

TABLA DE CONTENIDO

2. SUBSISTEMA ABIÓTICO - RECURSO AGUA	2-1
2.1 INTRODUCCIÓN	2-1
2.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	2-3
2.3 HIDROLOGÍA	2-5
2.3.1 Modelo de Elevación Digital	2-5
2.3.2 Información disponible	2-5
2.3.3 Precipitación media multianual	2-9
2.3.4 Temperatura media	2-9
2.3.5 Evaporación media	2-11
2.3.6 Caudales medios	2-12
2.3.7 Caudales máximos	2-17
2.3.8 Caudales mínimos	2-22
2.4 OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA	2-23
2.4.1 Información disponible	2-24
2.4.2 Estimación de la población	2-27
2.4.3 Proyección de la población	2-33
2.4.4 Cálculo de la demanda de agua potable	2-36
2.4.5 Disponibilidad de agua potable en la Cuenca	2-38
2.4.6 Acueductos comunitarios	2-40
2.4.7 Análisis de caudales mínimos: cuencas externas abastecedoras del recurso hídrico.	2-51
2.4.8 Disponibilidad hídrica en la zona rural	2-59
2.4.9 Módulo de disponibilidad hídrica	2-64
2.4.10 Situación actual de la disponibilidad de agua en la Cuenca: índice de escasez	2-64
2.4.11 Situación actual de la demanda abastecida por agua de la Cuenca en la zona rural	2-67
2.4.12 Problemáticas identificadas	2-76
2.5 HIDRÁULICA	2-78

2.5.1	Información utilizada	2-78
2.5.2	Zona de Estudio	2-82
2.5.3	Características generales	2-83
2.5.4	Modelación hidráulica	2-85
2.5.5	Ocurrencia de eventos de Inundación en la Cuenca	2-88
2.5.6	Problemáticas identificadas	2-96
2.6	CALIDAD DEL AGUA	2-97
2.6.1	Información disponible	2-98
2.6.2	Registros históricos	2-104
2.6.3	Metodología	2-111
2.6.4	Estimación de caudales de aguas residuales	2-113
2.6.5	Estimación de caudales de aguas residuales industriales	2-116
2.6.6	Análisis de resultados y discusión	2-133
2.6.7	Selección del índice para análisis de la evolución de la calidad del agua:río Aburrá	2-139
2.6.8	Problemáticas identificadas	2-142
2.7	CONCLUSIONES	2-143
2.8	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	2-148

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Afluentes al río Aburrá que cuentan con algún estudio detallado.....	2-4
Figura 2.2.	MDT corregido y red de drenaje utilizados en el procesamiento.....	2-6
Figura 2.3.	Mapa de precipitación media anual (mm/año) para la zona de estudio.....	2-10
Figura 2.4.	Mapa de temperatura media (°C) para la zona de estudio.....	2-11
Figura 2.5.	Mapa de evaporación real media (mm/año) para la zona de estudio.....	2-13
Figura 2.6.	Esquema del balance hidrológico sobre una cuenca.....	2-14
Figura 2.7.	Caudales medios (m ³ /s) estimados en algunas estaciones del corredor fluvial.....	2-17
Figura 2.8.	Caudales máximos (m ³ /s) asociados a diferentes períodos de retorno con la metodología de análisis de frecuencia.....	2-20
Figura 2.9.	Caudales máximos (m ³ /s) para diferentes períodos de retorno estimados con regionalización de características medias.....	2-21
Figura 2.10.	Caudales mínimos (m ³ /s) para diferentes períodos de retorno estimados con el método regionalización de características medias.....	2-23
Figura 2.11.	Proyección de la población total de la cuenca del río Aburrá.....	2-29
Figura 2.12.	Variables del modelo de dinámica poblacional.....	2-30
Figura 2.13.	Proyección para la población total y rural de la Cuenca: dinámica poblacional.....	2-35
Figura 2.14.	Comparación de la metodología de Dinámica Poblacional con otros métodos para las proyecciones en la Cuenca del río Aburrá.....	2-35
Figura 2.15.	Dotaciones históricas estimadas: base consumos totales sistema de acueducto..	2-37
Figura 2.16.	Proyección de la demanda de agua: habitantes de la Cuenca del río Aburrá.....	2-38
Figura 2.17.	Ubicación de las plantas de tratamiento de aguas en la Cuenca del río Aburrá....	2-39
Figura 2.18.	Cuencas externas que abastecen la Cuenca del río Aburrá.....	2-41
Figura 2.19.	Ubicación de los acueductos comunitarios en la Cuenca del río Aburrá.....	2-44
Figura 2.20.	Ubicación de los acueductos comunitarios por zonas. (a) Zona Norte, (b) Zona Centro y (c) Zona Sur.....	2-46
Figura 2.21.	Ubicación de las cuencas externas abastecedoras del recurso hídrico.....	2-51
Figura 2.22.	Curva de calibración estación Las Palmas.....	2-54
Figura 2.23.	Curva de duración estación Las Palmas.....	2-55
Figura 2.24.	Serie de caudal medio multianual que drena al embalse La Fe.....	2-57
Figura 2.25.	Serie de caudal medio multianual que drena al embalse río Grande.....	2-58

Figura 2.26.	Curva de masa residual en estado lleno y vacío del embalse La Fe	2-58
Figura 2.27.	Curva de masa residual en estado lleno y vacío del embalse río Grande	2-59
Figura 2.28.	Metodología usada en la evaluación de disponibilidad hídrica en la zona rural.....	2-60
Figura 2.29.	Polígonos de zona urbana en el Valle de Aburrá.....	2-61
Figura 2.32.	Índice de Escasez, Año 2025.....	2-75
Figura 2.33.	Secciones transversales verificadas en campo, Km 53+510 y Km 53+593. Sector vereda El Ancón.....	2-80
Figura 2.34.	Secciones transversales verificadas en campo, Km 53+778 y Km 53+989. Sector vereda El Ancón.....	2-81
Figura 2.35.	Secciones transversales verificadas en campo, Km 58+531 y Km 58+564. Sector acceso a Girardota.....	2-82
Figura 2.36.	Esquema del modelo implementado	2-83
Figura 2.37.	Perfil altimétrico del tramo de estudio	2-85
Figura 2.38.	Zonas críticas por eventos de inundación: Cuenca del río de Aburrá.....	2-95
Figura 2.39.	Estaciones de medición consolidadas a lo largo del río Aburrá y subcuencas monitoreadas en el período 1982 – 2005.....	2-105
Figura 2.40.	(a) Distribución espacial de vertimientos domésticos e industriales. (b) Obras de infraestructura para recolección, transporte y disposición de aguas residuales ...	2-108
Figura 2.41.	Localización espacial de puntos de estratégicos	2-112
Figura 2.42.	Cambios en los perfiles promedio de OD a lo largo del río Aburrá.....	2-118
Figura 2.43.	Cambios en los perfiles promedio de DBO ₅ a lo largo del río Aburrá	2-120
Figura 2.44.	Cambios en los perfiles promedio de DQO a lo largo del río Aburrá	2-121
Figura 2.45.	Concentraciones promedio oxígeno disuelto: años 1982 y 2005	2-122
Figura 2.46.	Concentraciones promedio de demanda bioquímica de oxígeno evaluadas en los años 1982 y 2005.....	2-122
Figura 2.47.	Concentraciones promedio de demanda química de oxígeno evaluadas en los años 1982 y 2005	2-123
Figura 2.48.	Concentraciones promedio de Sólidos suspendidos de oxígeno evaluadas en los años 1982 y 2005.....	2-123
Figura 2.49.	Variabilidad espacial del índice de Calidad ICA RED RÍO: río Aburrá.....	2-127
Figura 2.50.	Mapas de la distribución espacial del índice ICA RED RÍO	2-129
Figura 2.51.	Variación espacial y temporal del índice BMWP'	2-132
Figura 2.52.	Mapas de la distribución espacial del índice BMWP'.....	2-135
Figura 2.53.	Indicadores de la calidad general del agua del río Aburrá	2-136
Figura 2.54.	Objetivos para las variables OD, DBO y SST vs. Línea base Fase I.....	2-139

