico en el párrafo 3 del Artículo 34 de la Ley 99 de 1993, donde se establece que: "cuando dos o más Corporaciones Autónomas Regionales tengan jurisdicción sobre un ecosistema o sobre una cuenca hidrográfica comunes, constituirán, de conformidad con la reglamentación que expida el Gobierno Nacional, una comisión conjunta encargada de concertar, armonizar y definir políticas para el manejo ambiental correspondiente".

- **Directrices Metropolitanas de Ordenamiento Territorial - DMOT**

Las directrices y lineamientos de ordenamiento territorial adoptados por el Acuerdo Metropolitano No. 15 de 2006 y la zonificación ambiental de la cuenca hidrográfica del río Aburrá propuesta en el POMCA y adoptada mediante el Acuerdo No. 02 de 2007 de la Comisión Conjunta, son dos instrumentos que proporcionan insumos a los municipios para su ordenamiento territorial, ya que se conforman como determinantes en los términos del Artículo 10 de la Ley 388 de 1997. Su inclusión en los planes de ordenamiento territorial debe ser concertada con los municipios. Por otra parte el POMCA, según el Artículo 17 del Decreto 1729 de 2002, es una norma que prima sobre las disposiciones generales dispuestas en otro ordenamiento administrativo, en las reglamentaciones de corrientes, o establecidas en los permisos, concesiones, licencias y demás autorizaciones ambientales otorgadas antes de entrar en vigencia el respectivo plan de ordenación y manejo, en lo que respecta a las normas sobre manejo y aprovechamiento naturales renovables. Lo anterior se reafirma, en el Artículo 3 del Acuerdo 02 de 2007 de la Comisión Conjunta de la cuenca del río Aburrá, que además establece que los cambios que se realicen a la zonificación ambiental del POMCA serán aprobados mediante acta de la Comisión Conjunta (párrafo 4 del Artículo 4).

En el Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006, se propone un modelo de ocupación territorial de la región metropolitana fundamentado en criterios de sostenibilidad ambiental, competitividad regional, solidaridad y equilibrio funcional del territorio (Artículo 9). En este mismo acuerdo se definen los Hechos Metropolitanos, los cuales según el artículo 18 de dicho acuerdo, son: "aquellos hechos que a juicio de la Junta Metropolitana afecten simultáneamente a por lo menos dos de los municipios que integran el Área Metropolitana, como consecuencia del fenómeno de conurbación. Comprende los elementos básicos de la estructura natura y el manejo concertado de los elementos estructurante del ordenamiento territorial metropolitano".

En el Artículo 14, del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006, se enuncian las siguientes líneas estratégicas mediante las cuales se busca mitigar los efectos ambientales desfavorables relacionados con el funcionamiento urbano-rural metropolitano: conservación de la base natural sostenible, construcción de una metrópoli urbana sostenible y construcción de una metrópoli regional sostenible. Más adelante, en el Artículo 15, Conservación de la base natural, se incluye como uno de los criterios a tener en cuenta por las administraciones municipales en la definición de normas relacionadas con la determinación de los usos del suelo, tratamientos urbanísticos, asignación de densidades y aprovechamientos, la racionalización del uso y explotación de los yacimientos de agua subterránea. El Artículo 16, Construcción de una metrópoli urbana sostenible, enuncia una serie de estudios cuyos avances deben tener en cuenta los municipios del Área Metropolitana en la formulación de los ajustes al plan de ordenamiento territorial, entre ellos, está el estudio de Identificación de las zonas de recarga en el Valle de Aburrá. Lo anterior deja la posibilidad de incorporar los resultados obtenidos en el presente estudio, principalmente en lo referente a las medidas de manejo, particularmente, en los municipios de Barbosa y Copacabana, que se encuentran en proceso de revisión y ajuste de sus planes de ordenamiento territorial. En el parágrafo 2 del Artículo 22, se define las zonas de recarga de acuíferos como uno de los criterios para la identificación de suelos de protección, la orientación de usos para estos suelos son: cobertura vegetal protectora, no se permite parcelación y se prohíbe la localización de suelos suburbanos.

El modelo de ordenamiento territorial de DMOT, que es precisado en el Acuerdo Metropolitano No. 13 de 2011, propone para el norte del Valle de Aburrá (AMVA, 2006): i) Consolidar la actual conurbación del centro del Valle de Aburrá (Bello y Copacabana), manteniendo un desarrollo discontinuo en los núcleos no conurbados (Barbosa y Girardota); ii) Reivindicar el río como estructurante natural y principal del Valle de Aburrá, conservando su rumbo en aquellos punto donde no ha sido intervenido (después del encuentro con la quebrada la García); y iii) Promover que las partes más pendientes del Valle, en los costados occidental y oriental, entre a formar parte de Parque Central de Antioquia. En este modelo, el corredor metropolitano de servicios se localiza en la parte central del Valle a lo largo del río Aburrá (corredores de: actividad múltiple en Bello y Copacabana, productivo en Bello y Barbosa, turísticos y empresariales en Barbosa y Girardota y sistema de espacio público en los cuatro municipios), al igual que las centralidades metropolitanas y el sistema de movilidad de carácter metropolitano.

Como se definió en el capítulo 4, las zonas de recarga directa al acuífero Norte del Valle de Aburrá se localizan a lo largo del eje del río Aburrá, esta zona dentro del ordenamiento metropolitano propuesto para el norte del Valle de Aburrá, como se describe en el párrafo anterior, corresponde al corredor metropolitano de servicios a lo largo del sistema del río Aburrá y las centralidades metropolitanas, y a la zona de consolidación de conurbación.

En el POMCA, las zonas de recarga de los recursos hídricos en el Valle de Aburrá están incluidas dentro de los lineamientos de política para el Manejo del Suelo en la Línea de Acción: Manejo integral de los recursos naturales con la idea de proyecto: Las aguas subterráneas en el Valle de Aburrá, que parte de reconocer el poco conocimiento que se tiene sobre la circulación, características físicas y químicas, zonas de recarga, vulnerabilidad a la contaminación y demás factores relacionados con las aguas subterráneas y tiene como objetivo: "Conocer la interacción agua superficial, agua subterránea que existe en el Valle de Aburrá, principalmente en zonas rurales". Las

acciones que se plantean específicamente para las zonas de recarga son: Identificación y caracterización de áreas contaminadas y zonas de recarga e Implementación de mecanismos de remediación en áreas contaminadas con prioridad en las zonas de recarga.

En la zonificación ambiental del POMCA del río Aburrá, las zonas de recarga se incluyen dentro de la categoría de áreas de Protección Ambiental, la cual se define así: "...Las zonas de protección ambiental corresponden a las zonas en las que se debe propender por la protección y resguardo de los recursos naturales y el patrimonio cultural y arqueológico presentes en la cuenca, aunque se puede realizar un aprovechamiento sostenible que garantice un flujo continuo de servicios deseados sin reducir valores ambientales ni su productividad futura. En esta categoría se incluyen zonas de recarga de aguas subterráneas, retiros a nacimientos y corrientes, algunos corredores ribereños, zonas de alta pendiente y zonas con amenaza alta por movimientos en masa...".

En el POMCA se advierte que la identificación de las zonas de recarga se hizo de manera preliminar a partir del mapa de unidades litológicas identificando aquellas que presentan condiciones de porosidad y conductividad propicias para la recarga, y se expresa la necesidad de que estas sean definidas posteriormente. Lo que se hace explícito en el Acuerdo 02 de 2007 de la Comisión, y como se dijo antes, da origen al presente proyecto como un estudio de detalle del POMCA.

Las zonas de protección ambiental se dividen en dos subcategorías: Protección ambiental y recuperación para la protección ambiental.

Las zonas de protección ambiental, tienen como objetivos: i) El manejo sostenible de los recursos naturales y protección del patrimonio cultural y arqueológico, y ii) el aprovechamiento para alcanzar objetivos de flujo continuo de servicios deseados sin reducir valores ambientales ni su productividad futura. Para estas zonas se propone como diferentes usos: i) Principal: forestal protector con especies introducidas (con técnicas no agresivas: entresaca, tala por lotes, etc.) y protección de los recursos naturales, ii) Compatibles: forestal (aprovechamiento de productos no maderables), investigación, ecoturismo y agricultura tradicional, iii) Restringidos: usos urbanos (vivienda con baja densidad), recreación, minero, agrícola (agricultura orgánica), pecuario (producción limpia) y agroforestal, y iv) Prohibidos: agrícola (intensivo) y pecuario (intensivo y extensivo).

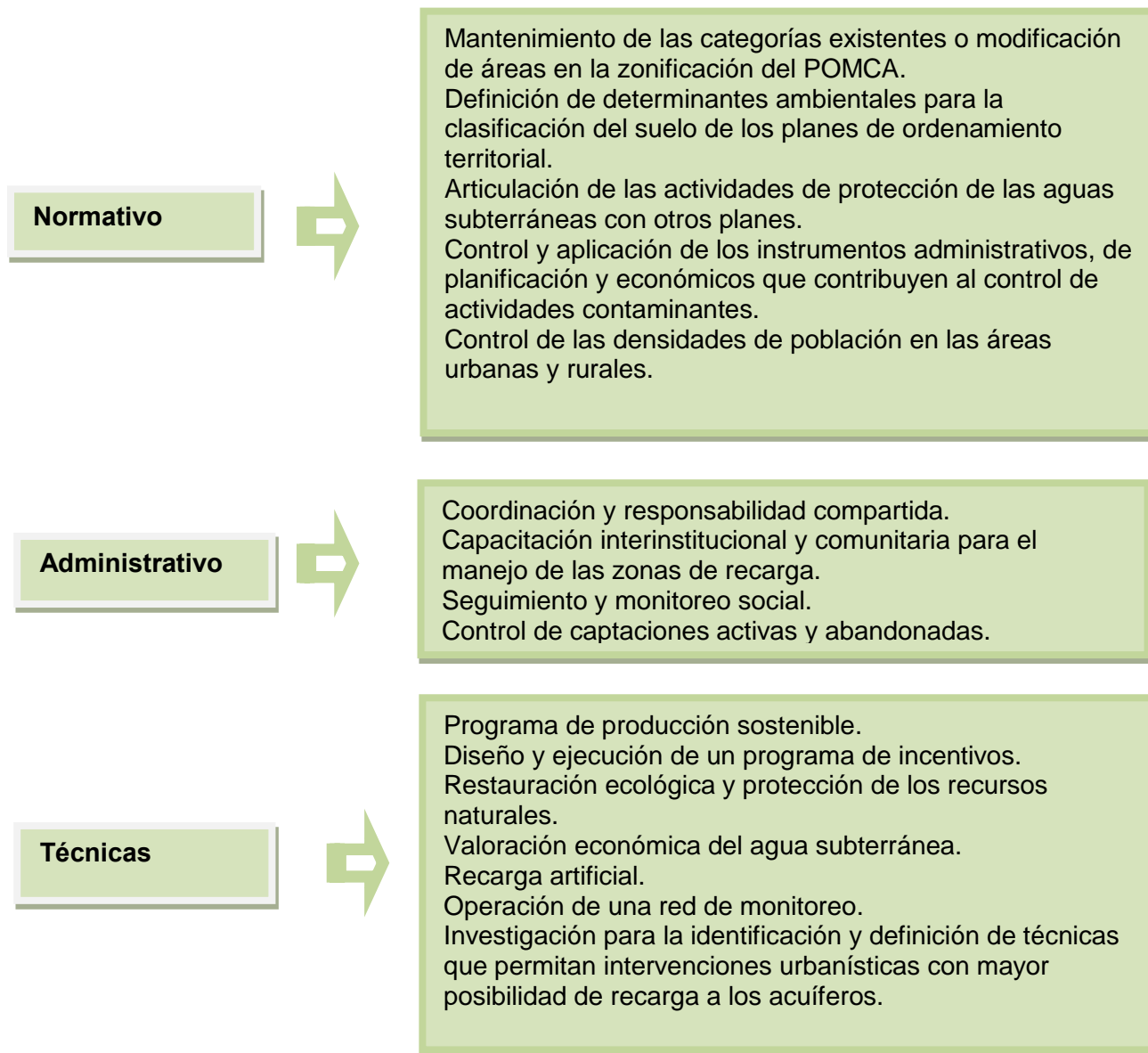
Las zonas de recuperación para la protección ambiental tienen como objetivo la "Recuperación de la cobertura boscosa (introducida)". Para ellas los usos propuestos son: i) Principal: forestal protector con especies introducidas (con técnicas no agresivas: entresaca, tala por lotes, etc.), ii) Compatibles: forestal (aprovechamiento de productos no maderables), agroforestal (con cambio a forestal protector en largo plazo) y ecoturismo, iii) Restringidos: usos urbanos (vivienda con baja densidad), recreación, agrícola y pecuario con baja intensidad y técnicas ambientalmente sostenibles y minero.

En el año 2011, el proyecto "Plan de manejo de los acuíferos del Valle de Aburrá, diseño y puesta en marcha de una red de monitoreo piezométrico y de calidad", realizado mediante el convenio designado RedRio Fase III, se presentaron los lineamientos para la formulación de un Plan de Manejo Ambiental de los Acuíferos del Área Metropolitana, dentro de ellos se estableció en el programa Control y seguimiento a la cantidad y calidad de las aguas subterráneas la ejecución del proyecto 16: Protección zonas de recarga. Así mismo este

proyecto se retomó para su posterior formulación y ejecución dentro del Plan de Ordenación del Recurso Hídrico (PORH), producto también de RedRio Fase III.

### **5.3 MEDIDAS DE MANEJO DE LAS ZONAS DE RECARGA DEL VALLE DE ABURRÁ**

Según la clasificación de las zonas de recarga al norte del Valle de Aburrá expuesta en el capítulo 4 del presente estudio, se han identificado zonas de recarga directa y zonas de recarga indirecta, estas últimas se clasifican según sus características geológicas, hidrológicas e hidráulicas como zonas de importancia alta, media, baja y muy baja; siendo las zonas de recarga directa y las indirectas de importancia alta y media, las de mayor exigencia en cuanto a su manejo ambiental. Teniendo en cuenta lo anterior y el hecho, que gran parte de las zonas de recarga directa y de recarga indirecta de importancia alta se localizan en las áreas donde ya existen desarrollos urbanos, industriales y de servicios, centralidades metropolitanas, estructuras viales del orden nacional, departamental y metropolitano, sistema de espacio público metropolitano, entre otros, y que además el río sigue siendo el eje estructurante del desarrollo del área metropolitana, reconocido y promovido de anteriores y actuales políticas de ordenamiento territorial, se hace la siguiente propuesta de manejo definiendo la aplicación de medidas de tipo normativo, técnicas y administrativas, tal como se resumen en el esquema de la Figura 5.2. Es de resaltar que la ejecución de los programas y proyectos establecidos en el POMCA del río Aburrá, en especial los correspondientes a las Líneas Estratégicas Manejo Integral de los Recursos Naturales y Calidad Ambiental contribuyen al manejo y protección de las zonas de recarga y con ello, de las aguas subterráneas.



**Figura 5.2. Medidas de Manejo propuestas para las zonas de recarga de las aguas subterráneas del norte del Valle de Aburrá.**

### 5.3.1 Medidas de tipo normativo.

Dentro de esta categoría se incluyen: i) Mantenimiento de las categorías existentes o modificación de áreas en la zonificación del POMCA; ii) Definición de determinantes ambientales para la clasificación del suelo de los planes de ordenamiento territorial; iii) Articulación de las actividades de protección de las aguas subterráneas con otros planes; iv)



Control y aplicación de los instrumentos normativos y de control de actividades contaminantes; v) Control de las densidades de población en las áreas urbanas y rurales.

- **Mantenimiento de las categorías existentes o modificación de áreas en la zonificación del POMCA.**

La protección de las zonas de recarga directa e indirecta de importancia alta y media es fundamental y debe ser prioritaria para mantener la oferta del recurso hídrico subterráneo y mejorar su calidad. Para el caso del Valle de Aburrá, la inclusión de éstas áreas como zonas de protección ambiental dentro de la zonificación ambiental del POMCA, en los términos que lo considera el Artículo séptimo del Acuerdo 02 de 2007 de la Comisión Conjunta de la cuenca del río Aburrá, permite desde lo normativo restringir los usos urbanos, recreativos, mineros, agrícolas, pecuario y agroforestal en dichas zonas, y prohibir la agricultura intensiva y el uso pecuario intensivo y extensivo. Lo cual se dificulta en algunas zonas, ya que como se observa en la Tabla 5.2 y las Figura 5.3 y Figura 5.4, gran parte de las zonas de recarga directa e indirecta de importancia alta y media se localizan en áreas que según la zonificación ambiental están dentro de la categoría de consolidación de usos urbanos y producción (principalmente producción forestal y agropecuaria).

Antes de continuar con esta exposición es preciso recordar que el POMCA se trabajó a escala 1:25.000 y que los criterios tenidos en cuenta dentro de él para la determinación de áreas de recarga, y que orientaron la definición de zonas de protección ambiental, comprendieron solo aspectos litológicos, en este sentido la clasificación fue preliminar; mientras que en el presente estudio se efectuó un trabajo de detalle a escala 1:10.000 considerando además de la litología, un nuevo modelo hidrogeológico conceptual, perfiles de meteorización, localización de manantiales, características fisiográficas, patrones estructurales, condiciones de infiltración y análisis hidrogeoquímico e isotópico; esto explica la no precisión en coincidencias espaciales que se puede registrar al efectuar los ejercicios de superposición cartográfica que se necesitan para la formulación de las medidas de manejo.

En la Tabla 5.2 se resumen los resultados obtenidos, en términos de porcentajes de áreas, al superponer los mapas de zonas de recarga (de este estudio) y zonificación ambiental (tomados del POMCA), en las Figura 5.3 a la Figura 5.6 se pueden observar las situaciones que se generan y que se fueron tenidas en cuenta para el establecimiento de las medidas de manejo de zonas de recarga.

En la Figura 5.3 se observa la intersección de la zona de recarga directa de las aguas subterráneas del norte del Valle de Aburrá con la zonificación ambiental del POMCA, aquí se puede apreciar que una parte considerable de las zonas de recarga directa se localizan sobre las zonas de consolidación de usos urbanos (aproximadamente el 35%). Las áreas definidas como de recarga directa que se localizan en zonas de producción, pueden entrar a ser consideradas para que se las incluya dentro de la categoría de protección ambiental dentro del POMCA. El 37,8% del área de recarga directa corresponde dentro del POMCA, a zona de recuperación para la protección ambiental, categoría compatible con el uso al que deben destinarse.

**Tabla 5.2. Intersección de las zonas de recarga directa e indirecta con la zonificación del POMCA.**

CATEGORIAS ZONIFICACIÓN DEL POMCA	PORCENTAJE DE INTERSECCIÓN CON LAS ZONAS DE RECARGA DIRECTA	PORCENTAJE DE INTERSECCIÓN CON LAS ZONAS DE RECARGA INDIRECTA		
		IMPORTANCIA ALTA	IMPORTANCIA MEDIA	IMPORTANCIA MUY BAJA
Conservación ambiental	6,3	19,4	17,2	17,7
Consolidación de usos urbanos	35,2	2,3	5,9	4,7
Producción agropecuaria y forestal	11,9	20,1	39,3	29,0
Producción industrial	5,9		2,2	0,2
Producción minera	0,9	0,1	4,2	0,5
Protección ambiental	0,7	3,9	0,8	1,9
Recuperación para la conservación ambiental	1,1	21,6	30,5	19,9
Recuperación para la protección ambiental	37,8	32,7	0,0	26,2

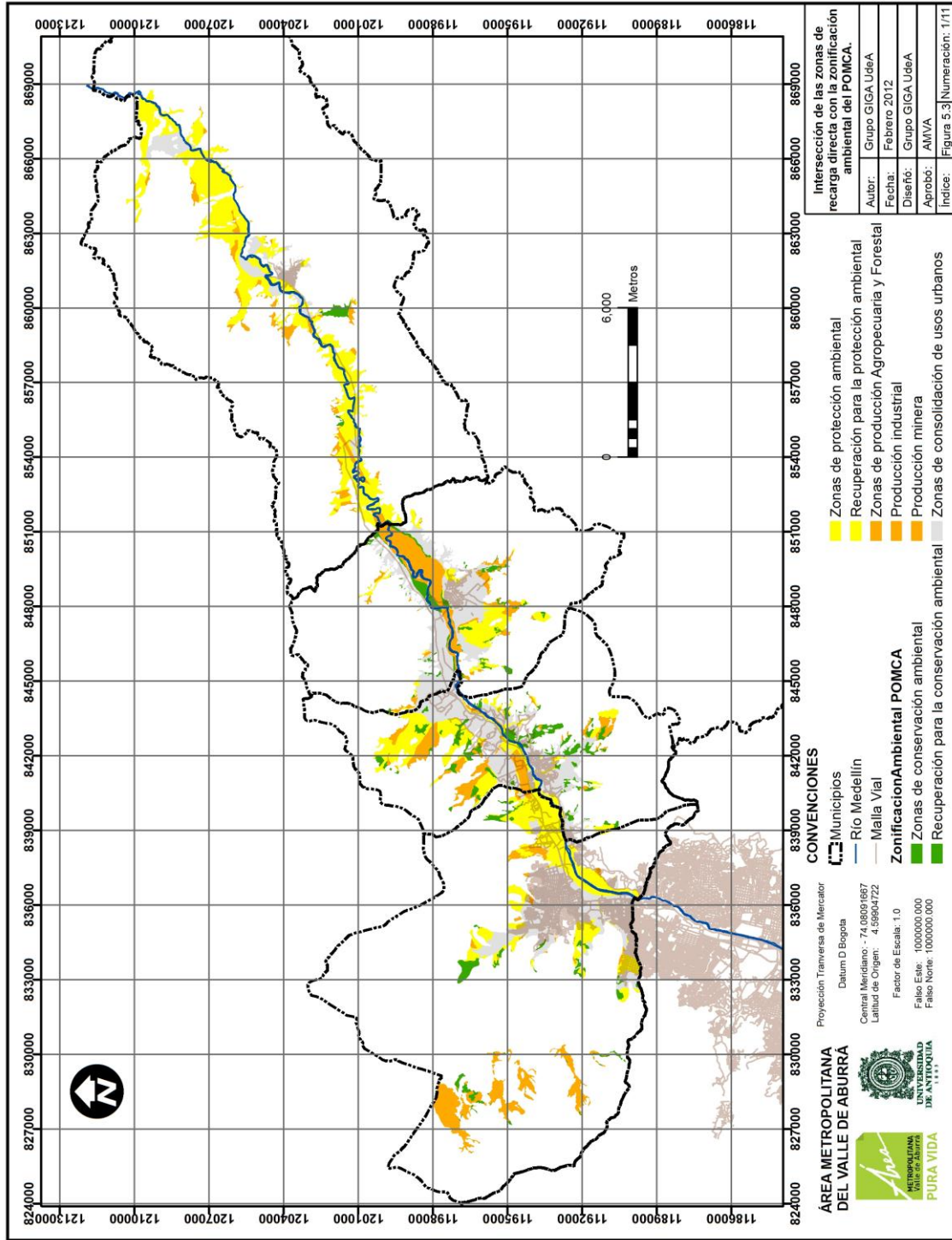


Figura 5.3. Intersección de las zonas de recarga directa con la zonificación ambiental del POMCA.