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1.	Estaciones de precipitación disponibles en la Cuenca	2-6
Tabla 2.2.	Estaciones de caudal disponibles en la Cuenca	2-8
Tabla 2.3.	Reporte morfológico de las subcuencas definidas a partir de las estaciones de caudal a partir de HidroSig	2-14
Tabla 2.4.	Caudales medios (m ³ /s) reales y estimados en las estaciones de caudal	2-16
Tabla 2.5.	Caudales máximos (m ³ /s) estimados por análisis de frecuencia en las estaciones con períodos de registro superiores a 15 años.....	2-19
Tabla 2.6.	Caudales máximos (m ³ /s) estimados por el método de regionalización de las características medias.....	2-21
Tabla 2.7.	Caudales mínimos (m ³ /s) con la metodología de regionalización	2-22
Tabla 2.8.	Población de los municipios de la Cuenca.....	2-24
Tabla 2.9.	Nacimientos, Defunciones e Inmigraciones en la Cuenca, año 2005	2-25
Tabla 2.10.	Revisión de expedientes Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Corantioquia .	2-26
Tabla 2.11.	Datos iniciales del modelo para la población total de la Cuenca	2-27
Tabla 2.12.	Datos iniciales del modelo para la población rural de la Cuenca	2-28
Tabla 2.13.	Población para municipios usando densidad de población rural.....	2-28
Tabla 2.14.	Tasas de crecimiento para la población total de la Cuenca.....	2-32
Tabla 2.15.	Tasas de crecimiento para la población rural de la Cuenca	2-33
Tabla 2.16.	Población total de la Cuenca del río Aburrá, estimada mediante el método de dinámica poblacional hasta el año 2025	2-33
Tabla 2.17.	Población rural de la Cuenca del río Aburrá, estimada mediante el método de dinámica poblacional hasta el año 2025	2-34
Tabla 2.18.	Dotación neta asumida para el cálculo de la demanda de agua.....	2-36
Tabla 2.19.	Proyección de demanda de agua potable para la Cuenca del río Aburrá	2-37
Tabla 2.20.	Plantas de tratamiento que usan agua del interior de la Cuenca	2-39
Tabla 2.21.	Plantas de Tratamiento que usan agua de cuencas externas	2-40
Tabla 2.22.	Fuentes de información para el inventario de acueductos comunitarios	2-42
Tabla 2.23.	Número de acueductos comunitarios por municipio.....	2-44
Tabla 2.24.	Caracterización de los acueductos de la Cuenca, según el número de usuarios..	2-45
Tabla 2.25.	Dotación de agua para usuarios de los diferentes sistemas por municipio	2-45

Tabla 2.26.	Porcentaje de usuarios que reciben agua tratada, por municipio	2-47
Tabla 2.27.	Estaciones de caudal utilizadas para la calibración del modelo.....	2-53
Tabla 2.28.	Estaciones de precipitación utilizadas para la calibración del modelo	2-53
Tabla 2.29.	Condiciones iniciales para la calibración del modelo de tanques	2-53
Tabla 2.30.	Parámetros de calibración del modelo de tanques.....	2-54
Tabla 2.31.	Estaciones de precipitación utilizadas para simular caudales	2-55
Tabla 2.32.	Oferta hídrica para la zona rural de la Cuenca.....	2-61
Tabla 2.33.	Demanda hídrica proyectada para la zona rural de la Cuenca	2-62
Tabla 2.34.	Disponibilidad proyectada para la zona rural de la Cuenca	2-63
Tabla 2.35.	Categorización índice de escasez	2-65
Tabla 2.36.	Cálculo de la demanda aguas arriba de Ancón Sur	2-66
Tabla 2.37.	Cálculo de la demanda aguas arriba de Ancón Norte	2-66
Tabla 2.38.	Cálculo de la demanda aguas arriba de la salida de la Cuenca	2-66
Tabla 2.39.	Cálculo de la oferta hídrica.....	2-67
Tabla 2.40.	Resultados índice de escasez	2-67
Tabla 2.41.	Captaciones por encima de la cota de servicios de EEPPM	2-68
Tabla 2.42.	Índice de escasez en la zona rural por subcuencas para el año 2025	2-68
Tabla 2.43.	Estaciones de aforo Red Río Fase I	2-81
Tabla 2.44.	Características generales del tramo de estudio	2-84
Tabla 2.45.	Características generales de los tramos de estudio	2-84
Tabla 2.46.	Caudales máximos estimados en los sitios de aforo según regionalización de características medias (m ³ /s)	2-87
Tabla 2.47.	Niveles observados y encontrados	2-87
Tabla 2.48.	Características hidráulicas de las secciones.....	2-88
Tabla 2.49.	Intervalos que evalúan la amenaza	2-90
Tabla 2.50.	Corrientes que han presentado problemas de inundación.....	2-90
Tabla 2.51.	Número de muertos y afectados en las quebradas de acuerdo al inventario de desastres más críticos.....	2-93
Tabla 2.52.	Sitios críticos por inundación en el río Aburrá.....	2-94
Tabla 2.53.	Correlación entre el comportamiento hidráulico para un Tr = 100 años en sitios críticos de inundación.....	2-95
Tabla 2.54.	Población para las comunas y los corregimientos de Medellín año 2005	2-99
Tabla 2.55.	Estaciones de muestreo del año 1972.....	2-100
Tabla 2.56.	Estaciones de muestreo del año 1981.....	2-101

Tabla 2.57.	Estaciones de muestreo.....	2-102
Tabla 2.58.	Estaciones medición de aforo.....	2-103
Tabla 2.59.	Estaciones sobre río Aburrá.....	2-104
Tabla 2.60.	Consolidación de estaciones de muestreo definidas en diferentes estudios sobre el río Aburrá.....	2-106
Tabla 2.61.	Variables fisicoquímicas y biológicas.....	2-107
Tabla 2.62.	Localización espacial de puntos estratégicos.....	2-112
Tabla 2.63.	Población urbana estimada para el 2005 que descarga al río Aburrá.....	2-114
Tabla 2.64.	Consumos estimados de agua potable en la zona urbana de la Cuenca.....	2-114
Tabla 2.65.	Caudales medios diarios: aguas residuales domésticas para la población urbana.....	2-116
Tabla 2.66.	Caudales de vertimientos industriales.....	2-117
Tabla 2.67.	Caudales de aguas residuales totales.....	2-117
Tabla 2.68.	Categorías para el índice ICA en el río Aburrá. Fuente: Red Río Fase I.....	2-125
Tabla 2.69.	Información empleada en la agregación del índice ICA _{RED RÍO}	2-126
Tabla 2.70.	Categorías para el índice BMWP'.....	2-130
Tabla 2.71.	Puntajes para familias de macroinvertebrados.....	2-131
Tabla 2.72.	Índice BMWP estimado para diferentes años a lo largo del río Aburrá.....	2-132
Tabla 2.73.	Objetivos de calidad de agua definidos por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá para el periodo 2006 - 2016.....	2-137



2. SUBSISTEMA ABIÓTICO - RECURSO AGUA

2.1 INTRODUCCIÓN

En el nuevo marco jurídico e institucional, los entes responsables de la gestión integral de los recursos naturales deberán encontrar e implementar estrategias, metodologías y herramientas adecuadas que les permitan afrontar estas nuevas responsabilidades. Para ello una primera aproximación al conocimiento del comportamiento general de los elementos bióticos y abióticos que componen la cuenca es de vital importancia.

Por disposiciones de la Ley 99 de 1993, es función de las Corporaciones Autónomas Regionales, CAR, la administración del medio ambiente y los recursos naturales renovables, y el establecimiento de medidas, programas y proyectos para su desarrollo sostenible atendiendo las disposiciones del Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MAVDT. Dentro de sus funciones están participar con los demás organismos y entes competentes de su jurisdicción, en el proceso de planificación y ordenamiento territorial, y otorgar concesiones, permisos, autorizaciones y licencias ambientales para el aprovechamiento o movilización de los recursos naturales renovables, o para el desarrollo de actividades que puedan modificar o afectar el medio ambiente.

Dentro de un marco regional el agua desempeña un papel vital en el desarrollo social, económico y ambiental de una urbe. En el caso particular del Valle de Aburrá, el río, que lleva su mismo nombre, representa el eje de desarrollo de la ciudad y los municipios que se encuentran a sus costados. En su vecindad se encuentran asentados predios dedicados a la vivienda, industria, el comercio, la academia, la movilidad y al esparcimiento público.