En la Figura 5.4 se muestra la intersección de las zonas de recarga indirecta de importancia alta con la zonificación ambiental del POMCA, el 54,3% de las áreas consideradas de recarga indirecta de importancia alta se localiza en zonas de recuperación para la conservación y protección ambiental y el 19,4% en áreas conservación ambiental. El porcentaje de superficie restante ocupa áreas definidas como zonas de producción agropecuaria y forestal (20,1%) y de consolidación de usos urbanos (2,3%).

La zona de recarga indirecta de importancia media (Figura 5.5) se localiza en un 39,3% sobre las áreas definidas como de producción agropecuaria y forestal, el 30,5% se ubica en áreas de recuperación para la conservación ambiental y el 2,3% en zonas de consolidación de uso urbano. Las demás zonas de recarga indirecta de importancia media se localizan en áreas con categorías de uso compatibles con la protección del recurso hídrico.

Las zonas de recarga indirecta de importancia muy baja (Figura 5.6), se distribuyen en todas las categorías de manejo propuestas en el POMCA, pero en mayor proporción sobre las áreas de recuperación para la conservación y protección ambiental (46,1%), conservación ambiental (17,7%) y de producción agropecuaria y forestal (29%). En la Figura 5.6 se observa esta situación.

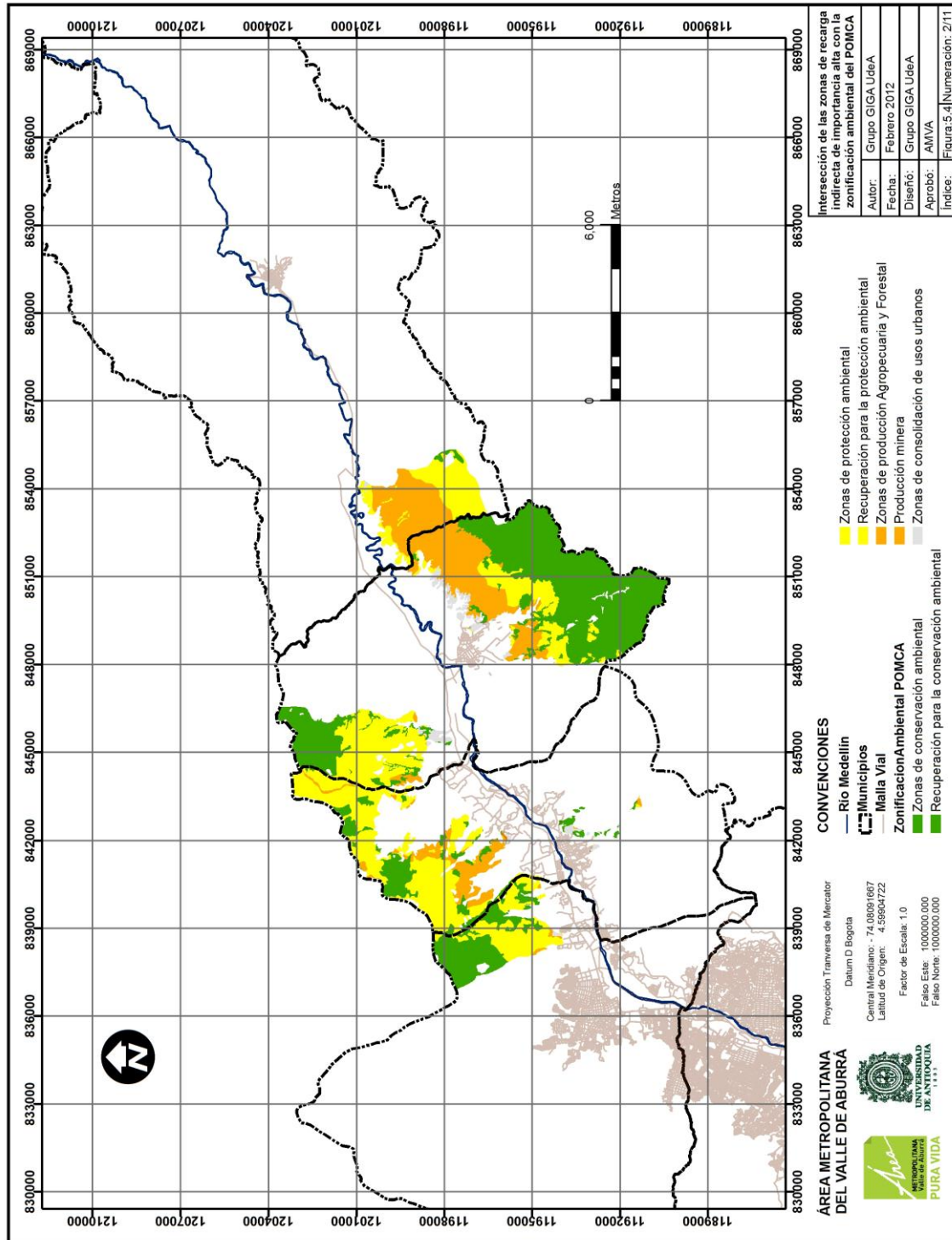


Figura 5.4. Intersección de las zonas de recarga indirecta de importancia alta con la zonificación ambiental del POMCA.

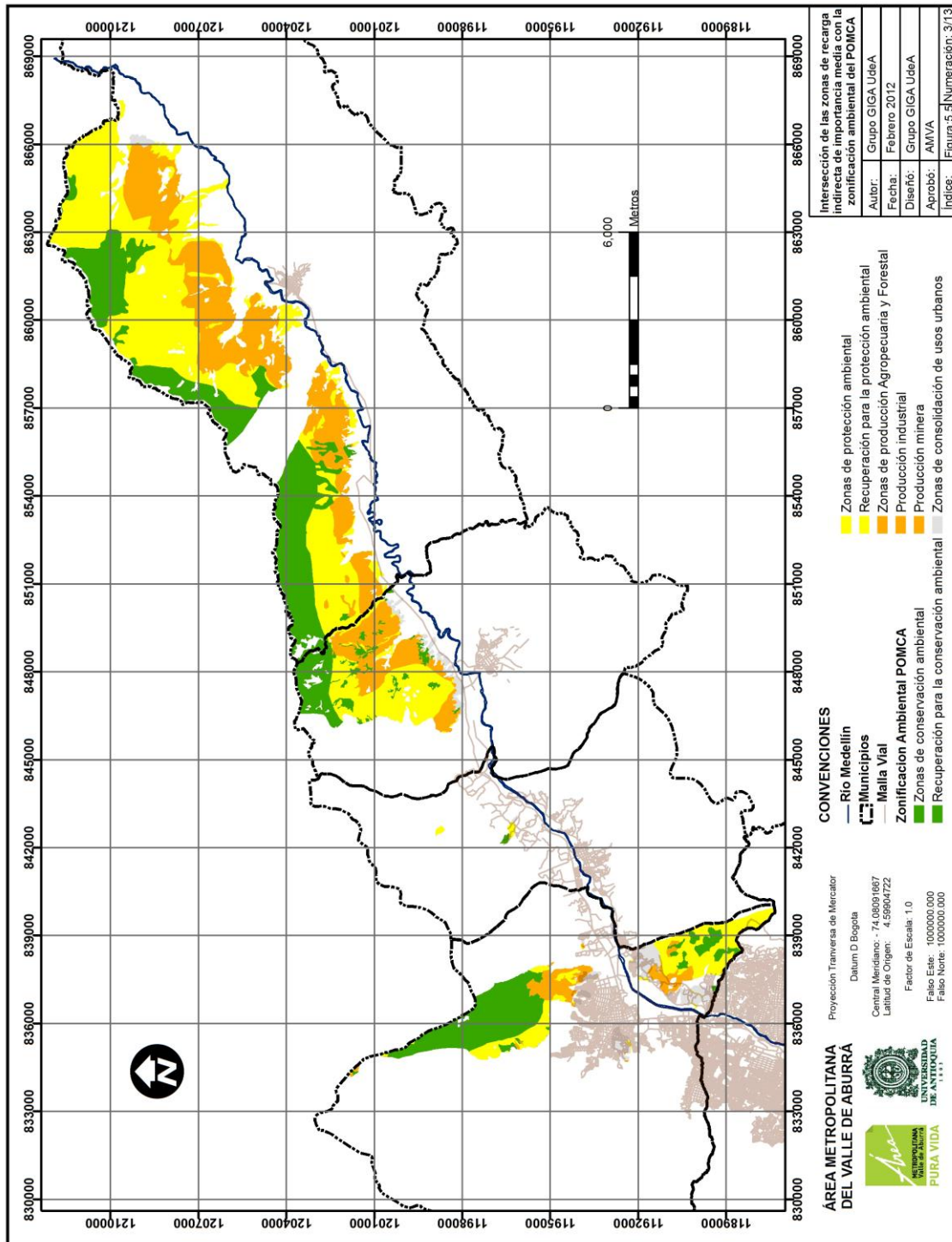


Figura 5.5. Intersección de las zonas de recarga indirecta de importancia media con la zonificación ambiental del POMCA.

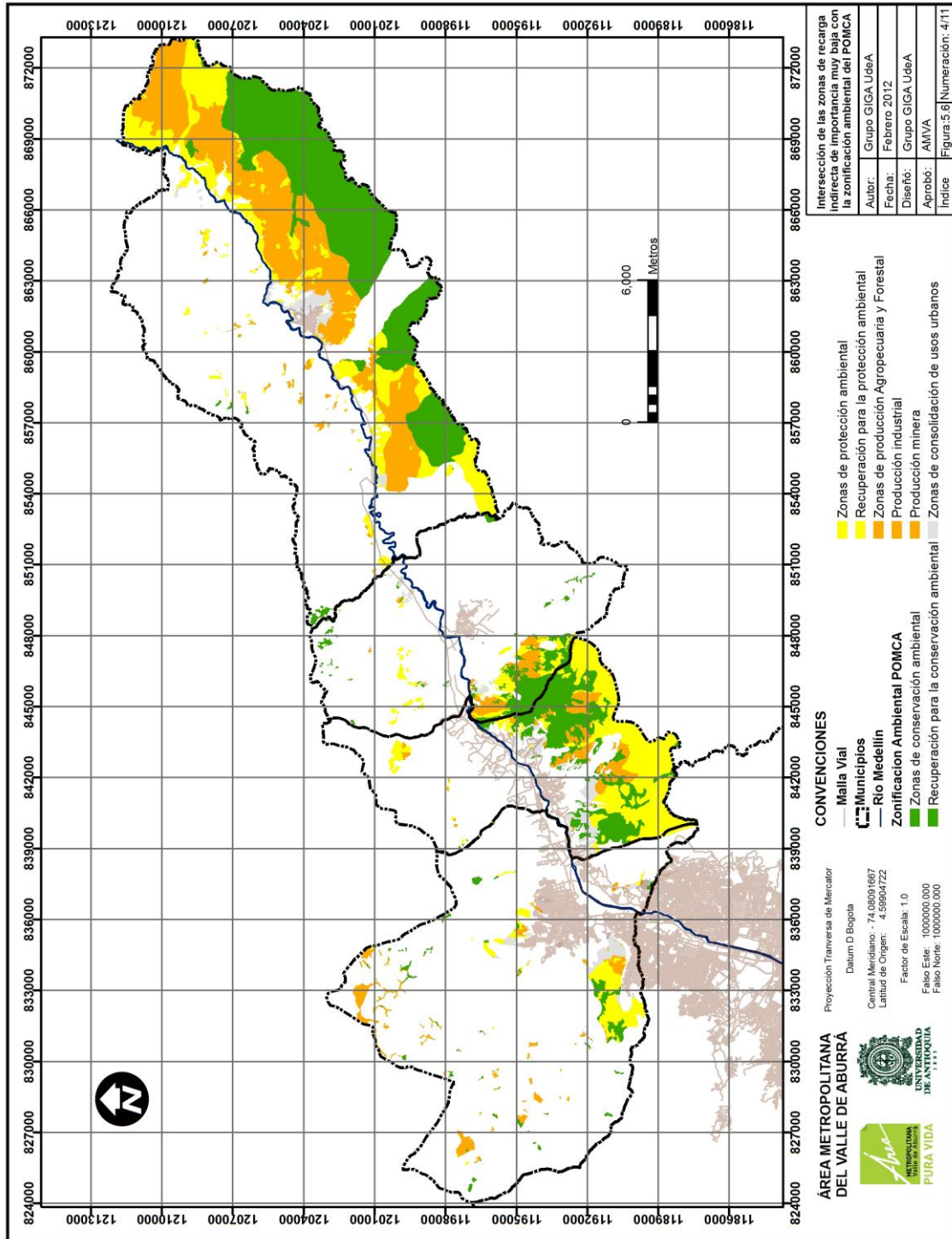


Figura 5.6. Intersección de las zonas de recarga indirecta de importancia muy baja con la zonificación ambiental del POMCA.

Reuniendo los resultados ilustrados y descritos a través de las Figura 5.3 a Figura 5.6 se puede establecer el conjunto de áreas o zonas sobre las cuales es posible intervenir mediante la ampliación de la inclusión de las zonas de protección ambiental dentro de la zonificación del POMCA. En el numeral 5.4 de este informe se presenta sobre la cartografía básica la síntesis de estos resultados; entre tanto se citan el conjunto de medidas actividades, que deberán ser ejecutadas conjuntamente por Corantioquia y AMVA, o por quien delegue la Comisión Conjunta:

- Definición de las zonas que pueden ser incorporadas en la zonificación ambiental del POMCA como zonas de protección, cambiando su categoría propuesta inicialmente en dicha zonificación. Para ello, se debe identificar aquellas áreas que corresponden a zonas de recarga directa e indirecta de importancia alta y media que se localizan en áreas donde el uso actual o tendencial permiten cambios en las mismas, como son las zonas definidas dentro de la zonificación ambiental de POMCA en la categoría de conservación ambiental y producción agropecuaria y forestal.
- Socialización de la nueva propuesta de zonificación ambiental con los actores sociales presentes en la zona (juntas de acción comunal, grupos productivos, entre otras) e institucionales implicados (municipios de Copacabana, Girardota, Barbosa y Bello, Corantioquia y Cornare).
- Definición concertada con los actores sociales e institucionales de los usos principal, compatible, restringido y prohibido, de tal forma que se realice un manejo sostenible de los recursos naturales y se contribuya a la protección del recurso hídrico subterráneo.
- Acuerdo de la Comisión Conjunta del río Aburrá modificando los criterios de la zonificación ambiental del POMCA adoptada en el Acuerdo 02 de 2007.
- Difusión y aplicación de la norma antes mencionada.
- Seguimiento y evaluación por parte de la Comisión Conjunta o de quien ésta delegue.
- Definición de determinantes ambientales para la clasificación del suelo en los planes de ordenamiento territorial.

Una vez adoptado por Acuerdo de la Comisión Conjunta las modificaciones a la zonificación ambiental del POMCA, se entrarán a definir los determinantes ambientales para poder incorporar mediante Resolución Metropolitana las áreas de recarga directa e indirecta, que pueden destinarse a la protección del recurso hídrico subterráneo por su uso actual o proyectado, luego se debe proceder a concertar la inclusión de dichas áreas como zonas de protección dentro de la clasificación de los suelos de los POT Municipales, tal como se define en el Artículo 30 de la Ley 388 de 1997, buscando que las acciones propuestas se materialicen a nivel local. En ambos casos (POMCA y POT), las zonas de recarga se convierten en determinantes ambientales según Artículo 10 de la ley en mención. Para el caso del POMCA además aplica el Decreto 1729 de 2002 y el mismo acuerdo que lo adopta. Es de anotar que para los POT de Barbosa y Copacabana, que aún están ajustes, se está a tiempo de aplicar esta medida, mientras que para Bello y Girardota hay que esperar las próximas revisiones y ajustes o hacer modificaciones excepcionales, si se amerita y en los términos que lo establece la ley.



Otro mecanismo que permite la inclusión de estos determinantes son los planes parciales contemplados en el Decreto Nacional 2181 de 2006, el cual establece que entre las situaciones que estos planes parciales deben ser concertados con la Autoridad Ambiental está: "los planes parciales que precisen la delimitación de suelos de protección... (Artículo 10, numeral 2)", que podría ser el caso de las zonas de recarga.

De la misma forma en que se hizo con el mapa de zonificación ambiental del POMCA, se tomaron los de clasificación de los suelos de los POT's de Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa y se efectuó la superposición con las zonas de recarga. En la Tabla 5.3 se presentan los porcentajes de áreas y su relación entre clases de suelo y tipo de recarga (directa o indirecta). En las Figura 5.7 a la Figura 5.10, se observa que:

- Las zonas de recarga directa (Figura 5.7) comprenden un 36,7% de suelo rural y un 23,8% de suelo urbano, siendo el municipio de Bello el que presenta un mayor porcentaje en suelo urbano (15,9%), mientras que Girardota presenta el menor (1,8%). En el suelo rural se propone analizar la posibilidad de incluir algunas áreas como suelos de protección en los POT, teniendo en cuenta la zonificación ya establecida en el POMCA e incluyendo las zonas de recarga como un nuevo criterio en la definición de las mismas.
- Las zonas de recarga indirecta de importancia alta (Figura 5.8) se localizan principalmente sobre suelo rural (51,2%) y de protección (42,4%). El municipio de Girardota presenta el mayor porcentaje de estas zonas de recarga en suelo rural (32,5%) y Bello el menor (5%).
- Las zonas de recarga indirecta de importancia media se localizan principalmente en suelo rural (54,6%) y de protección (40,5%) como se observa en la Figura 5.9, lo que facilita su manejo. El mayor porcentaje de éstas zonas de recarga en suelo rural y de protección se da en el municipio de Barbosa, mientras que Bello no se presenta.
- Las zonas de recarga indirecta de importancia muy baja (Figura 5.10), al igual que las de importancia media, se presentan en suelo rural (52,5%) y de protección (40,7%), siendo Barbosa el municipio con mayor porcentaje.

**Tabla 5.3. Distribución de las zonas de recarga por municipio y clase de suelo según Artículo 30 de la Ley 388 de 1997.**

CLASE DE SUELO	BELLO		COPACABANA		BARBOSA		GIRARDOTA		TOTAL	
	KM2	%	KM2	%	KM2	%	KM2	%	KM2	%
Zonas de recarga directa										
Urbano	15,7	15,9	4,0	4,1	2,0	2,0	1,8	1,8	23,5	23,8
Suburbano	0,3	0,3	8,2	8,3	2,4	2,4	9,4	9,6	20,3	20,6
Expansión urbana	1,7	1,7	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	0,5	2,3	2,3
Rural	8,5	8,6	7,8	8,0	19,0	19,2	0,9	1,0	36,2	36,7
Protección	9,0	9,2	1,7	1,7	0,3	0,3	5,3	5,4	16,3	16,6
<b>TOTAL ZONAS DE RECARGA DIRECTA</b>									<b>98,7</b>	<b>100,0</b>

CLASE DE SUELO	BELLO		COPACABANA		BARBOSA		GIRARDOTA		TOTAL	
	KM2	%	KM2	%	KM2	%	KM2	%	KM2	%
<b>ZONAS DE RECARGA INDIRECTA DE IMPORTANCIA ALTA</b>										
Urbano	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,6
Suburbano	0,1	0,2	0,4	0,6	0,0	0,0	3,1	4,4	3,6	5,2
Expansión urbana	0,4	0,5	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6
Rural	3,5	5,0	4,5	6,4	5,1	7,3	22,8	32,5	35,9	51,2
Protección	4,9	7,1	9,1	13,0	2,8	4,1	12,8	18,3	29,7	42,4
<b>TOTAL ZONAS DE RECARGA INDIRECTA DE IMPORTANCIA ALTA</b>									<b>70,0</b>	<b>100,0</b>
<b>ZONAS DE RECARGA INDIRECTA DE IMPORTANCIA MEDIA</b>										
Urbano	2,6	10,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6	10,7
Suburbano	1,1	4,7	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	4,9
Expansión urbana	0,3	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,4
Rural	6,9	28,5	0,2	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	7,1	29,5
Protección	12,8	53,4	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	12,9	53,6
<b>TOTAL ZONAS DE RECARGA INDIRECTA DE IMPORTANCIA MEDIA</b>									<b>24,0</b>	<b>100,0</b>
<b>ZONAS DE RECARGA INDIRECTA DE IMPORTANCIA MUY BAJA</b>										
Urbano	1,1	0,7	0,3	0,2	1,7	1,1	0,0	0,0	3,1	2,0
Suburbano	1,0	0,7	3,0	1,9	0,6	0,4	2,5	1,6	7,1	4,6
Expansión urbana	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,3
Rural	8,1	5,3	9,3	6,0	60,8	39,5	2,5	1,6	80,7	52,5
Protección	6,9	4,5	19,4	12,6	31,6	20,5	4,7	3,0	62,6	40,7
<b>TOTAL ZONAS DE RECARGA INDIRECTA DE IMPORTANCIA MUY BAJA</b>									<b>153,8</b>	<b>100,0</b>

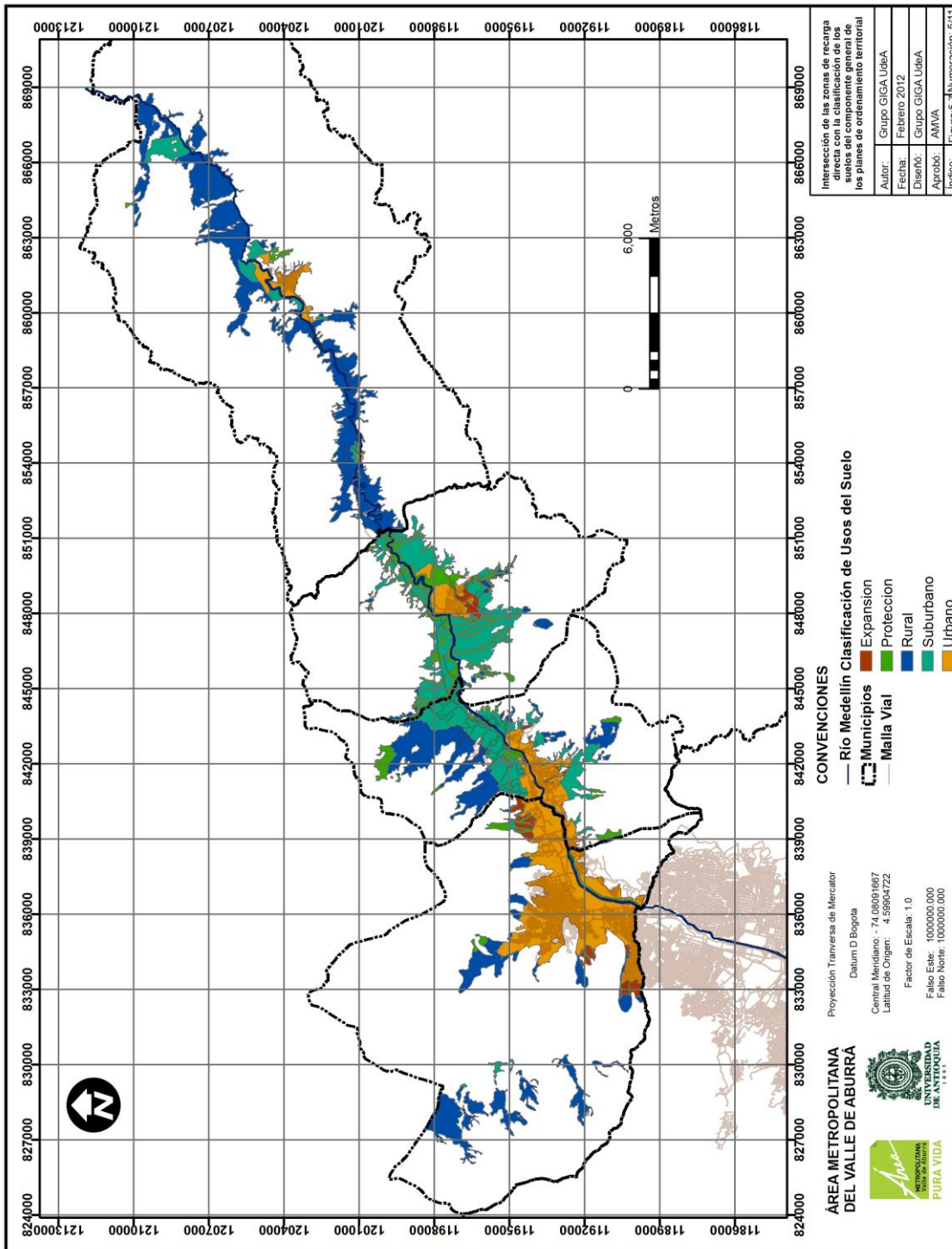
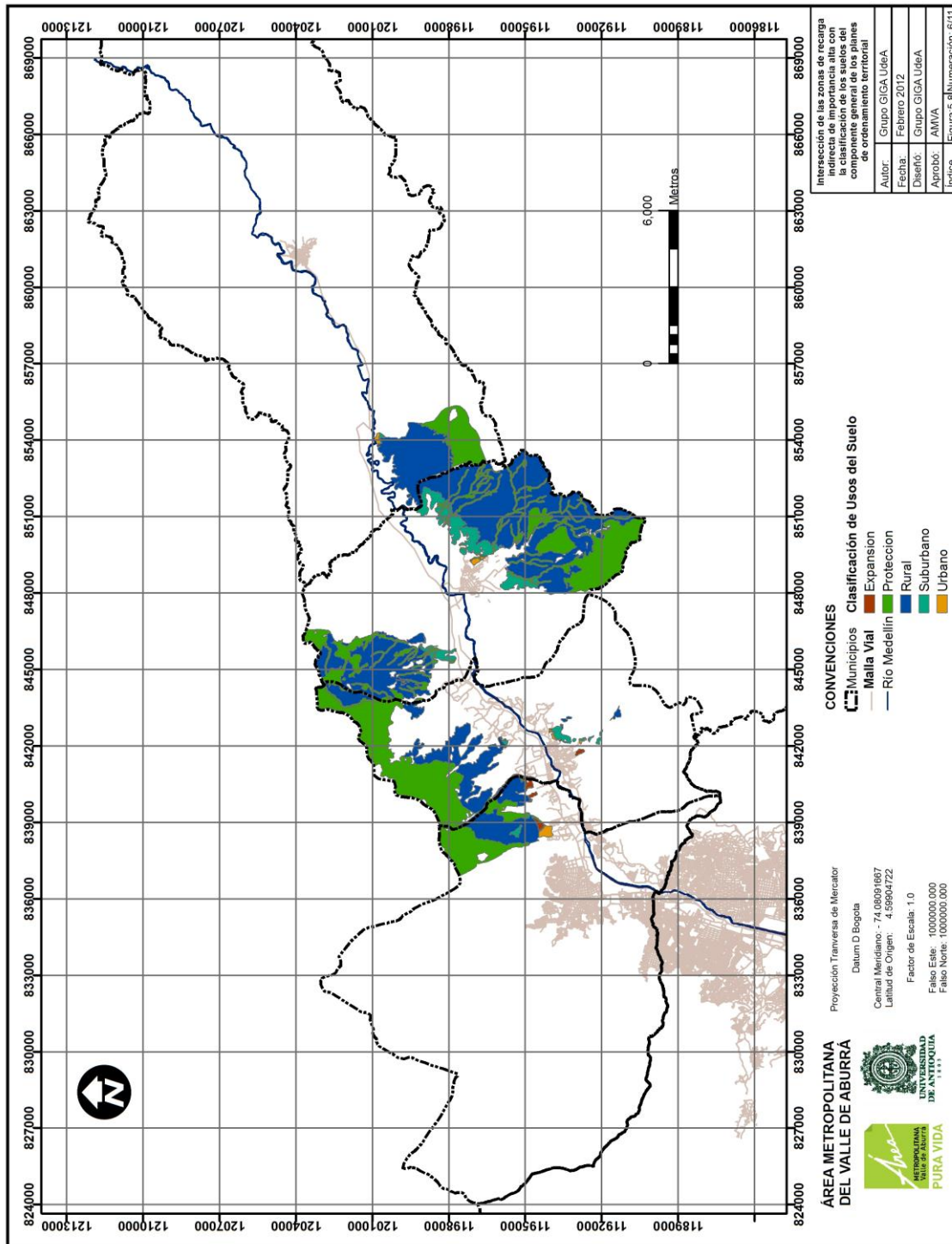


Figura 5.7. Intersección de las zonas de recarga directa con la clasificación del suelo del componente general de los planes de ordenamiento territorial.



**Figura 5.8. Intersección de las zonas de recarga indirecta de importancia alta con la clasificación del suelo del componente general de los planes de ordenamiento territorial.**

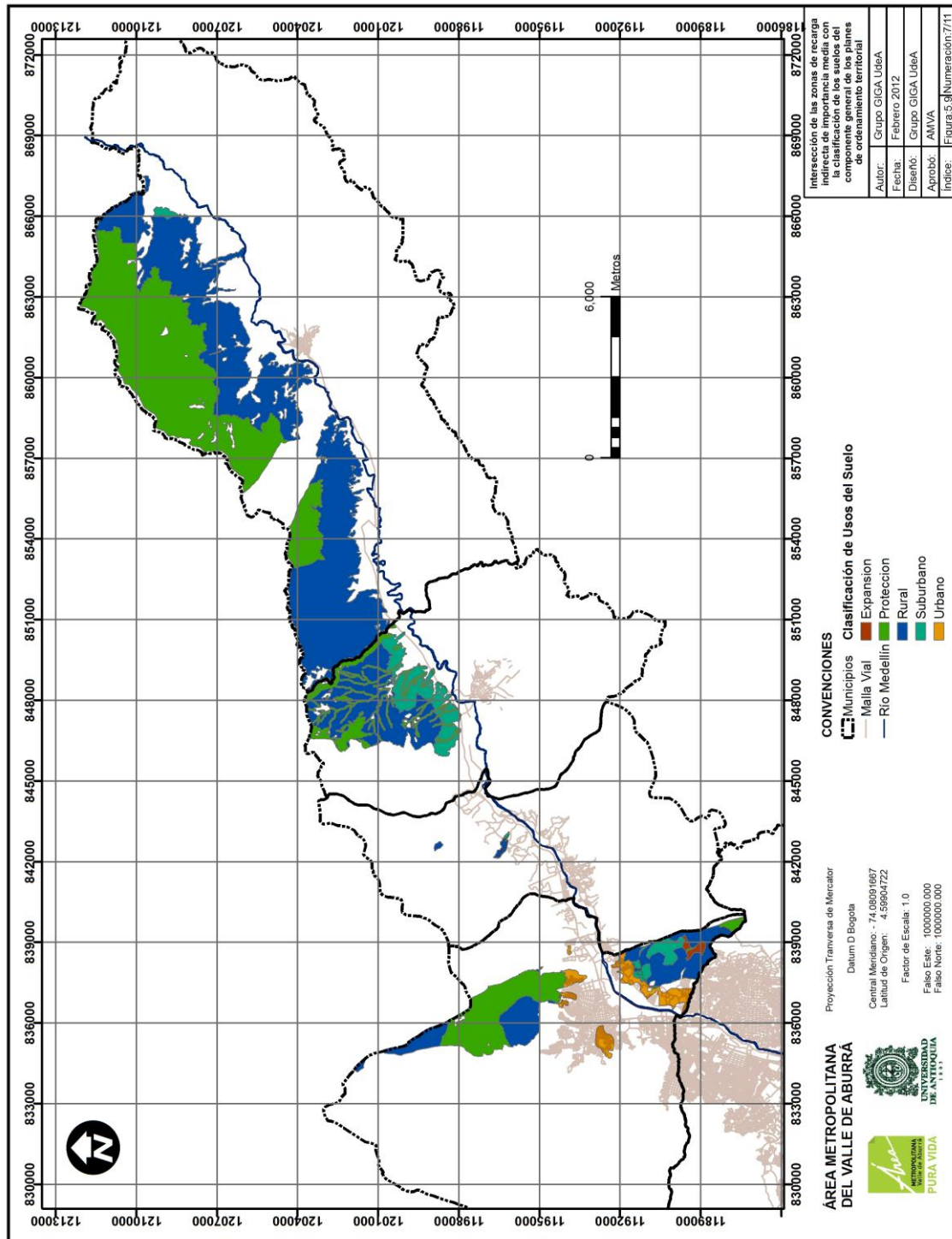


Figura 5.9. Intersección de las zonas de recarga indirecta de importancia media con la clasificación del suelo del componente general de los planes de ordenamiento territorial.

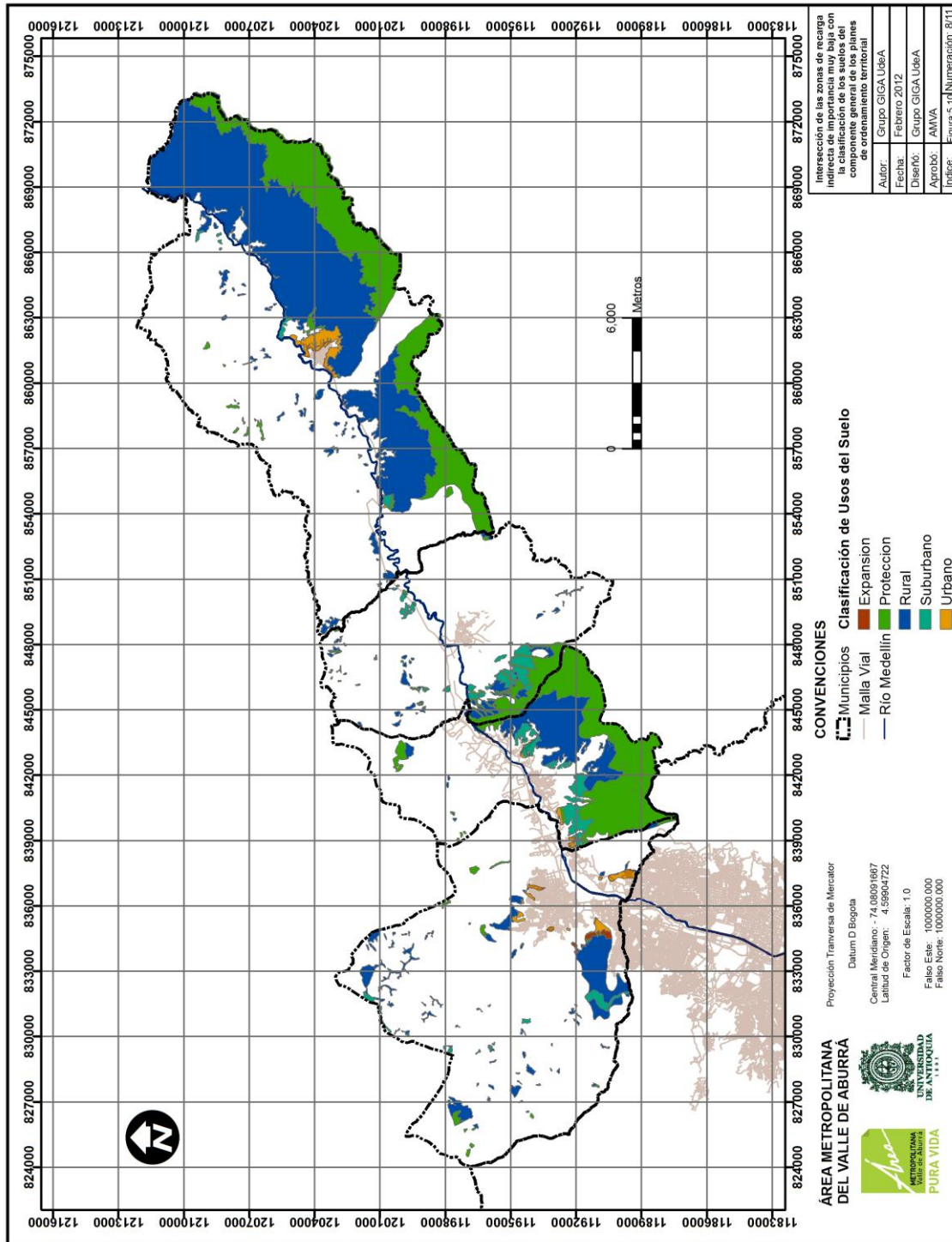


Figura 5.10. Intersección de las zonas de recarga indirecta de importancia muy baja con la clasificación del suelo del componente general de los planes de ordenamiento territorial.

## **Articulación de las medidas de protección de las aguas subterráneas con otros planes.**

Las medidas de protección de las aguas subterráneas propuestas para las zonas de recarga deben articularse con los demás planes relacionados con los usos del suelo, gestión de los recursos naturales y más específicamente, el recurso hídrico, ya que parte de los proyectos o intervenciones propuestos en estos planes contribuyen a la protección de las zonas de recarga. La articulación se debe realizar mediante una planificación y gestión conjunta entre las entidades que le compete el tema. Entre estos están, aparte de los ya mencionados, planes de ordenamiento territorial de los municipios y planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas, los planes de ordenamiento del recurso hídrico, Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos, Planes de Manejo de Áreas Protegidas o Ecosistemas Estratégicos, Planes Maestros de Acueducto y Alcantarillado.

- **Control y aplicación de los instrumentos administrativos, de planificación y económicos que contribuyen al control de actividades contaminantes.**

Es de anotar que el control y aplicación de los diferentes instrumentos para la gestión ambiental establecidos en la legislación actual es de aplicación en toda la jurisdicción de las Autoridades Ambientales, cobra importancia en las zonas de recarga directa e indirecta ya que son medidas que contribuyen a mejorar la calidad de las aguas subterráneas y con ello a mejorar sus disponibilidad para diferentes usos. Estos instrumentos son:

### **Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV).**

El PSMV es un Instrumento de Planeación creado por el documento CONPES 3177 de 2002, el Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales y el Decreto 3100 de 2003, y reglamentado por la Resolución 1433 de 2004 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. En el Decreto 3100 de 2003 se establece que los usuarios prestadores del servicio público de alcantarillado que están sujetos al pago de la tasa retributiva, deberán presentar ante la Autoridad Ambiental competente su Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos a partir del establecimiento de los Objetivos de Calidad de la Cuenca correspondiente. Para el norte del Valle de Aburrá le corresponde a Corantioquia en la zona rural y al AMVA en la zona urbana.

### **Tasas retributivas por vertimientos y tasas por uso del recurso hídrico.**

Se conciben como un instrumento de regulación y financiero. De regulación porque se considera que por el costo económico que implica para los usuarios el pago de las tasas, estos racionalizan su consumo, lo que implica menos contaminación de los suelos y las aguas que a la vez repercute en la calidad de las aguas subterráneas, y como instrumento financiero porque significa ingresos para las Corporaciones, los cuales deben ser utilizados en la protección del recurso hídrico. Las tasas retributivas y por uso, en el caso del norte del Valle de Aburrá, son competencia de Corantioquia.

Las tasas retributivas tienen por objeto cobrar por las consecuencias nocivas de la introducción u arrojado de desechos o de desperdicios agrícolas, mineros o industriales, aguas negras o servidas de cualquier origen, humos, vapores y sustancias nocivas que sean resultado de actividades antrópicas o propiciadas por el hombre o, actividades económicas

o de servicio, sean o no lucrativas. Se establece en el Artículo 42 de la Ley 99 de 1997 y se reglamentan por los Decretos 901 de 1997 y 3100 de 2003, éste último modificado por el 3440 de 2004, y las Resoluciones 1433 de 2004 y 2145 de 2005 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

La ley 99 de 1993, en su Artículo 43, establece que por la utilización del agua que haga cualquier persona natural o jurídica, pública o privada, sin importar, si la actividad para la que se usa, sea o no lucrativa, se debe pagar una Tasa por su uso. Este Artículo es reglamentado en los Decretos 155 de 2004 y 4742 de 2005 y la Resolución 240 de 2004 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. La reglamentación de la Tasa abarca la utilización de aguas superficiales y subterráneas excluyendo el cobro de las aguas marinas.

### **Planes de Gestión Integral de los Residuos Sólidos (PGIRS) y Planes de Manejo de los Residuos Sólidos (PMIR).**

Los PGIRS son instrumentos para la gestión de los Residuos Sólidos reglamentados por el Decreto 1713 de 2002 y Resolución 1045 de 2003 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Corresponde a las Corporaciones Autónomas Regionales, de Desarrollo Sostenible y a los Grandes Centros Urbanos, el control y vigilancia de dichos planes y, a los municipios su formulación y ejecución. En este caso Corantioquia y el AMVA. En la Resolución 0526 de 2004 del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en la cual, en cumplimiento de las competencias asignadas en dicho Decreto, reglamenta los Planes de Manejo de los Residuos Sólidos (PMIR).

### **Permisos de Vertimientos y Planes de Cumplimiento.**

Este es un instrumento importante en el control de los vertimientos puntuales y difusos. Está reglamentado por el Decreto 1594 de 1984 y modificado por el Decreto 3930 de 2010. En este último se definen los requisitos y procedimientos para: obtener estos permisos, la evaluación ambiental, el plan de gestión del riesgo para el manejo de vertimientos y los planes de cumplimiento. Los permisos son otorgados por Corantioquia y el AMVA, según corresponda al área rural o urbana. Más adelante el Decreto 3930 de 2010 fue modificado parcialmente por el Decreto 4728 de 2010.

### **Planes de manejo ambiental en las estaciones de servicio de gasolina.**

El manejo ambiental para las estaciones de servicio está enmarcado actualmente por los términos de referencia genéricos HTER-600 del MAVDT y las Resoluciones 0358 de Abril 29 de 1998 y 622 del 9 de Julio de 1998. El Plan de Manejo Ambiental incluye las acciones de manejo ambiental durante la construcción, operación y abandono de la estación, las cuales son de estricto cumplimiento por parte del usuario y aprobadas por Corantioquia si se localiza en zona rural o el AMVA si es zona urbana.