Dentro de los aspectos analizados la contaminación es un aspecto de vital importancia que gracias a la urbanización del Valle, ha cambiado drásticamente las condiciones del río. Los primeros efectos de la contaminación se hicieron sentir en las quebradas afluentes.

El municipio de Medellín empezó descargando sus aguas residuales a la quebrada Santa Elena; Envigado a la quebrada La Ayurá; Caldas a la quebrada La Valeria e Itagüí a la quebrada Doña María. Las primeras descargas se hicieron por medio de alcantarillados

individuales y a medida que la población fue creciendo los desagües se fueron organizando para que descargaran por medio de diques y alcantarillados existentes que desembocaban finalmente al río Aburrá.

Según las Empresas Públicas de Medellín, EEPPM, los registros de estas condiciones desde comienzos del siglo XIX, muestran que los contaminantes han aumentado considerablemente con las descargas de aguas residuales de las zonas industriales y comerciales. Inicialmente la situación era tolerable para el ecosistema acuático del río Aburrá y mantuvo las condiciones aeróbicas por mucho tiempo, luego el río ya no pudo asimilar la alta carga de contaminantes producida por el elevado crecimiento demográfico e industrial de la región; la demanda de oxígeno superó la producción de éste en el cuerpo de agua, favoreciendo las condiciones anóxicas en el sistema, lo que produjo el deterioro y posterior muerte del ambiente acuático. Se puede decir que la década de los años cincuenta fue crucial para el río Aburrá, respecto a la contaminación (EEPPM, 1981).

Respecto a la caracterización hidrológica de la Cuenca, se estudió información de variables hidroclimatológicas como: precipitación, caudal, temperatura, evaporación, y de variables morfológicas obtenidas a partir del modelo de elevación del terreno. La principal fuente de información se obtuvo del proyecto Red Río Fase I, elaborado por la Universidad de Antioquia, Udea; Universidad Pontificia Bolivariana, UPB; Universidad de Medellín, y Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Unalmed; contratado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Área Metropolitana, en el año 2005; y de la segunda fase del mismo (En proceso). Se realizó el cálculo de los campos distribuidos de precipitación y evaporación, y con estos se calcularon los caudales medios y extremos en la Cuenca. Como resultado extra de este estudio se presenta una revisión crítica a modelos hidrológicos e hidráulicos desde el punto de vista de aplicabilidad de los mismos a cuencas urbanas (Anexo A 2.1).

El análisis de disponibilidad de agua en la Cuenca del río Aburrá se realizó a partir de la cota máxima de distribución de agua potable de EEPPM. Debido a que la Cuenca de estudio se alimenta con agua importada de otras cuencas, fue necesario evaluar si la zona rural presenta condiciones de déficit, ya que EEPPM abastece con agua potable la zona urbana. Se presenta entonces la demanda de agua potable para los municipios que conforman la zona de estudio, a partir de la población asentada y de la asignación de una dotación media (l/hab/día).

Del aspecto hidráulico se encontró que pocas microcuencas de la Cuenca del río Aburrá tienen un estudio detallado que describa el estado de los cauces y afluentes. Para realizar la caracterización hidráulica de la zona, se analizaron los estudios realizados en algunas de las corrientes (Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas, PIOM , Estudios de Reglamentación, Actualizaciones de Red Hídrica, entre otros) y a

partir de información secundaria de secciones topográficas del cauce, se generó un modelo hidráulico sobre el eje principal del río Aburrá, con el cual se determinaron niveles de inundación para el corredor del río desde Ancón Sur hasta la el municipio de Girardota.

Acerca de la calidad de las aguas superficiales de la Cuenca, con información secundaria, proveniente de estudios previos (EPPM, Instituto Mi Río, la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia), la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas ríos Negro y Nare (Cornare), el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, la Universidad de Antioquia, la Universidad de Medellín y la Universidad Pontificia Bolivariana en los años 1972, 1997, 2001, 2003 y 2006 se analizaron algunas variables fisicoquímicas y biológicas, y se evaluaron los índices de calidad de aguas (ICA) y Biological Monitoring Working Party (BMWP’).

En el desarrollo de este capítulo se siguieron las siguientes etapas: Recolección de información, construcción del modelo de elevación digital, estudio hidrológico, cálculo de la demanda, análisis de la disponibilidad de agua en la Cuenca, análisis hidráulico y definición de la calidad del agua. A continuación se describe la metodología usada en el desarrollo del diagnóstico.

2.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Al inicio de cada subcomponente del recurso agua se hace una breve descripción de la información recolectada. Es importante resaltar la existencia de estudios detallados (en escala menor al POMCA) en algunas de las quebradas afluentes al río Aburrá. La Figura 2.1 permite identificar las corrientes que hasta la fecha cuentan con algún estudio detallado con información digital (mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: “1LB”, objeto: “AG_Microcuenca”).

Se cuenta con diferentes tipos de estudios: planes de ordenamiento y manejo de microcuencas (PIOM), en los cuales se encuentra una caracterización físico-biótica completa de las microcuencas; estudios de reglamentación que contienen información detallada de la hidrología, oferta y demanda hídrica y en algunos casos análisis de la calidad del agua, y estudios de actualización de red hídrica en los que se hace una caracterización hidráulica de la red, detallando el número y tipo de estructuras hidráulicas existentes.

La información de estos estudios fue básica para la definición de las problemáticas específicas de la Cuenca del río Aburrá, dado que analizando las condiciones actuales y los cambios de las condiciones ambientales identificados en cada microcuenca, y

teniendo en cuenta que son algunas de las de mayor relevancia desde el punto de vista hídrico y ambiental, condicionan el estado general del río Aburrá.

Se encontró que existe información no digital de algunas cuencas tales como el plan de manejo y algunos de ordenamiento de la quebrada La Tablaza en Itagüí (1997), Los Aguacates en Copacabana (1997), La Sabanetica en Sabaneta (1997), La Hueso en Medellín (1997), La Ayurá en Envigado (1996), La Honda en Sabaneta (2001), La Clara y La Sucia en Medellín (2003), La Bermejala en La Estrella (2004). Además se encontró información sobre las actualizaciones de las redes hídricas de la zona nor-oriental (comunas 1, 2, 3 y 4) y sur-oriental (comunas 10 y 14) de Medellín y la reglamentación de la quebrada Las Palmas y sus afluentes (2000).

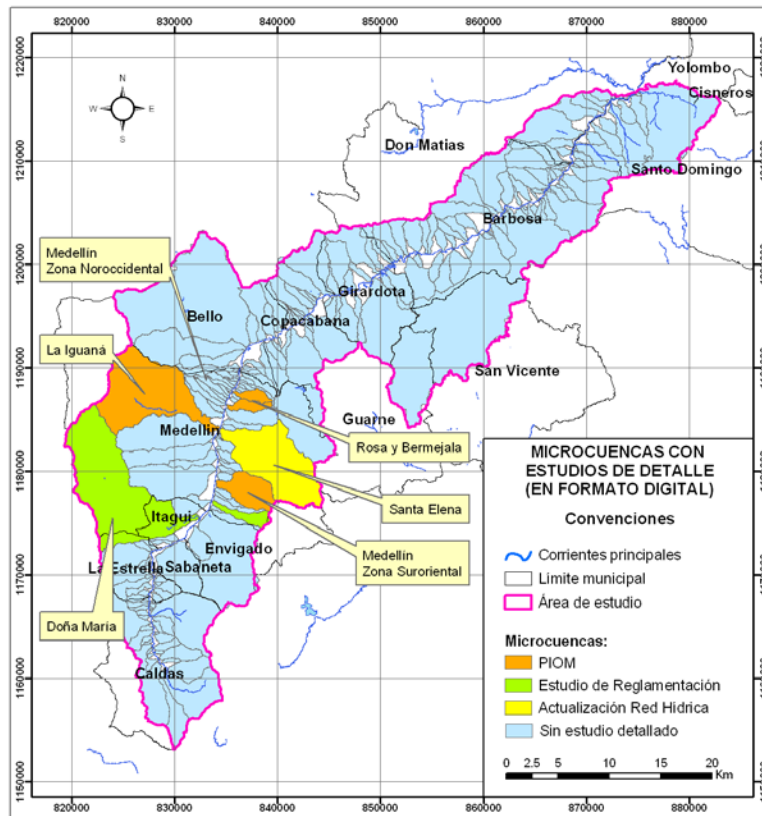


Figura 2.1. Afluentes al río Aburrá que cuentan con algún estudio detallado

Cabe mencionar que actualmente se esta haciendo por parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá la formulación del Plan de Ordenación y Manejo de las microcuencas de las quebradas La Valeria en Caldas, La López en Barbosa, La Volcana y la Santa Elena en Medellín, Piedras Blancas en Copacabana, El Salado en Girardota, La García y El Hato en Bello, La Doctora en Sabaneta, La Grande en La Estrella y Doña María en Itagüí.