### **Licencias ambientales.**

Su obligatoriedad se establece en el Artículo 49 de Ley 99 de y se reglamenta en el Decreto 1220 de 2005, derogado por El Decreto 2820 de 2010. La competencia puede ser del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Corantioquia en la zona rural y el AMVA en la urbana, y municipios, según se establece en las normas mencionadas.



### **Plan de Manejo Ambiental Minero.**

La explotación minera está sujeta a la obtención por parte del interesado de la licencia ambiental, la cual debe contener un plan de manejo ambiental que maneje los impactos generados por la actividad. La licencia minera es competencia del Ministerio de Minas y Energía, y es regulado por Ley 685 de 2001 Código de Minas. La licencia es otorgada por el MAVDT o Corantioquia, dependiendo de la magnitud de la exploración.

### **Plan de Manejo Ambiental de Cementerios (PMAC).**

La Resolución 1447 de 2009 del Ministerio de la Protección Social, reglamenta la prestación de los servicios de cementerios, inhumación, exhumación y cremación de cadáveres, donde se incluye el manejo de los residuos sólidos y líquidos.

### **Planes de contingencia para el Manejo de Derrames de Hidrocarburos o Sustancias Nocivas.**

El Decreto 3930 de 2010, en su Artículo 35, establece la obligatoriedad de realizar estos planes por parte de los usuarios que exploren, exploten, manufacturen, refinen, transformen, procesen, transporten o almacenen hidrocarburos o sustancias nocivas para la salud y para los recursos hidrobiológicos. Estos planes deberán contar con la aprobación de la Autoridad Ambiental competente, en este caso Corantioquia y el AMVA.

### **Control de las densidades de población en las áreas urbanas y rurales.**

Establecer las densidades poblacionales en las áreas que se localicen dentro de las zonas de recarga directa e indirecta de importancia alta y media es una estrategia que permite controlar las densidades poblacionales. El Decreto 3600 de 2007 define los criterios para el ordenamiento del suelo rural y rural suburbano. Para este último, en los planes de ordenamiento territorial se deben definir las densidades e índices máximos de ocupación y construcción y demás contenidos urbanísticos y ambientales que permitan su desarrollo, respetando la vocación del suelo rural. Por otro lado, el Decreto 097 de 2006 expedido por el Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, establece la obligación de los municipios de definir con precisión y claridad en sus planes de ordenamiento territorial, las áreas del suelo rural que se destinaran a parcelaciones campestres cuyas densidades deberán ser definidas por las autoridades ambientales de su jurisdicción. En el resto del suelo rural las densidades se definirán de acuerdo a la Unidad Agrícola Familiar (UAF) establecida en la Ley 160 de 1994. Atendiendo lo anterior, Corantioquia expidió la Resolución 9328 de marzo de 2007 donde se definen las densidades máximas para el suelo rural, suburbano y de protección de los municipios que se encuentran en su jurisdicción.

Por otro lado, Área Metropolitana del Valle de Aburrá establece en el Artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006 que adopta las DMOT, establece las densidades habitacionales a aplicar en el área urbana del Área Metropolitana. Éstas se definen por franjas así: una franja de mayor densidad, alta (mayor 300 viviendas por hectárea bruta) que está asociada a la línea A del Metro y al sistema metropolitano de centralidades de primer orden. En el norte del Valle de Aburrá, se localiza en Bello. La franja de densidad media alta (de 300 a 200 viviendas por hectárea bruta) se asocia a corredores servidos por Metroplús y a centralidades municipales, se localiza en los cuatro municipios. Aledaña a esta franja, está

la de densidad media (entre 200 y 120 viviendas por hectárea bruta), esta se localiza en los cuatro municipios del norte del Área Metropolitana. En Bello se localiza parte de la franja baja (entre 120 y 70 viviendas por hectárea bruta). Y por último, distribuida en los cuatro municipios, se localiza la franja muy baja (entre 70 a 10 viviendas por hectárea bruta).

Atendiendo las anteriores normas se toman como base para la aplicación de la medida, las densidades descritas, recomendando que en próximos ajustes a las DMOT y Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, se introduzca como otro criterio a tener en cuenta al definir las densidades habitacionales, el hecho de que éstas se localizan en zonas de recarga directa e indirecta de importancia alta del acuífero del Valle de Aburrá.

La superficie a ocupar con construcciones en una determinada área estaría en función de un factor o un índice de permeabilización del suelo, con el cual se definiría el porcentaje de área que podría impermeabilizarse con construcciones y la que quedaría libre para asegurar la recarga de las aguas subterráneas y en las cuales solo se permitiría zonas verdes con vegetación que favorezca la infiltración.

El objetivo para las zonas de expansión urbana y suburbana será el de reducir el impacto del sellado y la impermeabilización del suelo, estableciendo en los planes urbanísticos valores mínimos (no menores al 50% en áreas de recarga directa y al 30% en áreas de recarga indirecta) de suelo permeable.

Lo anterior implica estudios que permitan definir el grado de permeabilidad de las zonas de recarga donde se considera que la medida puede tener aplicabilidad. Estos estudios es uno de los objetivos de la medida técnica: Investigación para la identificación y definición de técnicas que permitan intervenciones urbanísticas con mayor posibilidad de recarga a los acuíferos.

### **5.3.2 Medidas de carácter administrativo.**

Se proponen cuatro medidas de carácter administrativo: i) coordinación y responsabilidad compartida, ii) capacitación interinstitucional y comunitaria para el manejo de las zonas de recarga, iii) seguimiento y monitoreo social, y iv) control de captaciones activas y abandonadas.

#### **Coordinación y responsabilidad compartida.**

Cuando la responsabilidad institucional de protección de las aguas subterráneas es compartida se requiere de un marco general o instancia de decisión común dentro del cual se maneje las políticas de protección y se dé prioridad a las medidas de control, con el fin de evitar decisiones inconsistentes o contradictorias. Un instrumento establecido por ley para tal fin es la Comisión Conjunta, creada por la Ley 99 de 1993 (parágrafo 3 del Artículo 33) y reglamentadas por el Decreto 1604 de 2002. Respondiendo a la anterior norma y ante la necesidad de una gestión conjunta de la cuenca del río Aburrá, se conforma mediante convenio interadministrativo del 20 de octubre de 2004, la Comisión Conjunta para la Ordenación de la Cuenca del Río Aburrá, integrada por Cornare, Corantioquia y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, y cuyo reglamento interno está dado por el Acuerdo de dicha Comisión No. 000001 de 2005. La ya existencia de este instrumento hace que la

manera más viable de realizar una gestión integral del recurso hídrico subterráneo en la cuenca hidrográfica del río Aburrá, coordinada y compartida, sea esta Comisión Conjunta.

### **Capacitación interinstitucional y comunitario para el manejo de las zonas de recarga.**

El desconocimiento de las dinámicas y de la existencia misma de las aguas subterráneas, ya que es un recurso no visible y por ello no reconocido por las comunidades que habitan las zonas de recarga, hacen que sea necesario realizar un proceso de educación continuada dirigido a los líderes y organizaciones sociales. Igualmente, debe hacerse con los funcionarios de las diferentes instituciones públicas con jurisdicción en las zonas de recarga para evitar que por desconocimiento se tomen decisiones que vayan en contra de los objetivos de protección de estas zonas.

### **Seguimiento y monitoreo social.**

Las autoridades ambientales, personas, instituciones y organizaciones implicadas en la protección y conservación de las zonas de recarga, pueden hacer parte de un plan de monitoreo y seguimiento que cuente con indicadores prácticos para medir el impacto que tienen las acciones de manejo implementadas. El Plan, al igual que los indicadores, se desarrolla en el presente proyecto propuesto.

### **Control de captaciones activas y abandonadas.**

Las captaciones son una fuente directa de contaminación de las aguas subterráneas, por ello debe aplicarse estrictamente una reglamentación para su construcción, manejo y abandono de las mismas, así como su legalización y control. Es de anotar que esta medida se debe ejecutar en forma conjunta entre Corantioquia, Cornare y el AMVA, por encontrarse su zona de aplicación en jurisdicción de estas autoridades ambientales.

### **5.3.3 Medidas de carácter técnico.**

Finalmente se proponen una serie de medidas de carácter técnico que incluyen: i) programa de producción sostenible, ii) diseño y ejecución de programas de incentivos, iii) restauración ecológica y protección de los recursos naturales, iv) valoración económica del agua subterránea, v) recarga artificial del agua subterránea utilizando aguas lluvias, vi) operación de la red de monitoreo, y vii) Investigación para la identificación y definición de técnicas que permitan intervenciones urbanísticas con mayor posibilidad de recarga de los acuíferos.

### **Programa de producción sostenible.**

Para lograr el aprovechamiento ambientalmente sostenible de los suelos según su potencial de uso, condiciones edáficas, usos culturales y ventajas comparativas, entre otros criterios, se propone una serie de acciones que van dirigidas a incorporar en los sistemas de producción establecidos en el norte del Valle de Aburrá, entre los que se incluye: aprovechamientos de los productos secundarios del bosque, cultivos agroecológicos, sistemas agroforestales, ecoturismo, producción más limpia en la industria y minería. El desarrollo de este programa debe contemplar y respetar aspectos sociales, culturales y económicos, propios de la población local.

### **Diseño y ejecución de un programa de incentivos.**

Esta idea busca fomentar en las personas que realizan alguna actividad económica la inclusión de prácticas ambientales o procesos de producción más limpia que contribuyan a la disminución de la contaminación de las aguas subterráneas. Este programa puede ser aplicado a los dueños de los predios de las áreas de recarga y demás áreas de protección del recurso hídrico que destinen parte de sus predios a la práctica de actividades económicas compatibles con la protección, o a quienes hagan reconversión de sus sistemas agropecuarios o incluyan procesos de producción limpia.

También van orientadas a lograr incentivos que permitan desarrollar estas actividades con tecnologías más amigables con el medio ambiente. La implementación de este programa da la oportunidad de obtener incentivos como financiamiento de actividades productivas, pago por servicios ambientales, finca ecológica, certificaciones de producción orgánica y Certificados de Sostenibilidad Turística.

En esta media se incluye el programa de pago de servicios ambientales en el cual se diseñe una estrategia que permita generar recursos para compensar económicamente a quienes destinen sus tierras a la protección de las zonas de recarga. Esta iniciativa está ya incluida en el POMCA como uno de los proyectos que hacen parte del programa: "Pago por servicios Ambientales" dentro de la Línea Estratégica: "Compensación y/o pago por servicios ambientales".

### **Restauración ecológica y protección de los recursos naturales.**

Dirigida a corregir y disminuir áreas degradadas producto de las actividades antrópicas, sobre todo aquellas áreas en sobre uso, donde se encuentran áreas sobre pastoreadas, terrenos infértiles y erosionados, los cuales necesitan revertir el daño ocasionado. Estas áreas están identificadas dentro la zonificación ambiental del POMCA en la categoría de zonas de recuperación para la conservación y protección ambiental.

### **Valoración económica del agua subterránea.**

Establecer que el "agua" sea un eje estructurante en la planificación y ordenamiento del territorio, garantiza la protección de las zonas de recarga pero se requiere de una discusión y análisis por parte de los gobiernos locales y autoridades ambientales de los costos y los valores de la protección de las zonas de recarga y el costo de la no protección.

### **Recarga artificial de las aguas subterráneas utilizando aguas lluvias.**

La recarga artificial de acuíferos utilizando el agua lluvia es una técnica que se ha utilizado en algunas países, entre ellos España y México, como una estrategia para aumentar las reservas de agua subterránea ante la escasez cada vez mayor de este recurso. Su adecuado uso ofrece ventajas como son la disminución de las inundaciones ocasionadas por la intensidad de las lluvias, un menor riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y en consecuencia menor costo de potabilización de las mismas y potencialidad de usos.

La recarga artificial se hace mediante un conjunto de técnicas que permiten aumentar la disponibilidad de agua subterránea, con la calidad apropiada a los usos a los que se destina, mediante una intervención consciente, directa o indirecta, en el ciclo natural del agua. Existen diferentes métodos para ello, los cuales se dividen en dos grandes grupos: Obras de superficie y obras en profundidad (Custodio, 1986). La aplicabilidad de esta idea debe ser técnicamente evaluada a la luz de las condiciones particulares del Valle de Aburrá y después de efectuar un análisis prospectivo en relación con la utilización del agua subterránea en la región.

### **Operación de la red de monitoreo.**

La red de monitoreo permite hacer un seguimiento a las oscilaciones del nivel piezométrico tanto en condiciones naturales como por efecto de la utilización del agua subterránea; igualmente a través de la red se controlarán las variaciones en la calidad del recurso. Lo anterior hace que la red se convierta en una herramienta que permite medir la efectividad de las medidas de protección implementadas para la protección de las zonas de recarga y demás planes que tienen como fin la protección del recurso hídrico. Esta medida busca que se opere la red diseñada en el proyecto "Plan de Manejo de los Acuíferos del Valle de Aburrá, Diseño y Puesta en Marcha de una Red de Monitoreo Piezométrico y de Calidad" que realizó el AMVA en 2011, en el marco de RedRío Fase III.

Investigación para la identificación y definición de técnicas que permitan intervenciones urbanísticas con mayor posibilidad de recarga a los acuíferos.

Se hace necesario identificar y utilizar técnicas de urbanización que mantengan espacios a través de los cuales siga siendo posible la recarga de las aguas subterráneas, con las calidades que proporciona el agua lluvia y de escorrentía directa. En este sentido medidas como la prohibición de la pavimentación impermeable de espacio abierto (mediante el uso de pavimentos permeables o adoquines), la obligatoriedad de conservar zonas verdes en parques, la exigencia del diseño de zonas de retroceso (distancia mínima que la fachada de un edificio deba tener con respecto a los límites del terreno) ocupadas por jardines y no por parqueaderos.

## **5.4 APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MANEJO EN LAS ZONAS DE RECARGA**

Algunas de las medidas identificadas para el manejo de zonas de recarga, tanto en los casos de recarga directa como indirecta, son de aplicación general; sin embargo otras involucran particularidades según tipo de zona de recarga, las condiciones asignadas a ellas en la zonificación ambiental del POMCA, la clasificación de suelos que les corresponde en los POT, o los alcances proyectados en las medidas propuestas. En el numeral 5.4.1 se citan las primeras y en 5.4.2 se reúnen en un texto sintético, soportado en la Tabla 5.5 y en una serie de mapas las segundas.

### **5.4.1 MEDIDAS DE MANEJO GENERAL EN LAS ZONAS DE RECARGA.**

Independiente de la categoría de zona de recarga, deben implementarse en la zona norte del Valle de Aburrá, las siguientes medidas de manejo normativo, administrativo y técnico:

### **Medidas de tipo normativo:**

- Articulación de las actividades de protección de las aguas subterráneas con otros planes.
- Control y aplicación de los instrumentos administrativos, de planificación y económicos que contribuyen al control de actividades contaminantes.

### **Medidas de tipo administrativo:**

- Coordinación y responsabilidad compartida.
- Capacitación interinstitucional y comunitario para el manejo de las zonas de recarga.
- Seguimiento y monitoreo social.
- Control de captaciones activas y abandonadas.

### **Medidas técnicas:**

- Valoración económica del agua subterránea.
- Operación de una red de monitoreo.

## **5.4.2 MEDIDAS DE MANEJO A APLICAR SEGÚN CONSIDERACIONES ESTABLECIDAS EN LA ZONIFICACIÓN DEL POMCA Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE LOS POT.**

Dado que las medidas de tipo administrativo se deben aplicar en todas las zonas de recarga, se presenta a continuación la descripción y localización de las áreas en las que se debe considerar la aplicación de medidas específicas de tipo normativo y técnico. Una descripción detallada y desglosada de las áreas en las que se deberán aplicar las distintas medidas propuestas se incluye en el Anexo 5.2 de este informe.

### **5.4.2.1 Medidas de tipo normativo:**

#### **Mantenimiento de las categorías existentes o modificación de áreas en la zonificación del POMCA.**

Se conservarán las categorías asignadas en la zonificación ambiental del POMCA, como se presentan en el mapa de la Figura 5.11, en todas las de recarga para los casos en los que la categoría en la zonificación del POMCA, corresponde suelos de protección y recuperación para la protección, cuando la clasificación de los suelos de los POT pueda ser incluida en esta categoría (suelos rurales y de protección). Igualmente, en cualquier zona de recarga y la categoría en la zonificación del POMCA corresponde a consolidación de los usos urbanos y la clase de suelo, en los POT es urbana y de expansión. También se aplica en la zonas de recarga indirecta de importancia muy baja en todas las categorías del POMCA.

Se propone modificaciones a la zonificación ambiental del POMCA, convirtiéndose en áreas para la protección ambiental (Figura 5.11), aquellas zonas de recarga directa e indirecta de importancia alta y media que en el POMCA corresponda a la categoría de conservación

ambiental y recuperación ambiental y que dentro las clases del suelo de los POT se pueda aplicar los criterios establecidos en el POMCA para estas áreas. Así mismo se propone modificaciones a la zonificación ambiental del POMCA, convirtiéndose en áreas de recuperación para la protección ambiental, las zonas de recarga directa e indirecta en la categoría de producción industrial y que en los POT se clasifican como suelos suburbano, rural y de protección.

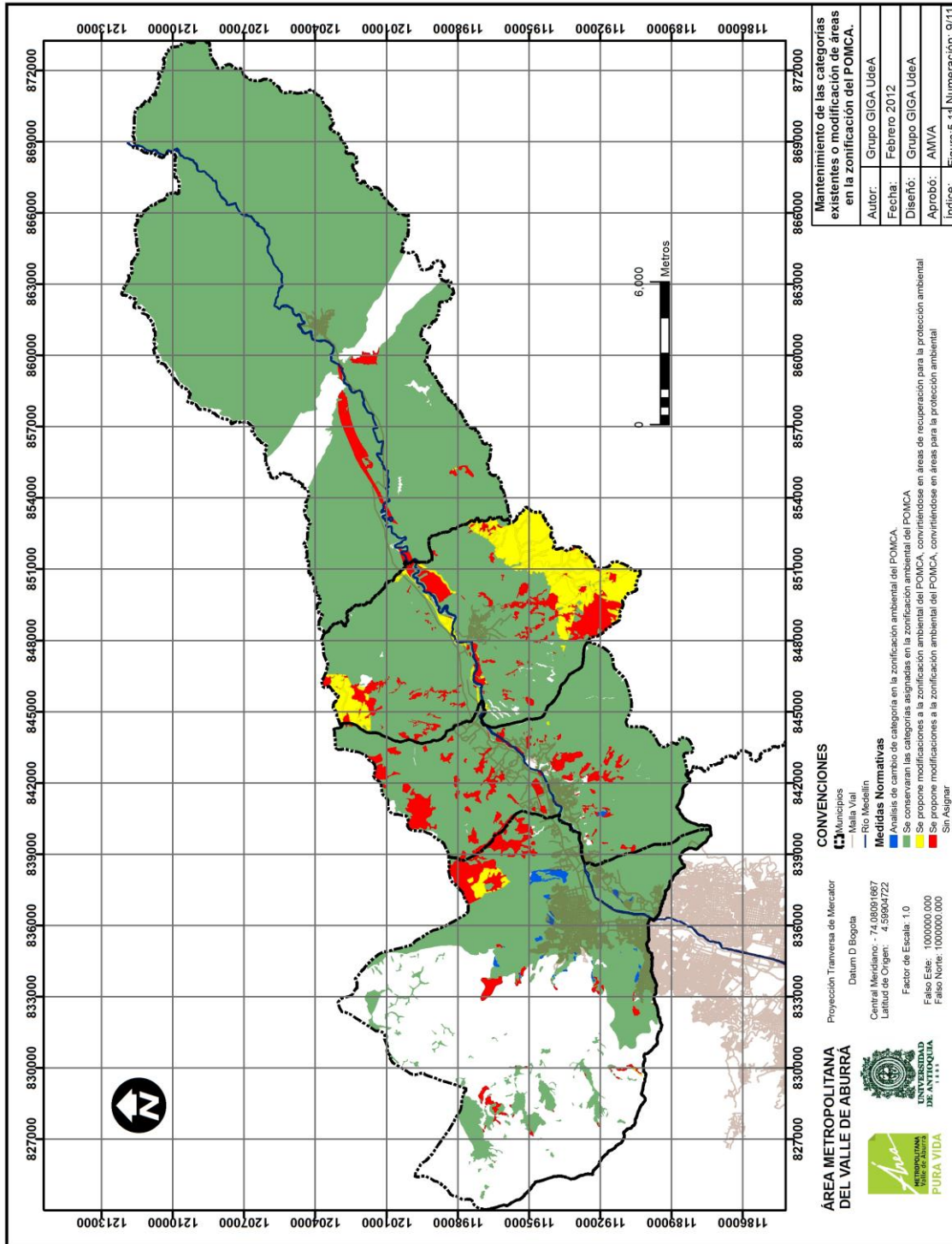


Figura 5.11. Mantenimiento de las categorías existentes o modificación de áreas en la zonificación del POMCA.



## **Definición de determinantes ambientales para la clasificación del suelo de los planes de ordenamiento territorial.**

La aplicación de esta medida implica, en algunos casos, el mantenimiento en la clasificación de los suelos establecida en los POT, en otras la definición dentro de los mismos de nuevas áreas de protección, o la restricción en algunos lugares a implementar parcelaciones. En el mapa de la Figura 5.12 se observa la distribución espacial de estas condiciones, tal como se describen a continuación.