A noviembre de 2006 que fue hecha la revisión de información secundaria se encontró que también existen algunos trabajos que están en proceso de entrega, tales como los planes de manejo y ordenamiento de las microcuencas La Quintana, La Malpaso, La Cangreja y La India, La Altavista, la actualización de la red hídrica de la zona sur occidental de Medellín, entre otras.

Una vez analizada la información disponible, se calcularon las diferentes variables que permitieron obtener una caracterización hidrológica e hidráulica de la Cuenca, así como una cuantificación de la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en la misma.

2.3 HIDROLOGÍA

2.3.1 Modelo de Elevación Digital

Con el fin de realizar un estudio hidrológico de la zona se realizó en primer lugar el modelo de elevación digital (MDT). Se utilizó información cartográfica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) a escala 1:25,000 suministrada por Corantioquia, con curvas de nivel cada 50 m para elaborar el modelo de elevación digital con celdas cuadradas de 30 x 30 m, necesario para la modelación hidráulica, valoración físico-espacial y elaboración de los mapas de variables hidrometeorológicas de forma distribuida en una Cuenca.

El MDT, debió ser corregido de tal forma que la dirección del flujo en cada una de las celdas represente adecuadamente la red de drenaje ya consolidada. Mediante el software HidroSIG y con la red de drenaje definida en el proyecto Red Río Fase I (UdeA, et al. 2005) se corrigió dicho MDT. Una vez corregido (ver Figura 2.2, mapa disponible en la base de datos espacial: directorio "1LB", objeto geográfico: "su_mde") pudo usarse para la extracción automática de la red de drenaje, definir la divisoria de una cuenca en cualquier punto de la red y los parámetros geomorfológicos asociados a dicha cuenca.

2.3.2 Información disponible

La principal fuente de información hidrológica fue el estudio Red Río Fase I (UdeA, et al, 2005) y Red Río Fase II (en proceso). Se contó con el registro de algunas estaciones hidroclimatológicas ubicadas en la Cuenca, algunas administradas por EEPPM y otras por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). La localización de las estaciones de EEPPM se corroboró utilizando la información disponible en la Revista Hidrometeorológica (EEPPM, 2005). En el caso de la información del IDEAM se utilizó el catálogo de estaciones que puede ser descargado desde la WEB a

través de la siguiente página <http://intranet.ideam.gov.co/Redes/Catalogoe.htm>. A todas las estaciones, en el estudio antes mencionado, se les realizaron análisis de independencia y homogeneidad (Unalmed, 2003), estos resultados se presentan en el Anexo A2.2. En la Tabla 2.1 se presentan las características de las estaciones de precipitación utilizadas y en la Tabla 2.2 las estaciones de caudal. Se hizo una caracterización de los campos de lluvia, considerando el efecto del ENSO y se presentan las variaciones estacionarias de la precipitación en el Valle de Aburrá (Anexo A2.3), lo cual es importante en el análisis de eventos extremos (caudales máximos y mínimos).

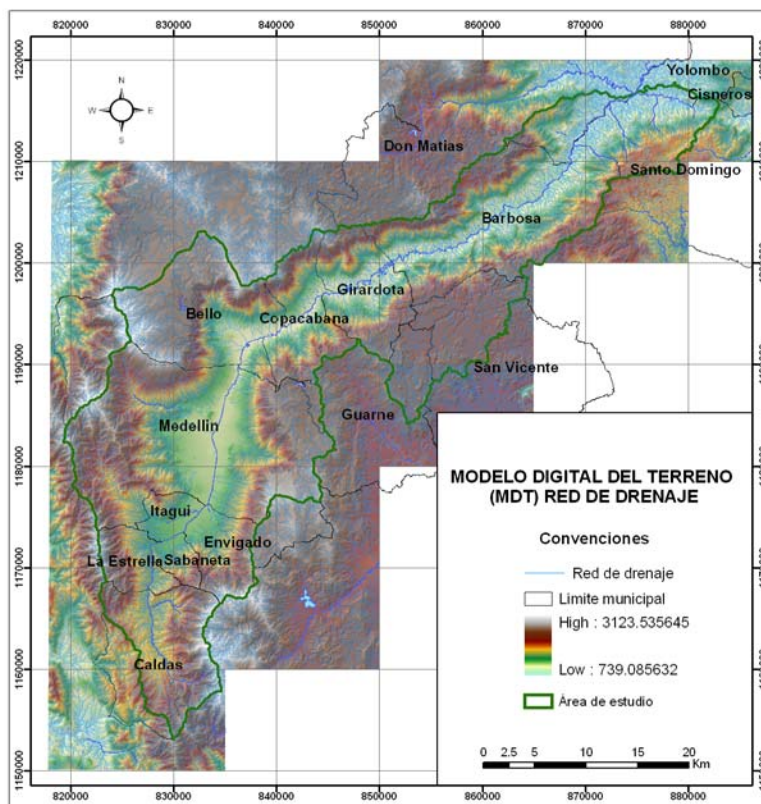


Figura 2.2. MDT corregido y red de drenaje utilizados en el procesamiento

Tabla 2.1. Estaciones de precipitación disponibles en la Cuenca

CÓDIGO	TIPO	NOMBRE	CORRIENTE	MUNICIPIO	Y (m)	X (m)	RESOLUCIÓN TEMPORAL	PERIODO	AÑOS
2308021	PG	Fe_la	Nare	Retiro	1,166,060	843,500	Diaria	1948 - 1998	51
2308022	PG	Severa_la	Negro	Guarne	1,184,120	847,700	Diaria	1948 - 1998	51
2308023	PG	Palmas_las	Negro	Retiro	1,172,290	838,550	Diaria	1948 - 2004	57
2308024	PG	Vasconia	Negro	Rionegro	1,178,000	844,895	Diaria	1948 - 1998	51

CÓDIGO	TIPO	NOMBRE	CORRIENTE	MUNICIPIO	Y (m)	X (m)	RESOLUCIÓN TEMPORAL	PERIODO	AÑOS
2308026	PG	Mosca_la	Negro	Guarne	1,189,300	847,000	Diaria	1949 - 1999	51
2308027	PG	La_macaren	Negro	Rionegro	1,172,820	859,040	Diaria	1950 - 1998	49
2308034	PG	Rioabajo	Nare	Sn_vicente	1,181,920	863,540	Diaria	1950 - 1999	50
2618009	PG	Buey_el	Buey	Abejorral	1,145,820	848,000	Diaria	1959 - 1998	40
2701034	PG	Mazo	Piedras_bl	Medellín	1,184,200	841,940	Diaria	1970 - 2003	34
2701035	PG	Chorrillos	Piedras_bl	Medellín	1,188,220	842,280	Diaria	1948 - 1998	51
2701036	PG	Caldas	Medellín	Caldas	1,160,510	828,568	Diaria	1949 - 1999	51
2701037	PG	Fabricato	Medellín	Bello	1,195,470	831,500	Diaria	1949 - 2003	55
2701038	PG	Sn_antonio	Medellín	Medellín	1,175,253	824,640	Diaria	1949 - 2003	55
2701045	PG	Villa.h_plan	Medellín	Medellín	1,183,990	837,340	Diaria	1948 - 1998	51
2701046	PG	San_cristo	Medellín	Medellín	1,186,530	827,560	Diaria	1949 - 2003	55
2701047	PG	Miguel_ag	Medellín	Medellín	1,184,470	834,980	Diaria	1970 - 2003	34
2701051	PG	Boton_el	Grande	Sta_rosa	1,228,850	835,308	Diaria	1959 - 2000	42
2701056	PM	Girardota	Medellín	Girardota	1,197,760	847,680	Diaria	1970 - 2003	34
2701057	PM	Barbosa	Medellín	Barbosa	1,204,180	861,540	Diaria	1970 - 2003	34
2701062	PM	Boqueron	Medellín	Medellín	1,191,950	826,270	Diaria	1970 - 1992	23
2701065	PM	Don_matias	Grande	Don_matias	1,208,480	854,680	Diaria	1959 - 1998	40
2701066	PG	Gabino	Porce	Sto_domin	1,216,360	875,150	Diaria	1959 - 2000	42
2701076	PG	Niquia	Medellín	Bello	1,196,780	838,960	Diaria	1984 - 2003	20
2701078	PM	Boqueron	Medellín	Medellín	1,193,905	822,677	Diaria	1970 - 1990	21
2701080	PM	Mta sn_ped.	Medellín	Bello	1,199,414	830,073	Diaria	1970 - 2004	35
2701081	PM	Sta_helena	Medellín	Medellín	1,179,096	842,929	Diaria	1970 - 2003	34
2701082	PM	Cuchilla_la	Medellín	Girardota	1,195,679	846,663	Diaria	1970 - 2003	34
2701093	PG	Ayura	Medellín	Envigado	1,173,830	835,380	Diaria	1972 - 2004	33
2701106	PG	Pta_manant	Medellín	Bello	1,190,290	838,360	Diaria	1986 - 2003	18
2701111	PG	Astilleros	Dona_ma	Medellín	1,184,669	828,184	Diaria	1991 - 2003	13
2701112	PG	Iguana_la	La_iguana	Medellín	1,192,050	826,361	Diaria	1990 - 2003	14
2701114	PG	Cucaracho	La_iguana	Medellín	1,186,920	830,566	Diaria	1992 - 2003	12
2701115	PG	Astillero	Dona_ma	V_del_fuer	1,183,962	823,149	Diaria	1990 - 2003	14
2701122	PG	Convento	Piedras_bl	Copacaba	1,192,002	842,964	Diaria	1995 - 2003	9
2701507	SP	Aptoolayah	Medellín	Medellín	1,179,127	831,858	Diaria	1969 - 2004	36
2701509	CP	Tulio_ospin	Medellín	Bello	1,190,941	836,529	Diaria	1969 - 2003	35
2701512	CO	Piedras_bla	Medellín	Medellín	1,188,314	842,954	Diaria	1970 - 1981	12
2701515	CO	El progre	Medellín	Barbosa	1,201,841	858,570	Diaria	1973 - 2003	31
2701526	AM	Salada_la	Medellín	Caldas	1,160,694	829,960	Diaria	1984 - 2004	21
2620012	PM	Otramina	Amaga	Titiribi	1,164,443	809,667	Mensual	1970 - 2003	34
2620507	CP	Plata_la	Sinifana	Venecia	1,153,385	807,786	Mensual	1982 - 1985	4
2623018	PM	Llanos_sn_j	La_munoz	S_jeronimo	1,203,142	817,172	Mensual	1991 - 2003	13
2623502	CO	Vega_la.tab	Aurra	Sopetran	1,214,230	809,832	Mensual	1970 - 1977	8
2701083	PM	San_isidro	Grande	Entrerrios	1,217,819	841,192	Mensual	1970 - 2004	35
2620014	PM	Armenia	Sabaleta	Armenia	1,173,657	811,542	Mensual	1975 - 1999	25
2701053	PG	Alto_sn_and	Medellín	Girardota	1,203,540	849,230	Mensual	1958 - 1979	22
2308025	PG	Retiro_el	Negro	Retiro	1,160,790	840,610	Pmmult	1949-1987	39

CÓDIGO	TIPO	NOMBRE	CORRIENTE	MUNICIPIO	Y (m)	X (m)	RESOLUCIÓN TEMPORAL	PERIODO	AÑOS
2308028	PG	Chuscal	Negro	Retiro	1,161,540	847,420	Pmmult	1949-1984	36
2308029	PM	Montijo	Negro	Rionegro	1,170,210	849,950	Pmmult	1953-1985	33
2308030	PM	Carmen_el	Negro	El carmen	1,162,920	861,900	Pmmult	1959-1987	29
2308035	PM	Santuario	Negro	Santuario	1,169,300	870,900	Pmmult	1959-1987	29
2308036	PM	Concepcion	Nare	Concepcio	1,198,900	869,550	Pmmult	1959-1984	26
2308038	PM	San_vicente	Negro	Sn_vicente	1,186,130	861,490	Pmmult	1959-1988	30
2308044	PG	Corrientes	Nare	Sn_vicente	1,189,270	868,970	Pmmult	1971-1991	21
2308045	PG	Remango	Nare	Concepcio	1,197,900	878,560	Pmmult	1967-1988	22
2308052	PM	Cocorna	Samana	Cocorna	1,162,120	877,410	Pmmult	1968-1988	21
2308054	PM	Granada	Samana	Granada	1,170,040	878,220	Pmmult	1968-1988	21
2308517	CP	Penol_el	Nare	Peñol	1,181,185	874,885	Pmmult	1960-1989	30
2618010	PM	Union_la	Piedras	La_union	1,153,060	858,280	Pmmult	1959-1984	26
2623009	PG	Aurra	Aurra	San_pedro	1,201,490	830,300	Pmmult	1951-1983	33
2701040	PM	Riog_alm.	Grande	Don_matias	1,215,200	854,500	Pmmult	1950-1985	36
2701042	PG	Riog_bocac	Grande	Sta_rosa	1,212,820	853,619	Pmmult	1950-1984	35
2701043	PM	Riog_bocat	Grande	Sta_rosa	1,211,400	852,860	Pmmult	1954-1987	34
2701044	PM	Riog_mocor	Grande	Don_matias	1,215,590	857,730	Pmmult	1954-1985	32
2701048	PG	Tasajera	Medellín	Barbosa	1,200,800	851,160	Pmmult	1984-1987	4
2701052	PG	Riochico	Grande	San_pedro	1,211,540	844,850	Pmmult	1958-1983	26
2701073	PG	Medina	Grande	San_pedro	1,202,230	839,070	Pmmult	1967-1984	18
2701075	PM	Entrerrios	Grande	Entrerrios	1,218,060	845,400	Pmmult	1968-1987	20
2701095	PG	Presa_riog_2	Grande	Don_matias	1,210,560	849,210	Pmmult	1984-1988	5
2701101	PG	Alto_de_sier	Chico	Belmira	1,217,950	831,150	Pmmult	1982-1988	7
2701104	PG	Capt_riog_2	Grande	San_pedro	1,206,741	846,693	Pmmult	1984-1988	5
2701522	CP	San_pedro	Chico	San_pedro	1,210,460	835,639	Pmmult	1950-1987	38
2701524	CP	Riogrande	Grande	Don_matias	1,212,253	854,084	Pmmult	1982-1987	6

Fuente: Red Río Fase I (UdeA, et al., 2005)

Tabla 2.2. Estaciones de caudal disponibles en la Cuenca

Cód	Tipo	Nombre	Corriente	Municipio	Y (m)	X (m)	Período
2701709	LG	PIEDRAS Blanc_RM.7	Q Piedras Bla	Medellín	1,187,330	842,790	1978 - 2003
2701710	LG	CHORRILLOS_RM_8	Q Chorrillos	Medellín	1,188,060	841,420	1958 - 2004
2701716	LG	CALDAS_RM_16	Medellín	Caldas	1,166,996	827,383	1980 - 1988
2701727	LG	ANCON_SUR_RMS_17	Medellín	la Estrella	1,171,678	827,139	1980 - 2000
2701731	LM	RM_9	Q El Hato	Bello	1,191,900	836,500	1968 - 1979
2701733	LG	SALADA_LA_RMS_11	Medellín	Caldas	1,161,560	828,490	1972 - 1987
2701734	LG	MACHADO_RMS.12	Medellín	Bello	1,192,620	838,460	1980 - 1984
2701735	LG	YARUMITO_RMS_14	Medellín	Barbosa	1,207,240	866,150	1981 - 2003
2701736	LG	GABINO_RMS.15	Porce	Santa Rosa de Os	1,217,340	875,250	1973 - 2003
2701738	LG	HATILLO_EL_RMS.13	Medellín	Barbosa	1,200,980	854,350	1981 - 2003
2701765	LM	EMBALSE_LA_GARCIA	Q La Garcia	Bello	1,194,702	833,601	1988 - 2001
2701781	LG	ANCON_NORTE_RMS_20	Medellín	Copacabana	1,196,400	843,840	1989 - 1997