Se conservara la clasificación de los suelos establecida en los POT en las áreas están en zonas de recarga directa o indirecta y pertenecen a la categoría de suelos para la consolidación de usos urbanos, conservación ambiental, recuperación para la conservación ambiental y recuperación para la protección ambiental según el POMCA y se han clasificado como suelos urbano, de expansión, suburbano y de protección en los POT. También se conserva la clasificación del POT para los suelos que estén en zona de recarga indirecta de importancia media y pertenecen a la categoría de suelos para la consolidación de usos urbanos recuperación para la conservación ambiental protección ambiental recuperación para la protección ambiental producción agropecuaria y forestal según el POMCA y se han clasificado como suelos urbano, suburbano y de protección en los POT. Finalmente para las áreas en zona de recarga indirecta de importancia muy baja y pertenecen a la categoría de consolidación de usos urbanos, conservación ambiental, recuperación para conservación ambiental, recuperación para la protección ambiental, producción agropecuaria y forestal y producción minera y se han clasificado como suelos urbano, de expansión, suburbano, rural y de protección en los POT.

Se propone modificaciones a la clasificación de los suelos según el POT, convirtiéndose en áreas de protección, aquellas que están en zonas de recarga directa o indirecta de importancia alta o media y pertenecen, según el POMCA, a las categoría de suelos para la consolidación de usos urbanos, suelos para la conservación ambiental, recuperación para la protección o conservación ambiental y se han clasificado como suelo suburbano o rural en los POT. Deben someterse a la misma modificación las zona de recarga indirecta de importancia muy baja y pertenecen a la categoría de protección ambiental, recuperación para la protección ambiental, y se han clasificado como suelo rural en los POT.

También dentro de los POT se deben imponer restringiendo a la destinación del suelo para parcelaciones, en zonas de recarga directa, o indirecta de importancia alta o media, que estén en la categoría de suelos para la consolidación de usos urbanos, conservación ambiental, recuperación para la conservación y protección ambiental, protección ambiental, producción agropecuaria y forestal, según el POMCA, y se han clasificado como suelos rural y de protección en los POT.

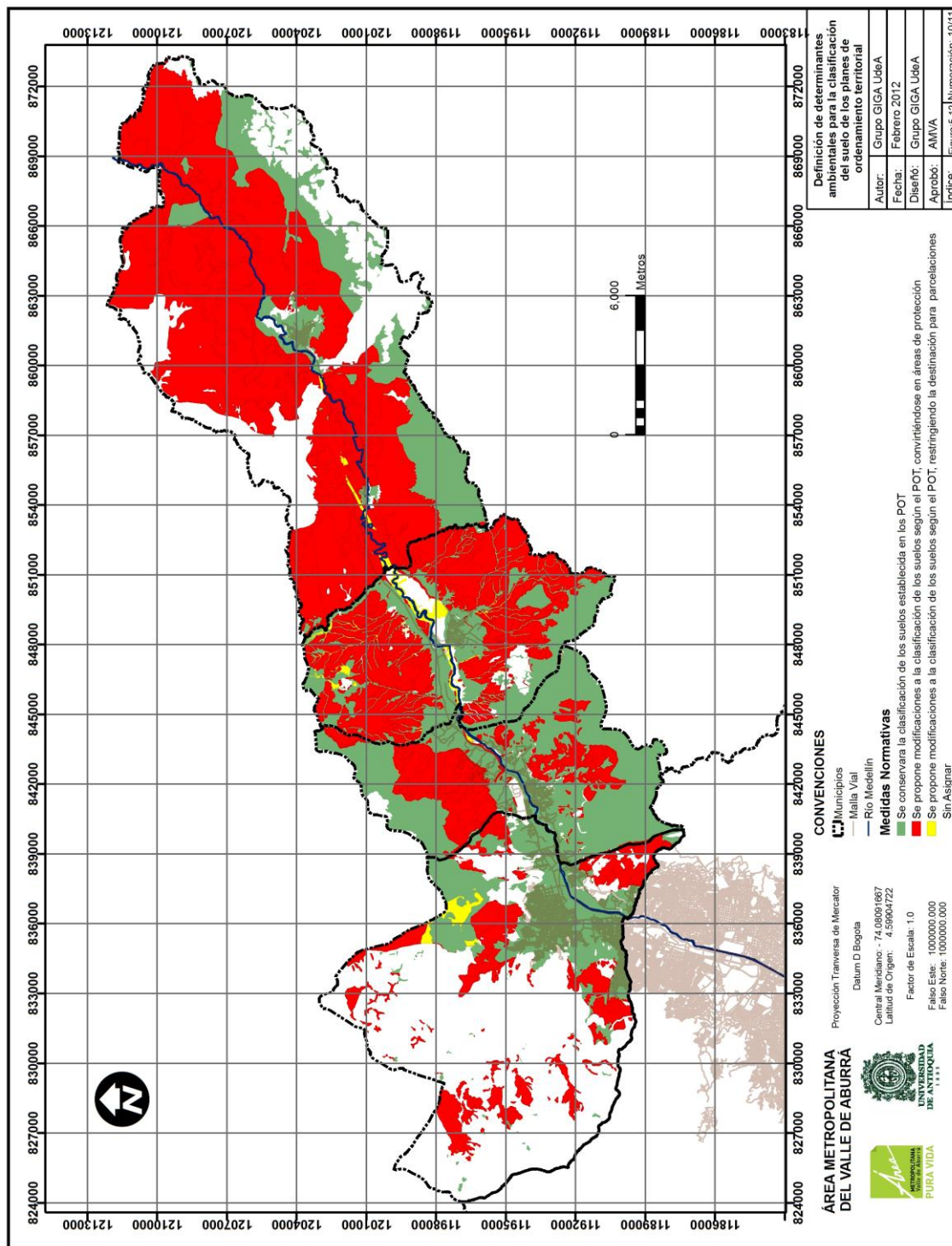


Figura 5.12. Definición de determinantes ambientales para la clasificación del suelo de los planes de ordenamiento territorial.

### **Control y aplicación de los instrumentos normativos y de control de actividades contaminantes:**

Si bien esta medida es de carácter general para implementar en todas las áreas de recarga, se enfatiza en la importancia que revisten las áreas categorizadas en el POMCA como de producción industrial y que sean clasificadas en los POT como de usos de suelos urbano, rural, suburbano y de protección.

### **Control de las densidades de población en las áreas urbanas y rurales.**

En el mapa de la Figura 5.13 se identifican las zonas en las que se debe prestar mayor atención en el sentido de aplicar medidas de control de densidades poblacionales siguiendo las directrices establecidas en el Artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia o en el Artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006, y aplicando restricciones en términos de mantener un índice de permeabilidad que deberá establecerse a partir de lineamientos técnicos y que deben tender a conservar las condiciones naturales en un 50% del área para las zonas de recarga directa y no menos de 30% para las zonas de recarga indirecta de importancia alta.

Se aplicaran estas medidas en todas las zonas de recarga directa o indirecta que estén clasificadas como suelos urbanos, de expansión, suburbano, rural y de protección en los POT.

En Tabla 5.4 se presenta unas síntesis en relación al área de aplicación de las diferentes medidas de tipo normativo descritas aquí.

**Tabla 5.4. Síntesis en relación al área de aplicación de las diferentes medidas de tipo normativo.**

MEDIDA GENERAL	Medida ESPECIFICA	AREA (Km2)	% AREA
Mantenimiento de las categorías existentes o modificación de áreas en la zonificación del POMCA.	Se conservarán las categorías asignadas en la zonificación ambiental del POMCA	360.5	72.3
	Modificación a la zonificación ambiental del POMCA, convirtiéndose en áreas para la protección ambiental	21.8	4.4
	Modificaciones a la zonificación ambiental del POMCA, convirtiéndose en áreas de recuperación para la protección ambiental	15.6	3.1
Definición de determinantes ambientales para la clasificación del suelo de los planes de ordenamiento territorial	Se conservara la clasificación de los suelos establecida en los POT	147.3	29.5
	Se propone modificaciones a la clasificación de los suelos según el POT, convirtiéndose en áreas de protección	205.6	41.2
	imponer restringiendo a la destinación del suelo para parcelaciones	5.2	1.1
Control de las densidades de población en las áreas urbanas y rurales.	Aplicar el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de CORANTIOQUIA	334.3	67.0
	Aplicar el artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006 y restringir área de impermeabilización	28.6	5.7

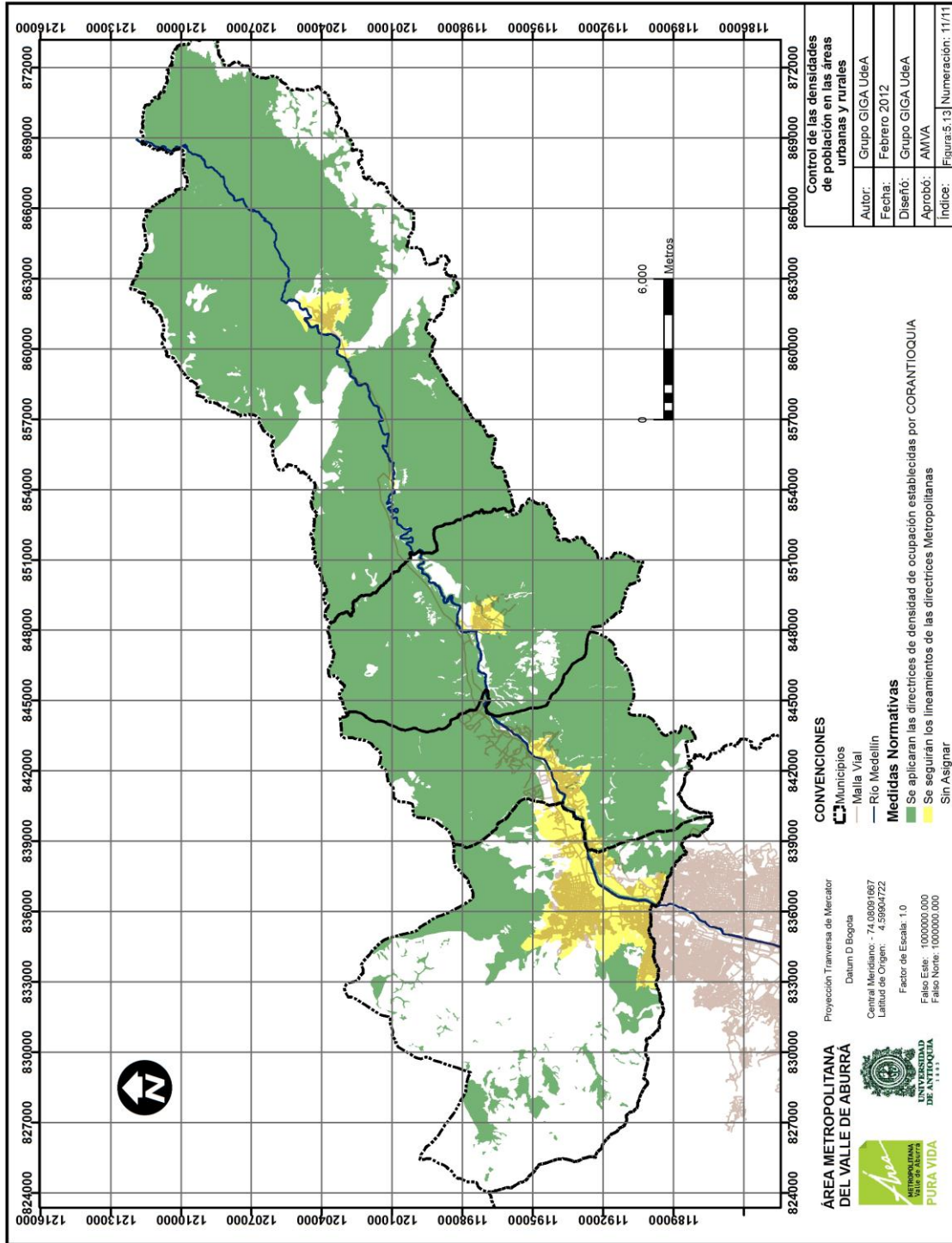


Figura 5.13. Control de las densidades de población en las áreas urbanas y rurales.

### **Medidas de tipo técnico:**

Algunas medidas de tipo técnico se aplican bajo algunas condiciones particulares, tal como se especifica a continuación, y se muestra en la Figura 5.14 y la Figura 5.15. El detalle de las características de las zonas donde se implementarán estas medidas esta también consignado en el Anexo 5.2.

### **Programa de producción sostenible:**

Como ya se ha mencionado, los programas de producción sostenible comprenden diferentes medidas que involucran aprovechamientos de los productos secundarios del bosque, cultivos agroecológicos, sistemas agroforestales, ecoturismo, producción más limpia en la industria y minería. En los siguientes párrafos se describen las áreas en las que se aplicarían estos tipos de medidas:

Aprovechamientos de los productos secundarios del bosque, ecoturismo y pequeños cultivos agroecológicos. Con esta medida se busca un aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, contribuyendo a mantener la percolación natural en las zonas de recarga directa e indirectas, que a la vez se corresponden a las zonas de protección y conservación en la zonificación del POMCA (actual y la que se propone modificar), y en los POT de los municipios son suelos que por sus condiciones actuales cumplen con los criterios establecidos en el POMCA para ser suelos de protección. En el mapa de la Figura 5.14 se muestra las zonas donde se propone realizar el proyecto, la cual corresponde a un 2.1%, del total de la zona de estudio. Implementación de sistemas agroforestales, producción pecuaria sostenible y agricultura orgánica.

### **Sistemas agroforestales y agricultura orgánica y ecoturismo:**

Su implementación se propone en las zonas de recarga directa e indirecta que, en la zonificación del POMCA, corresponde a la categoría de recuperación para la protección, y en los POT, estos suelos son de protección o cumplen con los criterios establecidos en el POMCA para incluirse en esta. Las áreas propuestas para la implementación de esta medida se muestran en la Figura 5.14, la cual ocupa un 18.4% de la totalidad del área de estudio.

### **Inclusión de la producción más limpia en los procesos industriales:**

Es una medida que se propone para las categorías en el POMCA de producción industrial y minera en las zonas de recarga directa e indirecta, cuando además, se han clasificado como suelo rural en los POT. Con esta medida se busca disminuir el impacto sobre los diferentes factores ambientales debido a los procesos productivos que se realizan, lo cual incide en la calidad del agua que se infiltra como recarga y por ende disminuye la contaminación del acuífero. El área donde se propone desarrollar esta medida corresponde al 0.8% (Figura 5.14).

### **Diseño y ejecución de programas de incentivos:**

Esta medida se propone implementar en las zonas de recarga directa e indirecta que se localizan en las categorías (según POMCA) de conservación ambiental, protección

ambiental, recuperación para la protección ambiental, recuperación para la conservación ambiental, producción industrial y minera, agropecuaria y forestal, y que en los POT se han clasificado de expansión urbana, suburbano, rural y de protección según los mapas de las Figura 5.11 y Figura 5.12. El área de aplicación de esta medida se muestra en el mapa de la Figura 5.15 y ocupa un 47.3% del total de la zona de estudio.

### **Restauración ecológica y protección de los recursos naturales:**

Esta medida se aplicará en las zonas de recarga directa e indirecta que corresponde a las categorías de recuperación para la protección y conservación ambiental dentro de la zonificación del POMCA y que en los POT los suelos sean clasificados como suelo suburbano, rural y de protección (Anexo 5.2, Figura 5.11 y Figura 5.12). También se incluyen dentro de este tipo de medidas los sectores que deben ser objeto de recuperación de suelos degradados por la actividad minera y frentes de explotación abandonadas. Las zonas propuestas para la implementación de esta medida se muestran en la Figura 5.15, las cuales ocupan el 17.5% del total del área de estudio.

### **Investigación para la identificación y definición de técnicas que permitan intervenciones urbanísticas con mayor posibilidad de recarga de los acuíferos:**

Esta medida tiene una mayor aplicación en las zonas de categoría consolidación de usos urbanos del POMCA y que se han clasificado como suelos urbano, suburbano y de expansión en los POT, y que además se localizan sobre zonas de recarga directa e indirecta de importancia alta y media. También se propone en aquellos casos que se presenta la categoría de conservación o protección ambiental en suelos clasificados como urbanos dentro del POT, lo cual puede deberse a la diferencia de escalas en la cartografía utilizada, deficiencias y desactualización de la misma, y que aún, algunos municipios, no han actualizado sus POT. El área donde se propone el desarrollo de esta medida corresponde al 8.2% del total de la zona de estudio (Figura 5.14).

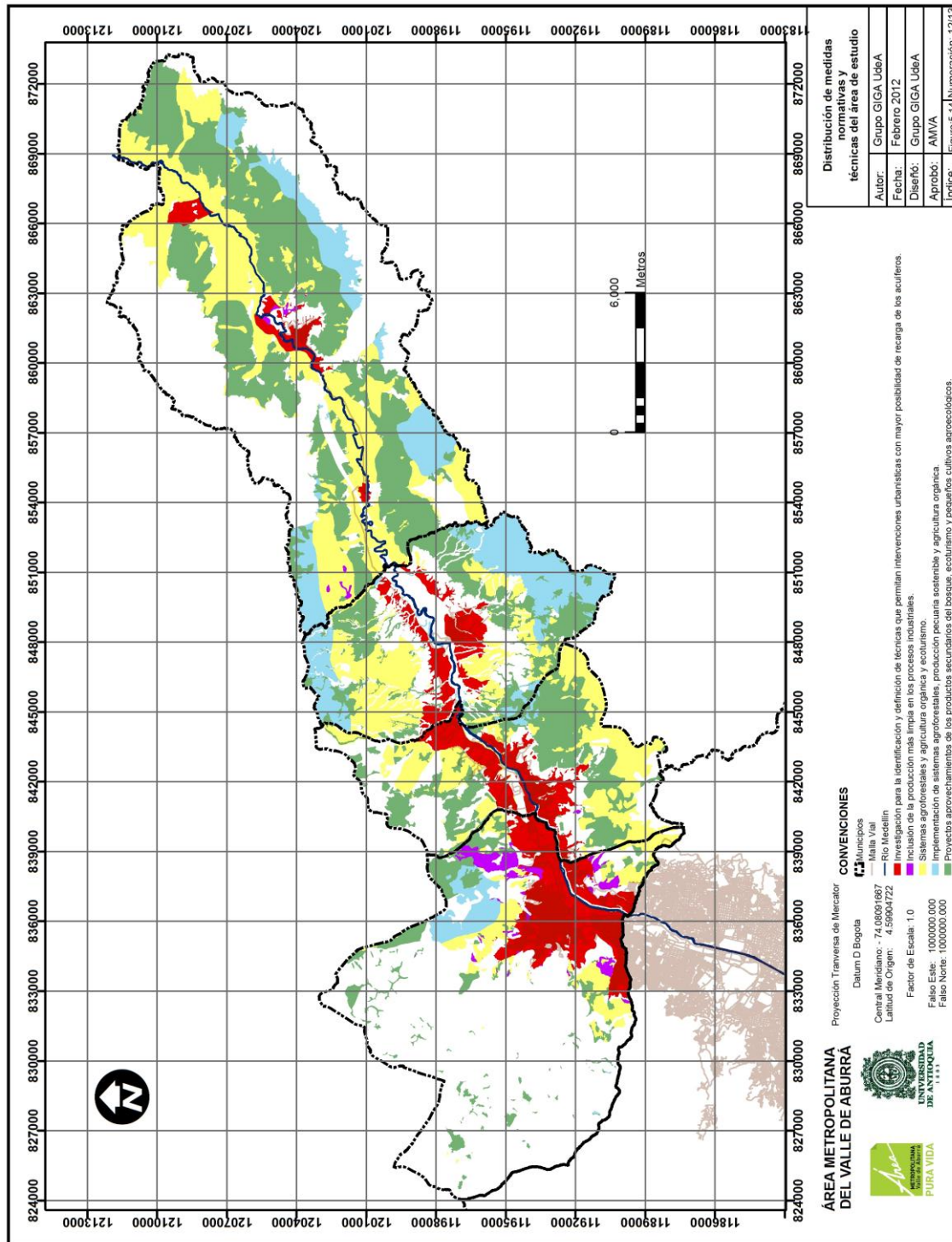


Figura 5.14. Distribución de medidas de carácter técnico del área de estudio.