Cód	Tipo	Nombre	Corriente	Municipio	Y (m)	X (m)	Período
2701803	LG	GIRARDOTA	Medellín	Girardota	1,197,518	848,513	1995 - 2003
2701704	LG	AGUACATALA_LA_RMS1*	Medellín N	Medellín	1,176,850	833,460	1956 - 1989

Fuente: Red Río Fase I (UdeA, et al., 2005)

*Resolución temporal mensual, las demás tienen resolución diaria

2.3.3 Precipitación media multianual

Para la elaboración del mapa de precipitación media multianual se consideraron los registros de las estaciones existentes en la Cuenca (Tabla 2.1). En primer lugar se realizó un análisis espacial de los datos identificando características tales como: Localización de los valores extremos, tendencia general, grado de continuidad, etc. Luego se interpolaron los datos de precipitación mediante el software ArcGIS 9.0 usando el método de Kriging para celdas cuadradas de 30 x 30 m. En la Figura 2.3 se presenta el mapa de precipitación media anual en mm/año (mapa disponible en la base de datos espacial: directorio: "1LB", objeto geográfico: "ag_precipt").

Los mayores valores del campo están entre 2,800 y 3,200 mm/año, y se presentan en la parte norte de la Cuenca. Las menores precipitaciones (valores entre los 1,400 mm/año y 1,800 mm/año) se dan en la zona central de la Cuenca y se extiende hacia la zona occidental (municipios de Copacabana, Girardota, San Pedro y Sopetrán). Dentro de esta zona se encuentran las estaciones Tulio Ospina, Planta Manantiales, ambas en Bello y Aurrá en San Pedro, cuyos registros anuales no superan los 1,500 mm/año. Se concluye que en la Cuenca del río Aburrá la mayor precipitación se da en la zona norte, al sur donde nace el río y al sur-occidente del Valle.

2.3.4 Temperatura media

Debido a que existen solo 5 estaciones climatológicas con registros de temperatura sobre la Cuenca, se recurrió a una estimación indirecta de esta variable. Los registros de las estaciones se usaron para comparar y validar el método empleado. Aceptando que la temperatura en el trópico varía linealmente con la altura sobre el nivel del mar, se utilizó la ecuación propuesta por CENICAFÉ (Chávez y Jaramillo, 1996), donde se estima la temperatura a partir de la altura. Esta ecuación fue obtenida a partir de registros de altura y temperatura de la región andina y es de la forma:

$$T_{media} = 29.42 - 0.0061 \cdot h$$

Donde, T_{media} es la temperatura media anual en ($^{\circ}C$) y h es la altura sobre el nivel del mar en (m).

La Figura 2.4 muestra la distribución espacial de la temperatura en la región de estudio (mapa disponible en la base de datos espacial: directorio: “1LB”, objeto geográfico: “ai_temp”). Como era de esperarse la distribución de la temperatura representa la topografía de la zona, por lo tanto este mapa es similar al MDT.

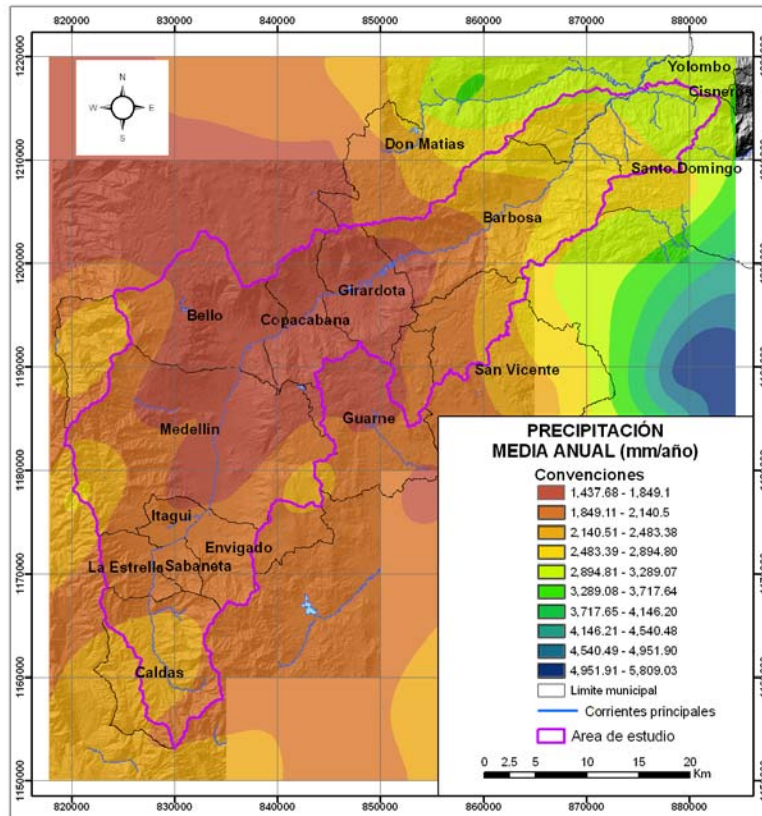


Figura 2.3. Mapa de precipitación media anual (mm/año) para la zona de estudio Fuente: elaboración propia.

Puede notarse que la temperatura a lo largo del corredor fluvial se encuentra entre los $20^{\circ}C$ y $24^{\circ}C$, presentándose una disminución en las cercanías al nacimiento de la Cuenca y en lo alto de las laderas, donde se observan valores del orden de los $17^{\circ}C$.

Es importante anotar que la ecuación empleada en la estimación de la temperatura, se obtuvo con base en la información de estaciones en cuencas rurales y es claro que la Cuenca del río Aburrá presenta una alta intervención urbanística, hecho que puede representar una fuente de incertidumbre, ya que es típico de las ciudades el efecto “isla

de calor”, presentando temperaturas medias más altas que su entorno rural, con efectos inclusive más allá de la propia ciudad (Zhang et al., 2004).

En este sentido se hace necesario contar con una red de mediciones de las variables climatológicas que permita reforzar estas conclusiones y observar directamente el efecto de la ciudad en medio de una cuenca. De todas formas, el mapa de temperatura es importante para la determinación de las zonas de vida y algunos aspectos relacionados con coberturas vegetales y de especies que serán analizados en capítulos posteriores, así como para tener una caracterización climática aproximada de la zona de estudio.