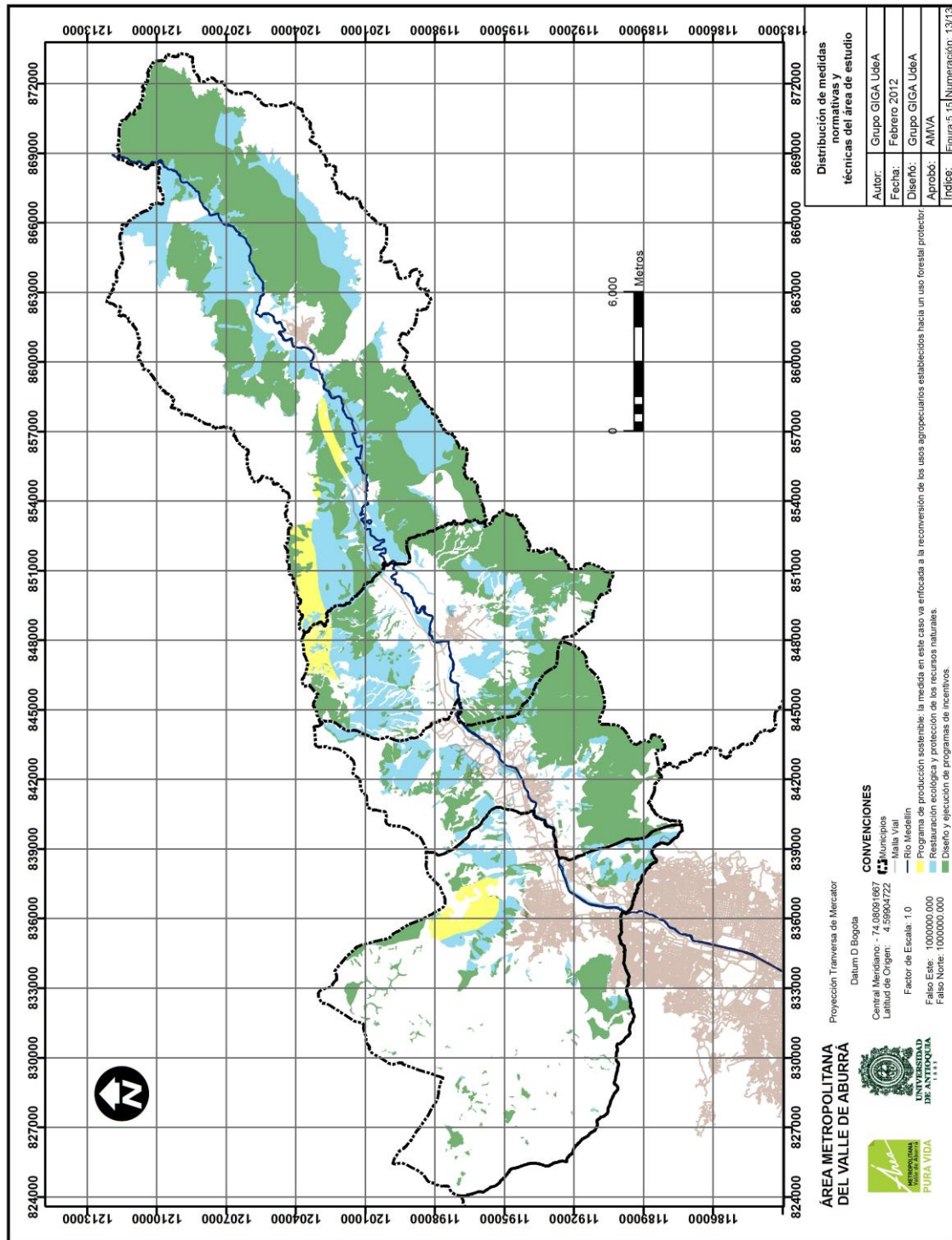


Figura 5.15. Distribución de medidas de carácter técnico del área de estudio.

**Tabla 5.5. Medidas de manejo y tipos de uso aplicar en las diferentes categorías de la zonificación ambiental del POMCA y las clases de suelo de los planes de ordenamiento territorial.**

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Directa		Conservar la categoría dentro de la zonificación ambiental del POMCA.		Recarga artificial de las aguas subterráneas utilizando aguas lluvias. Una posible localización de estos sitios de recarga sería cerca a la descarga de las principales quebradas al río Aburrá.	Uso principal: urbano
	Consolidación de usos urbanos	Se conserva la clasificación de los suelos de los POT cuando estos son suelos urbanos y de expansión urbana. Cuando el suelo es rural y suburbano pasa a protección.  Para urbano y de expansión urbana aplicación de densidades habitacionales según lo establecido en el artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006 que adopta las DMOT. Para suelo suburbano, rural y de protección aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia	Se aplican todas las medidas propuestas.	Investigación para la identificación y definición de materiales que permitan intervenciones urbanísticas con mayor posibilidad de recarga de las aguas subterráneas.	Uso compatible: agrícola (en solares ecológicos), industrial y de servicios en suelos urbanos y de expansión urbana.
		Excluir la zona rural, correspondiente a esta categoría, como zona para parcelaciones.		Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover la implementación de proyectos aprovechamientos de los productos secundarios del bosque, ecoturismo y pequeños cultivos agroecológicos.	Uso restringido: minero. e industrial.
				Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.	Uso prohibido: no aplica

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Directa	Conservación ambiental	Convertir estas zonas de conservación ambiental en zonas de protección en la zonificación ambiental del POMCA.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover la implementación de proyectos aprovechamientos de los productos secundarios del bosque, ecoturismo y pequeños cultivos agroecológicos.	Uso principal: Forestal protector, protección de los recursos naturales.
		Incluir estas zonas de conservación como suelo de protección en la clasificación del suelo de los POT de los municipios cuando corresponde a suelo suburbano y rural en los POT vigentes.		Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.	Uso compatible: Forestal (aprovechamiento de productos no maderables), Investigación, ecoturismo).
		En el suelo rural, suburbano y de protección aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha. En el caso de suelo urbano y de expansión urbana, que se conserva en los POT en esta categoría, aplicar las densidades habitacionales según lo establecido en el artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006 que adopta las DMOT.			Uso restringido: recreación, minero, Agrícola (agricultura orgánica), pecuario y agroforestal.
		Excluir la zona rural, correspondiente a esta categoría, como zona para parcelaciones.			Uso prohibido: urbano, minero, Industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo) y parcelación de viviendas con alta, media alta y media densidad habitacional (según franjas establecidas en el artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006 que adopta las DMOT).

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Directa		Convertir estas zonas de recuperación para la conservación ambiental en zonas de recuperación para la protección ambiental dentro de la zonificación ambiental del POMCA.		Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover procesos para la implementación de sistemas agroforestales, producción pecuaria sostenible y agricultura orgánica.	Uso principal: Forestal protector, protección de los recursos naturales.
		Incluirías en los POT como suelos de protección cuando en la actual clasificación de los suelos, estos corresponde a suelo rural y suburbano.		Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.	Uso compatible: Investigación, ecoturismo, sistemas agroforestales y agricultura orgánica. En lo urbano vivienda de baja densidad habitacional (70 y 10 viviendas).
	Recuperación para la conservación ambiental.	En el suelo rural y suburbano aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Restauración ecológica y protección de los recursos naturales.	Uso restringido: recreación, minero, agrícola tradicional, pecuario con técnicas ambientalmente sostenibles.
		En el suelo urbano, aplicar las densidades habitacionales correspondiente al rango entre 70 a 10 viviendas por ha establecidas en el artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006 que adopta las DMOT.			Uso prohibido: urbano, minero, Industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo) y parcelación de viviendas campesite. En lo urbano viviendas con alta, media alta y media densidad habitacional (según franjas establecidas en el artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006 que adopta las DMOT).
		Excluir la zona rural, correspondiente a esta categoría, como zona para parcelaciones.			

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Directa	Protección Ambiental	<p>Conservar la categoría en la zonificación ambiental del POMCA.</p>	<p>Se aplican todas las medidas propuestas.</p>	<p>Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover proyectos para el aprovechamiento de productos secundarios del bosque.</p>	<p>Uso principal: Forestal protector, protección de los recursos naturales.</p>
		<p>Incluir el suelo rural y suburbano como de protección en la clasificación del suelo de los POT de los municipios.</p>		<p>Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.</p>	<p>Uso compatible: Forestal (aprovechamiento de productos no maderables), Investigación, ecoturismo).</p>
		<p>Aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha. y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.</p>			<p>Uso restringido: recreación, minero, agricultura orgánica, pecuario con sistemas ambientalmente sostenibles y agroforestal.</p>
		<p>No permitir la delimitación y ubicación del uso de parcelación de vivienda campestre.</p>			<p>Uso prohibido: urbano, minero, Industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo) y parcelación de vivienda campestre.</p>

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Directa		<p>Conservar la categoría de en la zonificación ambiental.</p> <p>El suelo rural y suburbano en los POT pasa a protección.</p>	<p>Se aplican todas las medidas propuestas.</p>	<p>Programa de producción sostenible: enfocada a promover procesos para la implementación de sistemas agroforestales, agricultura orgánica y ecoturismo.</p>	<p>Uso principal: Forestal protector, protección de los recursos naturales.</p>
	<p>Recuperación para la protección ambiental</p>	<p>Para el suelo rural y suburbano según clasificación de los suelos de los POT de los municipios, aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.</p> <p>Para el suelo urbano y de expansión urbana, localizado dentro de esta categoría, el artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006 que adopta las DMOT propone densidades entre alta y media alta, lo cual sería ideal disminuir con el fin de favorecer la recarga del acuífero a densidades entre 10 y 70 viviendas por ha.</p> <p>Excluir la zona rural correspondiente a esta categoría como zona para parcelaciones.</p>		<p>Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.</p> <p>Investigación para la identificación y definición de materiales que permitan intervenciones urbanísticas con mayor posibilidad de recarga de las aguas subterráneas.</p>	<p>Uso compatible: Investigación, ecoturismo, sistemas agroforestales y agricultura orgánica. En lo urbano vivienda de baja densidad habitacional (70 y 10 viviendas).</p> <p>Uso restringido: recreación, minero, agrícola tradicional y pecuario intensivo con técnicas ambientalmente sostenibles.</p>
				<p>Restauración ecológica y protección de los recursos naturales.</p>	<p>Uso prohibido: urbano, minero, industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo) y parcelación de vivienda campestre. En lo urbano viviendas con alta, media alta y media densidad habitacional (según franjas establecidas en el artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006 que adopta las DMOT).</p>

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Directa	Producción industrial	<p>Revisar que áreas dentro de esta categoría se pueden llevar a protección ambiental, mediante un estudio a escala más detallada que la del POMCA (mínimo 1:10.000). Para el resto del área, conservar la categoría en la zonificación ambiental.</p>	<p>Se aplican todas las medidas propuestas.</p>	<p>Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover la inclusión de la producción más limpia en los procesos industriales.</p>	<p>Uso principal: uso industrial.</p>
		<p>En este caso se hace relevante el control apropiado de los siguientes instrumentos: Tasas Retributivas por Vertimientos y Tasas por Uso del Recurso Hídrico y de los Permisos de Vertimientos y Planes de Cumplimiento.</p>		<p>Diseño de un esquema de incentivos que beneficie a las empresas que hacen reconversión de sus procesos.</p>	<p>Uso compatible: uso comercial y de servicios.</p>
		<p>En el artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006 que adopta las DMOT, estas zonas de clasifican como áreas industriales especializadas y por tanto no se propone densidades habitacionales. En estas zonas de recarga directa se debe evitar la expansión de la misma.</p>			<p>Uso restringido: uso residencial y de recreación.</p>
					<p>Uso prohibido: no aplica</p>

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Directa	Producción minera	<p>Conservar la categoría en la zonificación ambiental dada la vigencia de los títulos mineros.</p>	<p>Se aplican todas las medidas propuestas.</p>	<p>Programa de producción sostenible: inclusión de la producción limpia en los procesos de minería.</p>	<p>Uso principal: minería</p>
		<p>Restringir la expansión de la actividad minera en estas zonas de recarga directa.</p>		<p>Diseño y ejecución de un programa de incentivos que beneficie a quienes hacen reconversión de los procesos de explotación y producción.</p>	<p>Uso compatible: forestal protector y recuperación para la protección (en frentes de explotación abandonados).</p>
		<p>En este caso se hace relevante el control apropiado al Plan de Manejo Ambiental Minero.</p>		<p>Recuperación de suelos degradados por la actividad minera y frentes de explotación abandonadas.</p>	<p>Uso restringido: industrial.</p>
					<p>Uso prohibido: uso residencial, servicios y de recreación.</p>



ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Directa		Cambiar la categoría de estas áreas dentro de la zonificación del POMCA, pasándolas a recuperación para la protección ambiental, mediante un proceso de reconversión del uso establecido.		Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a la reconversión de los usos agropecuarios establecidos hacia un uso forestal protector.	Uso principal: en el futuro hacia un uso forestal protector, protección de los recursos naturales.
	Producción agropecuaria y forestal	Aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.	Uso compatible: Investigación, ecoturismo, sistemas agroforestales y agricultura orgánica.
		No permitir la delimitación y ubicación del uso de parcelación de vivienda campestre.		Restauración ecológica y protección de los recursos naturales.	Uso restringido: recreación, minero, agrícola tradicional, pecuario con técnicas ambientalmente sostenibles.
					Uso prohibido: urbano, minero, Industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo) y parcelación de vivienda campestre.

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia alta	Consolidación de usos urbanos	Conservar la categoría dentro de la zonificación ambiental del POMCA.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Investigación para la identificación y definición de materiales que permitan intervenciones urbanísticas con mayor posibilidad de recarga de las aguas subterráneas.	Uso principal: urbano
		Se conserva la clasificación de los suelos (urbano y expansión) de los POT vigentes. El suelo rural y suburbano pasa a protección.			Uso compatible: agrícola (en solares ecológicos), industrial y de servicios en suelos urbanos y de expansión urbana.
		Para el suelo urbano y de expansión aplicar las densidades habitacionales según lo establecido en el artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006 que adopta las DMOT. Para el suelo suburbano, rural y de protección aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.			Uso compatible: agrícola (en solares ecológicos), industrial y de servicios en suelos urbanos y de expansión urbana.
					Uso prohibido: no aplica

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia alta	Conservación ambiental	Cambiar de categoría en la zonificación ambiental, pasando a protección ambiental.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover la implementación de proyectos aprovechamientos de los productos secundarios del bosque, ecoturismo y pequeños cultivos agroecológicos.	Uso principal: Forestal protector, protección de los recursos naturales.
		El suelo suburbano y rural de la clasificación del suelo de los POT vigentes pasarlos a suelo de protección.		Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.	Uso compatible: Forestal (aprovechamiento de productos no maderables), investigación, ecoturismo).
		Aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.			Uso restringido: recreación, minero, agricultura orgánica, pecuario con sistemas ambientalmente sostenibles y agroforestal.
		No permitir la delimitación y ubicación del uso de parcelación de vivienda campestre.			Uso prohibido: urbano, minero, Industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo) y parcelación de vivienda campestre.

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia alta		Cambiar la categoría en la zonificación ambiental del POMCA a recuperación para la protección ambiental.		Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover procesos para la implementación de sistemas agroforestales, producción pecuaria sostenible y agricultura orgánica.	Uso principal: Forestal protector, protección de los recursos naturales.
	Recuperación para la conservación ambiental.	Incluir las en los POT como suelos de protección cuando en la actual clasificación de los suelos, estos corresponde a suelo rural y suburbano.  En el suelo rural, suburbano y de protección aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha. y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.	Uso compatible: Investigación, ecoturismo, sistemas agroforestales y agricultura orgánica.
		No permitir la delimitación y ubicación del uso de parcelación de vivienda campestre.		Restauración ecológica y protección de los recursos naturales.	Uso restringido: recreación, agrícola tradicional, pecuario con técnicas ambientalmente sostenibles.

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia alta	Protección ambiental	<p>Conservar la categoría en la zonificación ambiental del POMCA.</p>	<p>Se aplican todas las medidas propuestas.</p>	<p>Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover proyectos para los aprovechamientos de productos secundarios del bosque.</p>	<p>Uso principal: Forestal protector, protección de los recursos naturales.</p>
		<p>Incluir el suelo rural y suburbano como de protección en la clasificación del suelo de los POT vigentes de los municipios.</p>		<p>Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.</p>	<p>Uso compatible: Forestal (aprovechamiento de productos no maderables), investigación, ecoturismo).</p>
		<p>Para el suelo rural, suburbano y de protección aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.</p>			<p>Uso restringido: recreación, minero, agricultura orgánica, pecuario con sistemas ambientalmente sostenibles y agroforestal.</p>
		<p>No permitir la delimitación y ubicación del uso de parcelación de vivienda campestre.</p>			<p>Uso prohibido: urbano, minero, industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo) y parcelación de vivienda campestre.</p>

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia alta		Conservar la categoría de en la zonificación ambiental.		Programa de producción sostenible: enfocada a promover procesos para la implementación de sistemas agroforestales, agricultura orgánica y ecoturismo.	Uso principal: Forestal protector, protección de los recursos naturales.
	Recuperación para la protección ambiental	El suelo rural y suburbano en los POT pasa a protección.  Para el suelo rural y suburbano según clasificación de los suelos de los POT de los municipios, aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.  Restauración ecológica y protección de los recursos naturales.	Uso compatible: Investigación, ecoturismo, sistemas agroforestales y agricultura orgánica.  Uso restringido: recreación, minero, agrícola tradicional y pecuario con técnicas ambientalmente sostenibles.
		No permitir la delimitación y ubicación del uso de parcelación de vivienda campestre.			Uso prohibido: urbano, minero, industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo) y parcelación de vivienda campestre.

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia alta	Producción agropecuaria y forestal.	Cambiar la categoría de estas áreas dentro de la zonificación del POMCA, pasándolas a zonas de protección.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a la reconversión de los usos agropecuarios establecidos hacia un uso forestal protector.	Uso principal: en el futuro hacia un uso forestal protector, protección de los recursos naturales.
		Incluir estas zonas como suelo de protección en la clasificación del suelo de los POT de los municipios.		Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.	Uso compatible: investigación, ecoturismo, sistemas agroforestales y agricultura orgánica.
		Aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.		Restauración ecológica y protección de los recursos naturales.	Uso restringido: recreación, agrícola tradicional, pecuario con técnicas ambientalmente sostenibles.
		No permitir la delimitación y ubicación del uso de parcelación de vivienda campestre.			Uso prohibido: urbano, minero, industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo) y parcelación de vivienda campestre.

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia alta		Revisar que áreas dentro de esta categoría se pueden llevar a protección ambiental, mediante un estudio a escala más detallada que la del POMCA (mínimo 1:10.000). Para el resto del área, conservar la categoría en la zonificación ambiental.		Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover la inclusión de la producción más limpia en los procesos industriales.	Uso principal: uso industrial.
	Producción industrial	En este caso se hace relevante el control apropiado de los siguientes instrumentos: Tasas Retributivas por Vertimientos y Tasas por Uso del Recurso Hídrico y de los Permisos de Vertimientos y Planes de Cumplimiento.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Diseño de un esquema de incentivos que beneficie a las empresas que hacen reconversión de sus procesos.	Uso compatible: uso comercial y de servicios.
		En el artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006 que adopta las DMOT, estas zonas de clasifican como áreas industriales especializadas y por tanto no se propone densidades habitacionales. En estas zonas de recarga indirecta de importancia alta se debe evitar la expansión de la misma.			Uso restringido: uso residencial y de recreación.
					Uso prohibido: no aplica.



ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia alta	Producción minera	<p>Conservar la categoría en la zonificación ambiental dada la vigencia de los títulos mineros.</p>	<p>Se aplican todas las medidas propuestas.</p>	<p>Programa de producción sostenible: inclusión de la producción limpia en los procesos de minería.</p>	<p>Uso principal: minería</p>
		<p>En este caso se hace relevante el control apropiado al Plan de Manejo Ambiental Minero.</p>		<p>Diseño y ejecución de un programa de incentivos que beneficie a quienes hacen reconversión de los procesos de explotación y producción.</p>	<p>Uso compatible: forestal protector y recuperación para la protección (en frentes de explotación abandonados).</p>
		<p>Restringir la expansión de la actividad minera en estas zonas de recarga indirecta de importancia alta.</p>		<p>Recuperación de suelos degradados por la actividad minera y frentes de explotación abandonadas.</p>	<p>Uso restringido: industrial.</p>
					<p>Uso prohibido: uso residencial, servicios y de recreación.</p>

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia media		Se conserva la categoría dentro de la zonificación del POMCA.		Investigación para la identificación y definición de materiales que permitan intervenciones urbanísticas con mayor posibilidad de recarga de las aguas subterráneas.	Uso principal: urbano
	Consolidación de usos urbanos	Se conserva la categoría dentro de la clasificación del suelo de los POT de los 4 municipios en suelo urbano, suburbano y de protección. Cuando corresponde a suelo se debe revisar la posibilidad de pasarlo a suelo de protección.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.	Uso compatible: en suelos urbanos: agrícola (en solares ecológicos), industrial y de servicios.
		Para suelo urbano aplicar la densidad de 70 a 100 viviendas por hectárea, según el artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006 y plano 6. Para suelo rural y de protección aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.		Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover procesos para la implementación de sistemas agroforestales, producción pecuaria sostenible y agricultura orgánica.	Uso restringido: minero e industrial.
					Uso prohibido: no aplica.

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia media	Conservación ambiental	Conservar la categoría en la zonificación ambiental del POMCA.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Programa de producción sostenible: a promover la implementación de proyectos aprovechamientos de los productos secundarios del bosque, y ecoturismo.	Uso principal: Forestal protector, protección de los recursos naturales.
		Incluir estas zonas de conservación como suelo de protección en la clasificación del suelo de los POT de los municipios.		Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.	Uso compatible: Forestal (aprovechamiento de productos no maderables), investigación y ecoturismo.
		En suelo rural y de protección aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha. En suelo suburbano aplicar la correspondiente a este suelo.		Uso restringido: recreación, minero, agricultura orgánica, pecuario con sistemas ambientalmente sostenibles y agroforestal.	
		En suelo urbano y de expansión aplicar la densidad establecida el artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006 y plano 6.		Uso prohibido: urbano, minero, Industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo) y parcelación de vivienda campestre.	
		No permitir la delimitación y ubicación del uso de parcelación de vivienda campestre.			

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia media		Conservar la categoría en la zonificación ambiental del POMCA.		Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover procesos para la implementación de sistemas agroforestales, producción pecuaria sostenible y agricultura orgánica, que en el futuro permita llegar a conservación ambiental.	Uso principal: Forestal protector, protección de los recursos naturales.
		Incluir estas zonas recuperación para la conservación ambiental como suelo de protección en la clasificación del suelo de los POT de los municipios.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.	Uso compatible: investigación, ecoturismo, sistemas agroforestales y agricultura orgánica.
		Aplicar, tanto para el suelo rural como para el de protección, la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.		Restauración ecológica y protección de los recursos naturales.	Uso restringido: recreación, agrícola tradicional, pecuario con técnicas ambientalmente sostenibles.
		No permitir la delimitación y ubicación del uso de parcelación de vivienda campestre.			Uso prohibido: urbano, minero, industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo) y parcelación de vivienda campestre.

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia media	Protección ambiental	<p>Conservar la categoría en la zonificación ambiental.</p>	<p>Se aplican todas las medidas propuestas.</p>	<p>Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover proyectos para los aprovechamientos de productos secundarios del bosque.</p>	<p>Uso principal: Forestal protector, protección de los recursos naturales.</p>
		<p>El suelo rural incluirlo como de protección en la clasificación del suelo de los POT de los municipios.</p>		<p>Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.</p>	<p>Uso compatible: forestal (aprovechamiento de productos no maderables), investigación y ecoturismo).</p>
		<p>En el suelo rural y de protección de los POT vigentes aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha. En el suelo Suburbano la definida para este tipo de suelo en la anterior resolución.</p>			<p>Uso restringido: recreación, minero, agricultura orgánica, pecuario con sistemas ambientalmente sostenibles y agroforestal.</p>
		<p>No permitir la delimitación y ubicación del uso de parcelación de vivienda campestre.</p>			<p>Uso prohibido: urbano, minero, Industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo) y parcelación de vivienda campestre.</p>

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia media		Conservar la categoría de en la zonificación ambiental.		Programa de producción sostenible: enfocada a promover procesos para la implementación de sistemas agroforestales, agricultura orgánica y ecoturismo.	Uso principal: Forestal protector, protección de los recursos naturales.
		Incluir estas zonas recuperación para la protección ambiental como suelo de protección en la clasificación del suelo de los POT de los municipios.		Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.	Uso compatible: Investigación, ecoturismo, sistemas agroforestales y agricultura orgánica.
	Recuperación para la protección ambiental	Aplicar tanto para el suelo rural como para el de protección, la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha. y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Restauración ecológica y protección de los recursos naturales.	Uso restringido: recreación, minero, agrícola tradicional y pecuario con técnicas ambientalmente sostenibles.
		No permitir la delimitación y ubicación del uso de parcelación de vivienda campestre.			Uso prohibido: urbano, minero, industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo) y parcelación de vivienda campestre.

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia media	Producción agropecuaria y forestal.	Cambiar la categoría en la zonificación ambiental del POMCA por protección ambiental.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a la reconversión de los usos agropecuarios establecidos hacia un uso forestal protector.	Uso principal: en el futuro hacia un uso forestal protector, protección de los recursos naturales.
				Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.	Uso compatible: investigación, ecoturismo, sistemas agroforestales y agricultura orgánica.
		Incluir las áreas del suelo rural como suelo de protección en los POT.		Restauración ecológica y protección de los recursos naturales.	Uso restringido: recreación, agrícola tradicional, pecuario con técnicas ambientalmente sostenibles.
		Aplicar la densidad máxima establecida para los suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.			Uso prohibido: urbano, minero, industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo) y parcelación de vivienda campestre.
		No permitir la delimitación y ubicación del uso de parcelación de vivienda campestre.			

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia media	Producción minera	Conservar la categoría en la zonificación ambiental del POMCA.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Programa de producción sostenible: inclusión de la producción limpia en los procesos de minería.	Uso principal: minería
		En este caso se hace relevante el control apropiado al Plan de Manejo Ambiental Minero.		Diseño y ejecución de un programa de incentivos que beneficie a quienes hacen reconversión de los procesos de explotación y producción	Uso compatible: forestal protector y recuperación para la protección (en frentes de explotación abandonados).
				Recuperación de suelos degradados por la actividad minera y frentes de explotación abandonadas.	Uso restringido: industrial.
					Uso prohibido: uso residencial, servicios y de recreación.



ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia media		Conservar la categoría en la zonificación ambiental.		Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover la inclusión de la producción más limpia en los procesos industriales.	Uso principal: uso industrial.
	Producción industrial	En este caso se hace relevante el control apropiado de los siguientes instrumentos: Tasas Retributivas por Vertimientos y Tasas por Uso del Recurso Hídrico y de los Permisos de Vertimientos y Planes de Cumplimiento.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Diseño de un esquema de incentivos que beneficie a las empresas que hacen reconversión de sus procesos.	Uso compatible: uso comercial y de servicios.
					Uso restringido: uso residencial y de recreación.
					Uso prohibido: no aplica

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia muy baja	Consolidación de usos urbanos	Se conserva la categoría dentro de la zonificación del POMCA.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Investigación para la identificación y definición de materiales que permitan intervenciones urbanísticas con mayor posibilidad de recarga de las aguas subterráneas.	Uso principal: urbano
		Se conserva la categoría dentro de la clasificación del suelo de los POT de los 4 municipios.			Uso compatible: agrícola (en solares ecológicos), industrial y de servicios.
		Para el suelo urbano y expansión urbana aplicar la densidad de 10 viviendas por hectárea, según el artículo 42 del Acuerdo Metropolitano No. 015 de 2006 y plano 6. Para los suelos suburbanos aplicar la densidad definida en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, que es de 5,07 vivienda/ha para el municipio de Girardota, de 5,01 vivienda/ha para Barbosa, de 5,06 vivienda/ha para Copacabana y de 4,99 vivienda/ha para Bello.			Uso restringido: minero e industrial.
					Uso prohibido: no aplica

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia muy baja	Conservación ambiental	Conservar la categoría en la zonificación ambiental del POMCA.		Programa de producción sostenible: a promover la implementación de proyectos aprovechamientos de los productos secundarios del bosque, y ecoturismo.	Uso principal: forestal protector, protección de los recursos naturales.
		Conservar la clasificación de los suelos establecida en los POT vigentes.		Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.	Uso compatible: forestal (aprovechamiento de productos no maderables), investigación y ecoturismo.
		En los suelos de protección aplicar la densidad máxima establecida en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha. y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha. En el suelo rural una vivienda por UAF y en el suburbano aplicar la densidad definida en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, que es de 5,07 vivienda/ha para el municipio de Girardota, de 5,01 vivienda/ha para Barbosa, de 5,06 vivienda/ha para Copacabana y de 4,99 vivienda/ha para Bello.	Se aplican todas las medidas propuestas.		Uso restringido: recreación, minero, agricultura orgánica, pecuario con sistemas ambientalmente sostenibles y agroforestal.
					Uso prohibido: urbano, minero, industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo).

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia muy baja		<p>Conservar la categoría en la zonificación ambiental del POMCA.</p> <p>Conservar la clasificación de los suelos establecida en los POT vigentes.</p>		<p>Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover procesos para la implementación de sistemas agroforestales, producción pecuaria sostenible y agricultura orgánica, que en el futuro permita llegar a conservación ambiental.</p> <p>Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.</p>	<p>Uso principal: Forestal protector, protección de los recursos naturales.</p> <p>Uso compatible: investigación, ecoturismo, sistemas agroforestales y agricultura orgánica.</p>
	Recuperación para la conservación ambiental.	<p>En los suelos de protección aplicar la densidad máxima establecida en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha. En el suelo rural una vivienda por UAF y en el suburbano aplicar la densidad definida en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, que es de 5,07 vivienda/ha para el municipio de Girardota, de 5,01 vivienda/ha para Barbosa, de 5,06 vivienda/ha para Copacabana y de 4,99 vivienda/ha para Bello.</p>	<p>Se aplican todas las medidas propuestas.</p>	<p>Restauración ecológica y protección de los recursos naturales.</p>	<p>Uso restringido: recreación, agrícola tradicional, pecuario con técnicas ambientalmente sostenibles.</p>
					<p>Uso prohibido: urbano, minero, industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo).</p>

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia muy baja	Protección ambiental	<p>Conservar la categoría en la zonificación ambiental.</p>	<p>Se aplican todas las medidas propuestas.</p>	<p>Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover proyectos para los aprovechamientos de productos secundarios del bosque.</p>	<p>Uso principal: forestal protector, protección de los recursos naturales.</p>
		<p>Definir estas zonas como suelos de protección en la clasificación de los suelos establecida en los POT vigentes.</p>		<p>Diseño y ejecución de un programa de incentivos. Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.</p>	<p>Uso compatible: forestal (aprovechamiento de productos no maderables), investigación y ecoturismo).</p>
		<p>Aplicar la densidad máxima establecida para los suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.</p>			<p>Uso restringido: recreación, minero, agricultura orgánica, pecuario con sistemas ambientalmente sostenibles y agroforestal.</p>
					<p>Uso prohibido: urbano, minero, Industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo).</p>

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia muy baja	Recuperación para la protección ambiental	Conservar la categoría de en la zonificación ambiental.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Programa de producción sostenible: enfocada a promover procesos para la implementación de sistemas agroforestales, agricultura orgánica y ecoturismo.	Uso principal: Forestal protector, protección de los recursos naturales.
		Incluir estas zonas recuperación para la protección ambiental como suelo de protección en la clasificación del suelo de los POT de los municipios.		Diseñar e implementar esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos tributarios mediante impuesto predial y otorgamiento del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), que establece la Ley 139 de 1994.	Uso compatible: Investigación, ecoturismo, sistemas agroforestales y agricultura orgánica.
		Aplicar la densidad máxima establecida para suelos de protección en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia, donde para los municipios de Bello, Girardota y Copacabana es de una vivienda por cada 38 ha, y para Barbosa es de una vivienda por cada 54 ha.		Restauración ecológica y protección de los recursos naturales.	Uso restringido: recreación, minero, agrícola tradicional y pecuario con técnicas ambientalmente sostenibles.
					Uso prohibido: urbano, minero, industrial, agrícola (intensivo), pecuario (intensivo y extensivo).

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia muy baja		Conservar la categoría en la zonificación ambiental del POMCA.		Programa de producción sostenible: enfocada a promover procesos para la implementación de sistemas agroforestales, agricultura orgánica, sistemas y pecuarios ambientalmente sostenibles.	Uso principal: forestal productor, agrícola (tradicional y tecnificado), pecuario (intensivo).
		Conservar la clasificación de los suelos propuesta en los POT vigentes.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Diseño y ejecución de un programa de incentivos como: finca ecológica, certificaciones de producción orgánica y Certificados de Sostenibilidad Turística.	Uso compatible: agroforestal, ecoturismo, recreación e Investigación.
		En el suelo suburbano y rural aplicar la densidad máxima establecida para éstos suelos en el artículo 3 de la Resolución 9328 de marzo de 2007 de Corantioquia.			Uso restringido: minero, desarrollos urbanos e industrial según Decreto 3600 de 2007.
					Uso prohibido: no aplica

ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia muy baja	Producción minera	Conservar la categoría en la zonificación ambiental dada la vigencia de los títulos mineros.	Se aplican todas las medidas propuestas.	Programa de producción sostenible: inclusión de la producción limpia en los procesos de minería.	Uso principal: minería
		Conservar la clase de suelo en los POT		Diseño y ejecución de un programa de incentivos que beneficie a quienes hacen reconversión de los procesos de explotación y producción.	Uso compatible: forestal protector y recuperación para la protección (en frentes de explotación abandonados).
		En este caso se hace relevante el control apropiado al Plan de Manejo Ambiental Minero.		Recuperación de suelos degradados por la actividad minera y frentes de explotación abandonadas.	Uso restringido: industrial.
					Uso prohibido: uso residencial, servicios y de recreación.



ZONAS DE RECARGA	CATEGORÍA	NORMATIVAS	ADMINISTRATIVAS	TÉCNICAS	TIPOS DE USO
Indirecta de importancia muy baja		Conservar la categoría en la zonificación ambiental.		Programa de producción sostenible: la medida en este caso va enfocada a promover la inclusión de la producción más limpia en los procesos industriales.	Uso principal: uso industrial.
	Producción industrial	En este caso se hace relevante el control apropiado de los siguientes instrumentos: Tasas Retributivas por Vertimientos y Tasas por Uso del Recurso Hídrico y de los Permisos de Vertimientos y Planes de Cumplimiento.  Se aplican todas las medidas propuestas.		Diseño de un esquema de incentivos que beneficie a las empresas que hacen reconversión de sus procesos.	Uso compatible: uso comercial y de servicios.
					Uso restringido: uso residencial y de recreación.
					Uso prohibido: no aplica

## 5.5 EPÍLOGO

Este ejercicio de determinación de las medidas de protección de las zonas de recarga de los acuíferos del norte del Valle de Aburrá, inició con la expectativa de encontrar en la literatura especializada en temas de hidrogeología, un amplio abanico de ideas y posibilidades que sirvieran como punto de partida para pensar en el camino que podría aplicarse en el contexto regional; se esperaba contar con experiencias propuestas, aplicadas o exitosas en otras regiones de Colombia, de América y del mundo; y desde allí identificar elementos a adoptar, y luego discutir y proponer, medidas nuevas que se ajustaran a nuestra realidad. No fue así, la búsqueda bibliográfica mostró una realidad global según la cual en todos los países se promulga y se reclama la protección de los acuíferos y de las zonas de recarga pero en la práctica se han materializado muy pocas iniciativas al respecto.

Producto de la discusión entre especialistas en hidrogeología y en gestión ambiental, basados en la norma, teniendo en cuenta el panorama que marca la tendencia del desarrollo y crecimiento del norte del Valle de Aburrá, y asumiendo las posibilidades y restricciones establecidas en el POMCA y los POT's vigentes, se logró materializar una propuesta concreta de medidas de protección desde los puntos de vista normativo, administrativo y técnico. A partir de una visualización detallada del territorio que se alcanzó mediante la aplicación de métodos de superposición cartográfica fue posible diferenciar y representar sobre mapas las áreas en las cuales se debe propender por la aplicación de medidas concretas.

Le corresponde ahora al AMVA establecer internamente los mecanismos para materializar las iniciativas propuestas, para ello sin lugar a dudas se requerirá convocar al compromiso y a la acción a los sectores institucional, comunitaria, productiva y comercial que intervienen y habitan en este entorno geográfico.

## 6 CONCLUSIONES

Mediante la ejecución del estudio “DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA DE ACUÍFEROS EN LOS MUNICIPIOS DEL NORTE DEL VALLE DE ABURRÁ”, se lograron cumplir con los siguientes objetivos: i) definir el modelo hidrogeológico conceptual que comprenda las unidades hidrogeológicas A1 y A3 en los municipios de Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa, ii) identificar y delimitar zonas de recarga directa o indirecta al sistema hidrogeológico dentro del dominio de interés, iii) establecer patrones de flujo de agua subterránea según áreas de recarga, tránsito y descarga, y iv) definir las medidas de manejo y protección del sistema hidrogeológico considerando unidades acuíferas y zonas de recarga. Teniendo en cuenta cada uno de estos cuatro aspectos se presentan enseguida a manera de conclusión, los resultados más relevantes.

### MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Considerando que el concepto de unidad hidrogeológica permite agrupar a varias unidades geológicas en una sola, según sus características hidráulicas; siendo evidente la conexión lateral entre depósitos de vertiente y aluviales en toda la zona de estudio, se decide considerarlas de manera conjunta en una unidad de carácter acuífero a la que se designará Acuífero Aburrá Norte (Figura 4.29). Es preciso aclarar que los pequeños depósitos aislados, que tienen un área no equiparable a la escala de la cartografía no se consideran como acuíferos. El Acuífero Aburrá Norte alcanza hasta 46 m de espesor en el municipio de Bello; 42 m en Copacabana; 68 m en el municipio de Girardota y 56 m en el municipio de Barbosa.

En relación con las Dunitas de Medellín, calificadas en algunas de sus facies como pseudokarst, constituyen sin lugar a dudas una unidad hidrogeológica relevante en términos de flujo de agua subterránea, ella deberá ser explorada a futuro empleando nuevas metodologías de exploración.

De acuerdo con las características de la información de entrada para los modelos de cálculo que se utilizan en el ejercicio de balance hídrico, es importante recalcar que los resultados constituyen estimaciones aproximadas de la recarga total potencial.

En general, los flujos del balance fueron consistentemente más altos en la estación La Iguaná, localizada en la ladera occidental del Valle de Aburrá, cuya precipitación media anual es tan alta como la precipitación para el año húmedo en las otras estaciones, localizadas en el fondo del valle. Esta diferencia responde a la distribución espacial de la precipitación, que aumenta hacia las laderas, sin embargo, cabe resaltar el comportamiento de la recarga en esta estación para el año húmedo, que es comparable con (e incluso supera) el valor de evapotranspiración, Este caso solo se presenta en esta estación. Por el contrario, la estación Tulio Ospina, que registra valores de precipitación comparables con las demás estaciones del fondo del valle, presenta los valores más bajos de recarga potencial, llegando a ser incluso inferior al 15% de la precipitación para el año seco. Este comportamiento puede estar asociado a las características edáficas y de uso de la tierra en esta estación, que favorecen la escorrentía sobre la infiltración. Las otras dos estaciones bajo estudio, La Cuchilla y Hacienda El Progreso, localizadas ambas al norte del valle, presentan valores de recarga que representan entre el 16% y el 25% de la precipitación

para el año seco, entre el 17% y el 24% para el año medio y entre el 35% y el 45% de la precipitación para el año húmedo.

De acuerdo con los datos de nivelación piezométrica, se confirma en términos generales la tendencia del flujo subterráneo desde las laderas hacia el centro del Valle, así río Medellín representa una frontera hidráulica que capta el flujo base.

Los valores de conductividad hidráulica obtenidos desde pruebas de infiltración o ensayo en captación permiten diferenciar las zonas en las que esta variable tiene comportamientos más favorables al flujo subterráneo.

Las condiciones de calidad de las aguas subterráneas en el Norte del Valle de Aburrá, reflejan condiciones variables, llamándose la atención en la necesidad de establecer medidas de protección al detectarse la afectación general, no deseable, sobre el recurso.

### **ZONAS DE RECARGA DIRECTA O INDIRECTA AL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO**

Dentro de este estudio se estableció un propuesta metodológica para jerarquizar las zonas de recarga en cinco categorías: i) Zonas de recarga directa, ii) Zonas de recarga indirecta de importancia alta, iii) Zonas de recarga indirecta de importancia media, iii) zonas de recarga indirecta de importancia baja y iv) zonas de recarga indirecta de importancia muy baja.

Dentro del área norte del Valle de Aburrá, son zonas de recarga directa, todas aquellas áreas en las que aflora el acuífero Aburrá Norte y que no ha sido impermeabilizadas en virtud de su actual uso del suelo.

Dentro del área norte del Valle de Aburrá, son zonas de recarga indirecta de importancia alta las zonas asociadas a las Anfibolitas de Medellín sobre la margen izquierda del río Medellín, en el municipio de Copacabana y al occidente de Girardota, y en el municipio de Barbosa desde Esquistos de Cajamarca hacia el nororiente. También los sectores del Batolito antioqueño –vertiente derecha del río- en el municipio de Girardota y al occidente de Barbosa.

Las zonas de recarga indirecta de importancia media se localizan especialmente hacia la margen izquierda del río Medellín: la dunita de Medellín en el municipio de Bello y el Batolito Antioqueño en Girardota y Barbosa entre Anfibolitas de Medellín y esquistos de Cajamarca.

Finalmente como zonas de recarga indirecta de importancia muy baja, en la margen derecha del río la Anfibolita de Medellín en Municipio de Copacabana y occidente de Girardota, y el Batolito Antioqueño en el municipio de Barbosa; y en la margen izquierda el stock de ovejas y los esquistos de las Baldías.

## **FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA SEGÚN ÁREAS DE RECARGA, TRÁNSITO Y DESCARGA**

Las direcciones de flujo hidrogeológico identificadas a partir de la piezometría señalan como áreas fuente de recarga las zonas localizadas en las vertientes del Valle, y se insinúa el río como frontera hidráulica receptora de caudal base.

La caracterización hidrogeoquímica de facies, valida el modelo de flujo al evidenciar la relación existente entre la mineralogía del basamento del sistema hidrogeológico y las características químicas aguas subterráneas dispuestas en las unidades acuíferas.

A partir de un primer monitoreo isotópico se pudo validar el carácter local del flujo y la recarga de agua subterránea hacia la parte baja del Valle de Aburrá, la influencia de lluvias de diferentes orígenes sobre el acuífero y la marcada presencia de flujos locales y regionales.

## **MEDIDAS DE MANEJO Y PROTECCIÓN DEL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO CONSIDERANDO UNIDADES ACUÍFERAS Y ZONAS DE RECARGA**

La exploración bibliográfica en busca de casos exitosos de aplicación de medidas de protección de áreas de recarga de acuíferos en el mundo, mostro una realidad global según la cual en todos los países se promulga y se reclama la protección de los acuíferos y de las zonas de recarga pero en la práctica se han materializado muy pocas iniciativas al respecto.

Teniendo en cuenta el local dentro del cual gran parte de las zonas de recarga directa y de recarga indirecta de importancia alta se localizan en las áreas donde ya existen desarrollos urbanos, industriales y de servicios, centralidades metropolitanas, estructuras viales del orden nacional, departamental y metropolitano, sistema de espacio público metropolitano, entre otros, y que además el río sigue siendo el eje estructurante del desarrollo del área metropolitana, reconocido y promovido de anteriores y actuales políticas de ordenamiento territorial, se estructuro una propuesta de manejo definiendo la aplicación de medidas de tipo normativo, técnicas y administrativas.

Las medidas de tipo normativo incluyen:

Mantenimiento de las categorías existentes o modificación de áreas en la zonificación del POMCA.

Definición de determinantes ambientales para la clasificación del suelo de los planes de ordenamiento territorial.

Articulación de las actividades de protección de las aguas subterráneas con otros planes.

Control y aplicación de los instrumentos normativos y de control de actividades contaminantes.