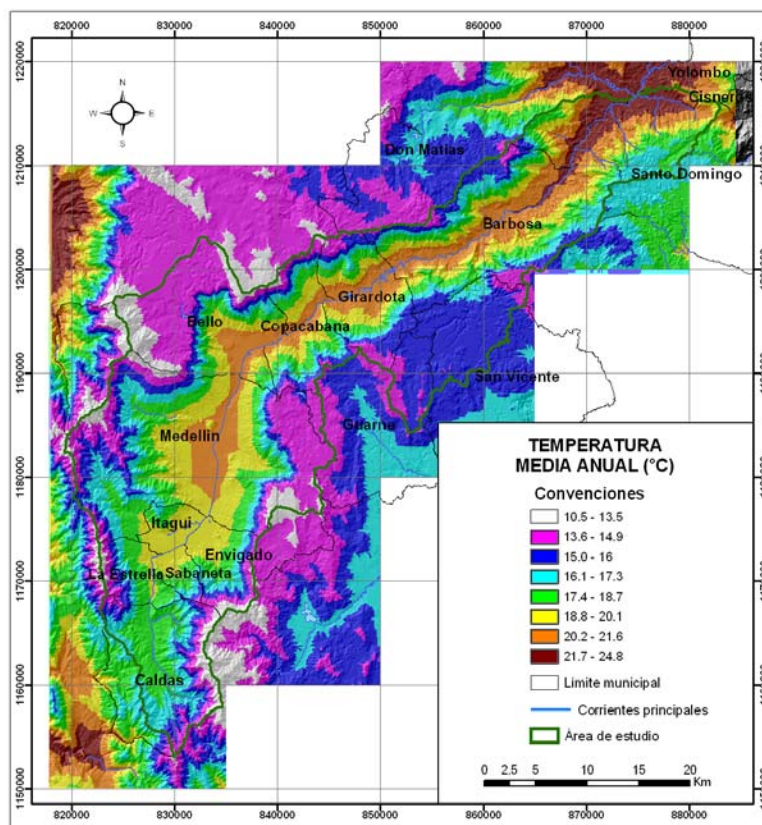


Figura 2.4. Mapa de temperatura media (°C) para la zona de estudio

2.3.5 Evaporación media

La evapotranspiración es una componente fundamental en el balance hidrológico, aunque es, a su vez, la variable con mayores incertidumbres en su medición y estimación. La Evapotranspiración tiene en cuenta la evaporación desde la superficie del terreno, cuerpos de agua y la transpiración de las plantas. Para la estimación de la evaporación real en la Cuenca se utilizó el método del Factor Regional ya que se encontró que para la

zona es uno de los que presenta resultados con mejor ajuste (*Barco y Cuartas, 1998; Unalmed-CTA, 2001*). El método estima la evapotranspiración real mediante la siguiente ecuación empírica:

$$ETR = \frac{P}{\left(1 + \left(\frac{P}{R_n}\right)^\alpha\right)^{1/\alpha}}$$

Donde, ETR es la evapotranspiración real (mm/año), P es la precipitación media en la Cuenca (mm/año), R_n es el equivalente en agua de la radiación neta (para Antioquia $R_n = 1,172.69$ mm/año) y α es un parámetro que depende de la escala de estimación de la variable. El método asume que la evaporación anual no excede los valores correspondientes a P ó R_n y que la relación $\mu = P/R_n$ está en el intervalo $0.23 < \mu < 1.97$. Esta metodología propone en la región de trabajo, para cálculo del factor α el valor que minimiza el error medio entre las evaporaciones estimadas y las obtenidas al realizar balance de largo plazo.

En 52 cuencas con áreas entre 25 y 5,300 km² con condiciones climáticas diferentes, se encontró un valor de $\alpha = 1.91$ con muy buenos resultados, aplicable a zonas con $0.85 < \mu < 6.37$, límites entre los cuales se encuentra la región de estudio (*Barco y Cuartas, 1998*).

Finalmente la distribución espacial de la evaporación calculada con la ecuación del Factor Regional se presenta en la Figura 2.5 (mapa disponible en la base de datos espacial: directorio: "1LB", objeto geográfico: "ai_evt"), este mapa tiene la misma resolución que el de precipitación y fue utilizado en el cálculo del caudal medio.

2.3.6 Caudales medios

Para la estimación de caudales medios se usó el software HidroSIG el cual hace dicho cálculo mediante la metodología del Balance Hidrológico a largo plazo.

El balance hidrológico, tiene como principio físico la ecuación de conservación de masa de agua en el sistema o volumen de control. En este caso, el volumen de control considerado está conformado por las columnas de agua y suelo, donde la frontera horizontal está definida por la divisoria de la Cuenca; el borde inferior de la columna de suelo es un estrato impermeable y el borde superior de la columna atmosférica es su tapa.

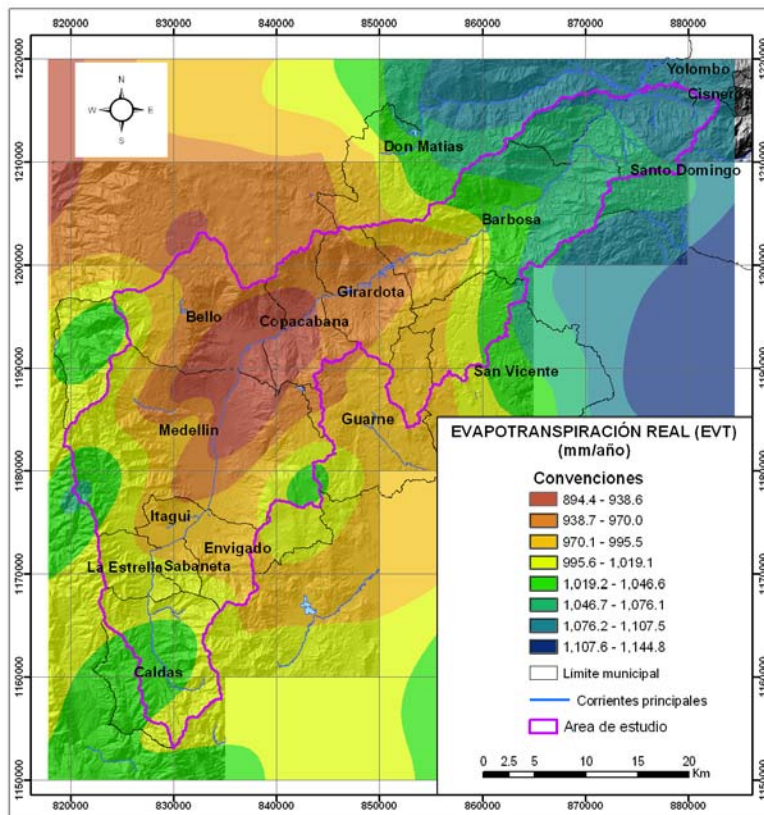


Figura 2.5. Mapa de evaporación real media (mm/año) para la zona de estudio.

La Figura 2.6 muestra un esquema del volumen de control donde se indican las variables del sistema. Las variables P, E, F y R tienen dimensiones de longitud por unidad de tiempo, o caudal por unidad de área; mientras que W y S tienen dimensiones de longitud, o sea, volumen por unidad de área.

Después de realizar el balance de agua en la columna atmosférica y en la columna de suelo en el largo plazo (décadas), de tal manera que los cambios en las cantidades almacenadas sean despreciables, su combinación permite expresar el balance a largo plazo con la siguiente expresión:

$$R = \int (P - E) dt$$

Donde: $-R$ es la escorrentía superficial, P es la precipitación media y E es la evaporación real.

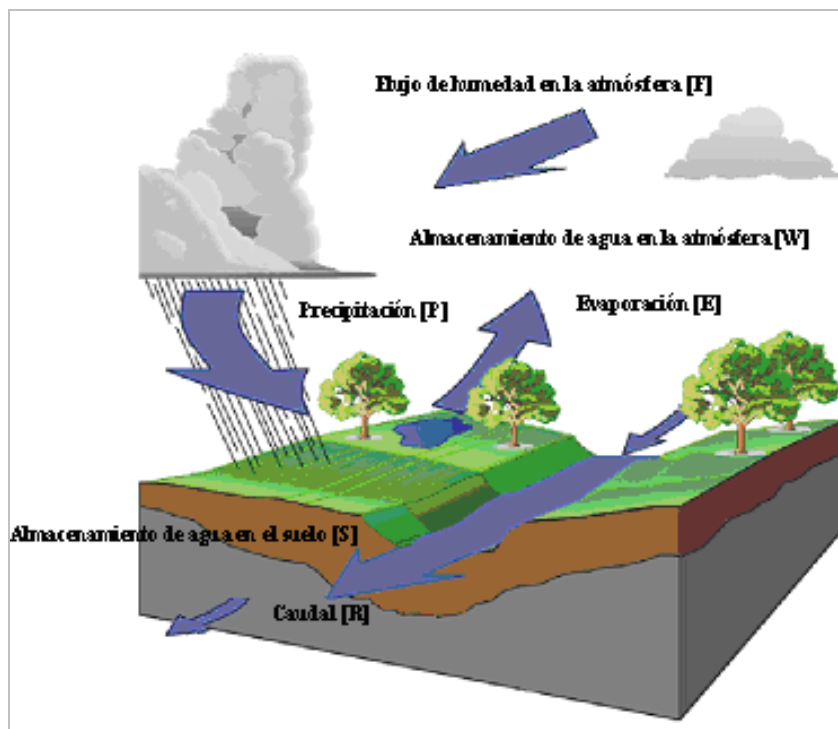


Figura 2.6. Esquema del balance hídrico sobre una cuenca
Fuente: Unalmed, 2005.