Control de las densidades de población en las áreas urbanas y rurales y establecimiento de un índice de permeabilidad mínimo correspondiente a valores entre el 30% y el 50% para zonas de recarga directa o indirecta de importancia alta respectivamente.

Se proponen cuatro medidas de carácter administrativo:

- Coordinación y responsabilidad compartida.
- Capacitación interinstitucional y comunitaria para el manejo de las zonas de recarga.
- Seguimiento y monitoreo social.
- Control de captaciones activas y abandonadas.

Finalmente se proponen una serie de medidas de carácter técnico que incluyen:

- Programa de producción sostenible.
- Diseño y ejecución de programas de incentivos.
- Restauración ecológica y protección de los recursos naturales.
- Valoración económica del agua subterránea.
- Recarga artificial del agua subterránea utilizando aguas lluvias.
- Operación de la red de monitoreo.

Investigación para la identificación y definición de técnicas que permitan intervenciones urbanísticas con mayor posibilidad de recarga de los acuíferos.

A partir de una visualización detallada de territorio que se alcanzó mediante la aplicación de métodos de superposición cartográfica, fue posible diferenciar y representar sobre mapas las áreas en las cuales se debe propender por la aplicación de medidas concretas.

Le corresponde ahora al AMVA establecer internamente los mecanismos para materializar las iniciativas propuestas, para ello sin lugar a dudas se requerirá convocar al compromiso y a la acción de los sectores institucional, comunitaria, productiva y comercial que intervienen y habitan en este entorno geográfico.

## 7 GLOSARIO

**ACUÍFEROS:** Estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros o grietas y puede ser aprovechada económicamente por el hombre para suplir sus necesidades.

**ACUÍFERO CONFINADO:** Es un acuífero que se encuentra limitado superior e inferiormente por capas impermeables o por capas con una permeabilidad mucho menor que la del acuífero; estos acuíferos contienen agua subterránea confinada, cuya presión es mayor que la presión atmosférica.

**ACUÍFERO NO CONFINADO:** Es un acuífero que contiene agua subterránea no confinada (agua freática) cuya presión es igual a la presión atmosférica. Se denomina también acuífero freático o acuífero libre.

**AGUA GRAVÍTICA:** Es el agua de la zona no saturada que se mueve bajo la influencia de la gravedad. También se llama agua drenable por gravedad.

**AGUA SUBTERRÁNEA:** Se entiende por aguas subterráneas las que se encuentran por debajo de la superficie del suelo o del fondo marino, o las que brotan en forma natural, como las fuentes y manantiales en el sitio de afloramiento; o las que requieren para su alumbramiento obras como pozos, galerías filtrantes u otras similares.

**ALJIBE O POZO ARTESANO:** Son pozos excavados manualmente, con diámetro grande aproximadamente superior a 0,80 m y poca profundidad, generalmente menor a 20 m.

**BALANCE HÍDRICO:** Comparación entre los volúmenes de agua que entran y salen de un acuífero, así como los cambios en el almacenamiento de agua.

**BASAMENTO:** Masa de rocas formadas por material subyacente o más antiguo muy compactado; nombre por lo general, aplicado a las rocas ígneas o metamórficas que se encuentran debajo de una secuencia sedimentaria.

**CAPACIDAD DE CAMPO:** Es el grado de humedad de un suelo correspondiente a la cantidad de agua que queda retenida en el terreno después de que el agua gravitacional haya sido drenada.

**COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S):** El coeficiente de almacenamiento (S) se define como el volumen de agua que es liberado por un prisma del acuífero de sección unitaria, cuando se produce un cambio unitario del nivel piezométrico.

**COLUMNA ESTRATIGRÁFICA:** Descripción composicional, textural y estructural de la secuencia y los espesores de los estratos de un área dada con su contenido litológico, fosilífero y otra información de relevancia.

**CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K):** Es la aptitud de un medio acuífero para permitir el flujo del agua bajo el efecto de un gradiente hidráulico (diferencia de potencial hidrostático) por unidad de longitud. Para dar una medida mecánica de la permeabilidad se ha definido el

coeficiente de permeabilidad de Darcy (K) que es el volumen de agua gravítica que circula durante una unidad de tiempo, bajo el efecto de una unidad de gradiente hidráulico, a través de una sección de área unitaria perpendicular a la dirección del flujo y a una temperatura de 20 grados centígrados.

**CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA:** Ejercicio de establecer una correspondencia en carácter y posición de los estratos. Para la correlación de las unidades hidrogeológicas se tienen en cuenta características texturales, granulometría, espesores, continuidad y posición relativa en profundidad de las unidades estratigráficas de cada columna.

**DEPÓSITOS ALUVIALES:** Material compuesto por Arcillas, lodos, arenas, gravas, en diferentes proporciones que han sido depositados por una corriente hídrica.

**DEPÓSITOS ALUVIOTORRENCIALES:** Bajo esta denominación se agrupan los depósitos que generan algunas corrientes durante avenidas torrenciales, en las cuales la alta energía del agua permite arrastrar materiales de gran tamaño.

**DEPÓSITOS CONSOLIDADOS:** Depósitos con alto grado de compactación.

**DEPÓSITOS NO CONSOLIDADOS:** Depósitos cuyo grado de compactación es nulo o incipiente.

**DEPÓSITOS DE VERTIENTE:** Depósitos no litificados, se incluyen los de deslizamiento y los flujos de escombros y/o lodos que por su extensión permitan ser cartografiados.

**EXPLORACIÓN HIDROGEOLÓGICA:** Conjunto de estudios, trabajos y operaciones, llevados a cabo tanto por técnicas directas como indirectas, encaminados a la localización de acuíferos, para captación de aguas subterráneas, en cantidad y con calidad adecuadas para el fin pretendido y definición de las condiciones óptimas en que este recurso debe explotarse para asegurar la preservación del mismo.

**GEOFÍSICA:** Conjunto de métodos indirectos de exploración utilizados para evaluar la ocurrencia de las aguas subterráneas en áreas no conocidas, con la ayuda de equipos especializados que permiten determinar características físicas del subsuelo como la resistividad, conductividad, velocidad de desplazamiento de las ondas sísmicas, etc.

**GRADIENTE HIDRÁULICO:** Pérdida de cabeza piezométrica por unidad de longitud. Tal como se enuncia en la ley de Darcy, se requiere de la existencia de un gradiente hidráulico para que haya flujo subterráneo.

**INFILTRACIÓN:** Agua que fluye desde la superficie del suelo hacia el subsuelo, por acción de la gravedad.

**MODELO CONCEPTUAL HIDROLÓGICO:** Es una representación simplificada de algunos o de todos los procesos del ciclo hidrológico a partir de una serie de conceptos hidrológicos y relacionados con una secuencia espacio-temporal que se corresponde con la que se da en la naturaleza. Los modelos conceptuales hidrológicos se utilizan para describir el comportamiento de una cuenca o de un acuífero.



**NIVEL PIEZOMÉTRICO:** Nivel que alcanza el agua subterránea cuando se practica una perforación, al desconfiar un sistema hidrológico el agua asciende hasta desarrollar una columna de agua que ejerza una presión que equilibre el sistema.

**NIVEL FREÁTICO:** Es el nivel de agua subterránea de un acuífero no confinado, dónde la presión igual a la presión atmosférica.

**PERCOLACIÓN:** Proceso por el cual el agua infiltrada alcanza la zona saturada atravesando el nivel freático.

**PIEZÓMETRO:** Obra civil que permite la toman las medidas de niveles estáticos y/o dinámicos durante una prueba de bombeo con el fin de determinar la curva de abatimiento del acuífero y variables hidráulicas de la captación en estudio como el radio de influencia y el coeficiente de almacenamiento. Además sirven para tomar registros periódicos de niveles y la toma de muestras de agua para monitorear la calidad de la misma.

**POROSIDAD PRIMARIA:** Es la porosidad que tiene una roca como consecuencia de los procesos que dan lugar a su formación.

**POROSIDAD SECUNDARIA:** Es la porosidad que se desarrolla en una roca después de que se produzca su emplazamiento por medio de procesos tales como fracturación y disolución.

**POZO:** Excavación o perforación en el terreno que alcanza a las aguas subterráneas. Las perforaciones se designan comúnmente como sondeo.

**PUNTO DE AGUA:** Cualquier obra o circunstancia natural o artificial que permite tener acceso de forma directa al agua subterránea.

**PUNTO DE MARCHITEZ:** Contenido de humedad de un suelo de tal manera que la fuerza de succión de las raíces de las plantas es menor que la fuerza de retención del agua en el suelo, de esta manera el agua no puede ser extraída por las plantas.

**RECARGA:** Proceso mediante el cual se renueva el agua almacenada dentro de una formación hidrogeológica. Este proceso ocurre de forma natural cuando la lluvia se infiltra hacia un acuífero a través del suelo o roca, o el agua de los drenajes superficiales migra hacia ellos.

**RECARGA ARTIFICIAL:** Técnica que consiste en introducir agua en un acuífero para aumentar la disponibilidad de los recursos hídricos y mejorar su calidad.

**RED DE FLUJO:** Sistema de líneas de flujo y de líneas equipotenciales. La diferencia de potencial entre dos líneas equipotenciales adyacentes es constante y la separación entre dos líneas de flujo contiguas es tal que el valor del flujo es el mismo entre cada par.

**SAPROLITO:** Nombre general dado a la roca descompuesta pero no transportada, la mayoría de las veces las estructuras están bien preservadas y frecuentemente cubiertas por un horizonte endurecido. Puede ser sinónimo de suelo residual.

**SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL (SEV):** Tipo de prueba geofísica que apoyándose en las propiedades eléctricas del subsuelo permite interpretar la naturaleza de este.

**TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS:** Prueba geofísica que permiten determinar la variación de la resistividad en secciones de las rocas en el subsuelo y se identifican capas geoeléctricas; la interpretación de las curvas obtenidas en campo con parámetros teóricos y registros de columnas estratigráficas conocidas, permiten determinar el comportamiento de las unidades hidrogeológicas en lugares donde no se cuenta con información detallada.

**TRANSMISIVIDAD HIDRÁULICA (T):** Volumen de agua por unidad de tiempo (o caudal) que pasa a través de una sección vertical de ancho unitario y de altura  $b$ , bajo el efecto de una unidad de gradiente hidráulico y a una temperatura de 20 °C.

**UNIDAD HIDROGEOLÓGICA:** Es un estrato o conjunto de estratos adyacentes susceptibles a reconocerse en su conjunto por poseer propiedades o características hidrogeológicas similares.

**ZONA SATURADA:** Es la zona del terreno en la que todos los intersticios están ocupados por agua.

**ZONA NO SATURADA:** Es la zona que se encuentra entre la superficie del terreno y el nivel freático. Incluye la zona radicular, la zona intermedia y la zona capilar. Los poros de esta zona contienen agua  $q$  y también contienen aire u otros gases. También se la denomina zona de aireación o zona vadosa.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de Barbosa. 2011. Monografía de Barbosa. Barbosa turística. [Artículo en internet]<http://www.barbosaturistica.es.tl/ALQUILER-DE-FINCAS.htm>.
- Alcaldía de Barbosa. 2011. Municipio de Barbosa Institucional. [Artículo en internet] <http://barbosa.areadigital.gov.co/Paginas/inicio.aspx>.
- Alcaldía de Medellín. 2011. Datos Generales del municipio de Medellín. [Artículo en Internet] <http://www.medellin.gov.co/irj/portal/visitantes?NavigationTarget=navurl://ff556ed54f8f4fb94e0c28e0bb15d9c8>.
- Álvarez y Trujillo. 1985. Estudio Geomorfológico y estructural del Valle de Aburrá (Zonas 5 y 6). Tesis de grado. Medellín: Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) (EJECUTÓ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA-SEDE MEDELLÍN). 2008. Actualización del inventario de captaciones de agua subterránea en la zona urbana del Valle de Aburrá, Informe final. Medellín.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), REDRÍOABURRÁ-MEDELLÍN (EJECUTÓ UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN, UNIVERSIDAD NACIONAL). 2011. Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Aburrá en Jurisdicción del Área Metropolitana - Fase III, Convenio 397 de 2009. Medellín: Subdirección Ambiental.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA); SECRETARÍA DE PLANEACIÓN MUNICIPIO DE GIRARDOTA. 2007. Revisión y ajuste del plan de ordenamiento territorial-municipio de Girardota 2007, Girardota: Asesoría Área Metropolitana del Valle de Aburrá. pp. 36, 38, 52
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA); UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. 2001. Relación de pozos con sus características de explotación. En: Inventario de aguas subterráneas en el Valle de Aburrá. Medellín.
- Appelo, C.A.J. y Postma, D. 2005. Geochemistry, Groundwater and Pollution. 2nd ed. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers.
- Arango, I.D. y Montoya, L.F. 1982. Fracturamiento del Batolito Antioqueño y sus relaciones tectónicas e hidroestructurales, Tesis de grado. Medellín: Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). Directrices Metropolitanas de Ordenamiento Territorial para el Valle de Aburrá: Hacia una región de ciudades. Medellín, 2006. 268 p.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). 2007. Estudio de la Microzonificación Sísmica de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado [CD-ROM]. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Área Metropolitana del Valle de Aburrá, (AMVA). 2006 CONSORCIO MICROZONIFICACIÓN. Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Informe final de proyecto de microzonificación, AMVA. Medellín: Edición interna AMVA.

Betancur, T. 2008. Una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero tropical. Caso de estudio: bajo cauca antioqueño, Tesis doctoral. Medellín: Universidad de Antioquia.

Botero A.G. Contribución al Conocimiento de la Geología de la Zona Central de Antioquia. En: Anales de la Facultad de Minas. No. 57 (1963); pp. 1-101

Chow, V.; Maidment, L.; Mays, L. 1999 Hidrología Aplicada. Traducido de la primera edición en inglés: AppliedHydrology. Colombia: McGraw-Hill.

Concejo Municipal de Barbosa, 2000. Plan básico de ordenamiento territorial del Municipio de Barbosa, Acuerdo 019 de 2000. [Artículo en internet]. <http://barbosa.areadigital.gov.co/institucional/Proyectos/POT%20Barbosa.pdf>

Concejo Municipal de Bello, 2009. Plan básico de ordenamiento territorial del Municipio de Bello, Acuerdo 033 de 2009. [Artículo en internet]. <http://cpbello.com/htm/servicios.htm>

Concejo Municipal de Copacabana, 2000. Plan básico de ordenamiento territorial del Municipio de Copacabana, Acuerdo 025 de 2000. [Artículo en internet]. [http://www.copacabana-antioquia.gov.co/apc-aa-files/33633230356230313534323962663765/PBOT\\_COPACABANA.pdf](http://www.copacabana-antioquia.gov.co/apc-aa-files/33633230356230313534323962663765/PBOT_COPACABANA.pdf)

Concejo Municipal de Girardota, 2007. Plan básico de ordenamiento territorial del Municipio de Girardota, Acuerdo 092 de 2007. [Artículo en internet]. <http://girardota.areadigital.gov.co/institucional/Proyectos/POT%20Girardota.pdf>

Correa, A.M. y MARTENS, U. 2000 Caracterización Geológica de las Anfibolitas en los Alrededores de Medellín. Tesis de grado. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.

Custodio, E. y Llamas; M.R. 1996. Hidrología Subterránea. 2da Edición. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.

Dearman, W.R. 1991 Engineering geological mapping. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann Ltd.

Departamento Administrativo de Planeación de Antioquia. 2010. Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín (POT). [Artículos en Internet] <http://www.medellin.gov.co/irj/portal/ciudadanos?NavigationTarget=navurl://8701af2ebf1d8b278bd66f88f2c8c4eb>.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) 2007. Daros de población para el año 2005 y su proyección al 2011 de los municipios del Valle de Aburrá. Censo general 2005.

Empresas Públicas de Medellín (EPM). 2010 Coberturas de Aguas. Medellín.

Empresas Públicas de Medellín (EPM). Coberturas de prestación de servicios. Medellín, 2011.

Escobar, J.F.2011. Plataforma SIG para la modelación de sistemas acuíferos. Medellín.

Feininger, T. y Botero, G.1982. The Antioquian Batholith, Colombia. En: Publicación Especial Geología. Ingeominas, Bogotá. No.12. pp.1-50

Gobernación de Antioquia, 2008. LEA - La Enciclopedia de Antioquia. Valle de Aburrá. [Artículo en internet].  
<http://200.31.16.43/portalleapruebas/DesktopModules/Articulos/DetallesArticulo.aspx?id=1477>.

Grupo de Sismología de Medellín.2002. Microzonificación Sísmica de los Municipios del Valle de Aburrá y Definición de Zonas de Riesgo por Movimientos en Masa e Inundación en el Valle de Aburrá. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Hidrogema; Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA).2001 Inventario de Aguas Subterráneas del Valle de Aburrá. Medellín.

Ingeominas.2011 Mapa geológico de la plancha I-8 de Medellín. [Artículo en Internet]  
<http://productos.ingegominas.gov.co/productos/OFICIAL/georecon/geologia/esc200k/pdf/medellin.pdf>.

Ingeominas.2001 Mapa Geológico del departamento de Antioquia, escala 1:400.000, memoria explicativa. Medellín.

Ingeominas.2005 Mapa Geológico Plancha 147 Medellín Oriental, escala 1:50.000, memoria explicativa. Medellín:

Ingeominas.1983 Geología de la plancha 146. Medellín occidental. Escala 1:100.00.Medellín:

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 2007. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Antioquia. Bogotá:

Integral.1982. Aprovechamiento Múltiple del Río Grande. Estudio Geológico y Evaluación Preliminar del Riesgo Sísmico. Medellín.

Martínez, D. C. (2007). Propuesta de Implementación de Metodologías para la Evaluación Hidrogeoquímica y de Calidad de las Aguas Subterráneas y Aplicación a la Zona del Bajo Cauca Antioqueño. Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia, Antioquia, Medellín.

Martínez, D., Massone, H., Bocanegra, E. y Quiroz, M., 2006. Hidrogeoquímica y flujo subterráneo en la cuenca del río Quequen, provincia de Buenos Aires, Argentina. Congreso Latinoamericano de Hidrogeología. Asunción, Paraguay, Memorias en CD.

Ministerio de la Protección Social Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución número 2115 del 22 de junio de 2007.

Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010. Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico. Bogotá: Ministerio de Ambiente.

Municipio de Bello. 2011. Municipio de Bello. [Artículo en internet]. <http://bello.aredigital.gov.co/institucional/Paginas/institucional.aspx>.

Municipio de Copacabana.- Institucional. Municipio de Copacabana. Copacabana fundadora de pueblos. [Artículo en internet]. <http://Copacabana.aredigital.gov.co>.

Municipio de Copacabana. 2008. Plan de desarrollo municipal “El tiempo de la gente”. [Artículo en internet]. <http://copacabana.gov.co>.

Municipio de Girardota – Institucional. Municipio de Girardota. [Artículo en internet]. <http://girardota.gov.co>.

Patiño, J. y Noreña, J.A. 1984. Estudio de las Rocas Metamórficas en la Parte Sur del Municipio de Caldas, Antioquia. Tesis de grado. Medellín: Facultad de Minas.

Quiroz, J.D. PEC Girardota. 2010-2020. [Artículo en internet]. <http://casaculturagirardota4.blogspot.com>. [2010]

Rendón G., Armando; D., Toro, V., Elena; G., Hermelin, A., Michel. 2006. Modelo Cronoestratigráfico para el emplazamiento de los depósitos de vertiente en el Valle de Aburrá. En: Boletín de Ciencias de la Tierra. No. 18 (jul. 2006); p. 103-118

Restrepo et al. 2008. Ar-Ar ages of amphibolites from the Central Cordillera of Colombia and their implications for tectonostratigraphic terrane evolution in the northwestern Andes. Argentina: VI South American Symposium on Isotope Geology, 2008. En prensa

Sánchez, F.J. 2004 Hidroquímica - Conceptos fundamentales. Salamanca (España): Universidad de Salamanca, Depto de Geología.

Saxton, K.E. y RAWLS, W.J. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. En: Soil Science Society of America Journal Vol. 70, No. 5 (Ago. 2006); pp. 1569-1578.

Sierra y Zapata. 1989. Petrografía de las rocas metamórficas situadas al suroeste del municipio de Barbosa – Antioquia, Tesis de Grado. Medellín: Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Subdirección Ambiental. 2008. Actualización de inventario de captaciones de agua subterránea en la zona urbana del valle de Aburrá: Informe final. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas.



Unión Temporal Universidad de Antioquia-Integral-AMVA. 2002. Estudio de zonas de recarga y acuíferos del Valle de Aburrá. Medellín.

Universidad Nacional de Colombia. 2008. Base de datos del proyecto “Actualización del Inventario de Captaciones de Aguas Subterráneas del Valle de Aburrá. En: Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Medellín.

Universidad Nacional, 2008. Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del río Aburrá – POMCA. Medellín

USGS, LANDSAT ETM

, Escenas: p009r056\_7x20000821, Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland. [En línea]. ESDI: 2011.

Visto Bueno Asesores Ltda. 2000. Capítulo I; diagnóstico síntesis – Municipio de Barbosa. En: Municipio de Barbosa Antioquia; Plan Básico de Ordenamiento Territorial (1999-2009). Medellín: CORANTIOQUIA, 2000. pp. 20-29; 34-35; 55-56; 93-94.

Visto Bueno Asesores Ltda.2000. Municipio de Barbosa – Antioquia, Plan Básico de Ordenamiento Territorial 1999-2012, Diagnóstico P.B.O.T. Medellín, 2000. 444 p.

Visto Bueno Asesores Ltda. 2000. Municipio de Copacabana – Antioquia: Diagnóstico para el Plan de Ordenamiento Territorial “Un enlace con el nuevo milenio”, 1999-2012. Volumen I. Copacabana, pp.39, 45, 76, 86.