Con el fin de validar el método del balance hídrico de largo plazo en la Cuenca, se definieron 10 puntos de control en el corredor fluvial del río, sitios en los cuales existen estaciones de caudal. A partir de cada una de las estaciones se definió una subcuenca cuyos parámetros morfométricos, obtenidos a partir del MDT, se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Reporte morfológico de las subcuencas definidas a partir de las estaciones de caudal a partir de HidroSig

CÓDIGO	NOMBRE	PARÁMETROS MORFOLÓGICOS									
		CORRIENTE	ÁREA (km ²)	ORDEN DE HORTON	MAGNITUD (Cauces Orden 1)	LONGITUD TOTAL (km)	LONGITUD DEL CANAL PRINCIPAL (km.)	COTA MÁXIMA EN LA CUENCA (m)	COTA EN LA SALIDA (m)	PERÍMETRO (km.)	PENDIENTE MEDIA (%)
2701733	SALADA_LA_RMS_11	MED	43.2	5	195	161.1	10.9	3,063	1,800	45.1	3.9
2701716	CALDAS_RM_16	MED	99.8	5	374	339.7	17.8	3,100	1,750	77.4	24.0
2701727	ANCON_SUR_RMS_17	MED	120.7	5	449	408.8	23.7	3,100	1,650	82.2	26.5
2701704	AGUACATALA_LA_RMS1	MED	278.3	7	1,420	1,095.1	32.7	3,100	1,537.5	144.4	14.7
2701734	MACHADO_RMS.12	MED	639.5	7	2,535	2,303.6	52.4	3,100	1,437.5	212.5	20.5
2701781	ANCON_NORTE_RMS_20	MED	738.3	7	2,893	2,633.2	60.4	3,100	1,400	231.1	22.0

CÓDIGO	NOMBRE	PARÁMETROS MORFOLÓGICOS									
		CORRIENTE	ÁREA (km ²)	ORDEN DE HORTON	MAGNITUD (Cauces Orden 1)	LONGITUD TOTAL (km)	LONGITUD DEL CANAL PRINCIPAL (km.)	COTA MÁXIMA EN LA CUENCA (m)	COTA EN LA SALIDA (m)	PERÍMETRO (km.)	PENDIENTE MEDIA (%)
2701803	GIRARDOTA	MED	784.9	7	2,962	2,750.5	65.9	3,100	1,350	247.5	23.0
2701738	HATILLO_EL_RMS.13	MED	864.1	7	3,044	2,911.9	77.2	3,100	1,350	278.1	24.1
2701735	YARUMITO_R-MS_14	MED	1,096	7	3,357	3,396.0	95.5	3,100	1,250	366.3	25.3
	GABINO	PORCE	1,443.8	7	4,394	4,308.9	113.2	3,100	1,050	444.07	25.2

Los parámetros que aparecen en la Tabla 2.3 para la estación GABINO, fueron calculados a partir de una estación virtual que fue ubicada sobre la corriente del río Aburrá, aguas arriba de la confluencia con el río Grande. La estación limnográfica real, GABINO_RMS.15 (2701736), está localizada aguas abajo de dicha estación virtual y el área real de dicha cuenca es 2,541.4 km² (Anuario Hidrológico de Antioquia, 1991) incluyendo el área de la Cuenca del río Grande.

Es importante tener en cuenta lo anterior al comparar los caudales medios reconstruidos con los reales. Para la estación virtual GABINO los caudales medios deben estimarse por rendimientos, dado que el MDT no considera el área aferente a GABINO_RMS.15. La metodología de rendimiento hidrológico consiste en dividir el caudal medio en la estación real GABINO_RMS.15 entre el área de la cuenca tributaria (1,443.8 km²) y luego multiplicar por el área real de la cuenca (2,541.4 km²). Este caudal se considera como una aproximación al caudal medio en la estación.

Una vez obtenidos los caudales mediante balance hídrico de largo plazo, se incluyeron los aportes de aguas residuales. La estimación del aporte de aguas residuales se hizo teniendo en cuenta que la población asentada en la subcuenca correspondiente a cada una de las estaciones, descarga al cauce principal del río. Las consideraciones que se tuvieron para estimar dicho caudal se explican en la Sección 2.6.4. Es importante mencionar que aguas abajo de la estación GIRARDOTA no se tienen colectores ni interceptores, las aguas negras son descargadas sobre las fuentes de agua más cercanas, con lo cual el aporte de caudal es insignificante debido a la alta dispersión de los vertimientos, además de generar una buena dilución de desechos orgánicos (UdeA, et al, 2005).

La Tabla 2.4 resume los caudales estimados en cada punto considerando los aportes de aguas residuales (Q. MED. RECONSTR) que corresponde a la suma del caudal medio estimado mediante balance hídrico y los aportes de aguas residuales; también se presentan los valores de precipitación media para cada subcuenca, los caudales reales

promedios medidos en las estaciones (Q. MED. REAL) durante el período de análisis y el calculo del error porcentual.

Tabla 2.4. Caudales medios (m^3/s) reales y estimados en las estaciones de caudal

CÓDIGO	NOMBRE	P. MEDIA (mm/año)	Q. MED. ESTIM.	APORTE ACUMULADO S AGUAS RESIDUAL	Q. MED. RECONST.	Q. MED. REAL	ERRO R %
2701733	SALADA_LA_RMS_11	2,186.89	1.61	0	1.61	1.63	1.23
2701716	CALDAS_RM_16	2,183.71	3.69	0	3.69	5.59	33.99
2701727	ANCÓN_SUR_RMS_17	2,159.50	4.38	0.37	4.75	4.92	3.46
2701704	AGUACATALA_LA_RMS1	2,062.72	9.57	1.93	11.5	12.38	7.11
2701734	MACHADO_RMS.12	1,905.58	18.98	6.47	25.45	24.64	3.29
2701781	ANCON_NORTE_RMS_20	1,872.67	21.23	6.47	27.7	28.7	3.48
2701803	GIRARDOTA	1,863.86	22.36	6.47	28.83	31.15	7.45
2701738	HATILLO_EL_RMS.13	1,858.55	24.46	6.47	30.93	30.64	0.95
2701735	YARUMITO_RMS_14	1,928.95	33.08	8.06	41.14	40.04	2.75
2701736	GABINO__RMS.15	2,084.30	91.99	8.06	100.05	92.26	8.44

Otra consideración importante es la descarga de la generación en la Central Hidroeléctrica La Tasajera, ubicada aguas arriba de las estaciones HATILLO_EL_RMS.13 y YARUMITO_RMS_14, la cual inició su operación en el mes de Octubre de 1993. Con el fin de tener las series “naturales” para estas estaciones, el caudal medio real que se reporta en la Tabla 2.4 es el promedio para el período registrado hasta esa fecha.

Es importante tener en cuenta que los errores obtenidos en su mayoría son menores al 10%, solo en la estación Caldas_RM_16 se obtuvo un error del 34%. En dicha estación se encuentra la mayor diferencia entre el caudal medio reconstruido ($3.69 m^3/s$) y el real ($5.59 m^3/s$) esto debido a las inconsistencias que presentan sus registros históricos (Unalmed y UdeA, 2005). Los caudales reconstruidos (Estimados) y los reales pueden observarse en la Figura 2.7 (mapa disponible en la base de datos espacial: directorio: “1LB”, objeto geográfico: “ag_qmedio”).

Podría explicarse la diferencia de los caudales reales con los estimados en la estación GABINO__RMS.15 debido a que los caudales estimados en éste sitio se hicieron mediante rendimientos, es posible que estos varíen si se amplía el MDT y se estimen los campos de evaporación y precipitación para la cuenca de drenaje completa (incluyendo parte del río Porce y el río Grande).

En general, con base en las comparaciones de los caudales estimados y medidos, puede concluirse que la metodología del balance hidrológico es una buena alternativa para la estimación de los caudales medios cuando no se tienen series de registros de caudal de buena longitud y resolución.

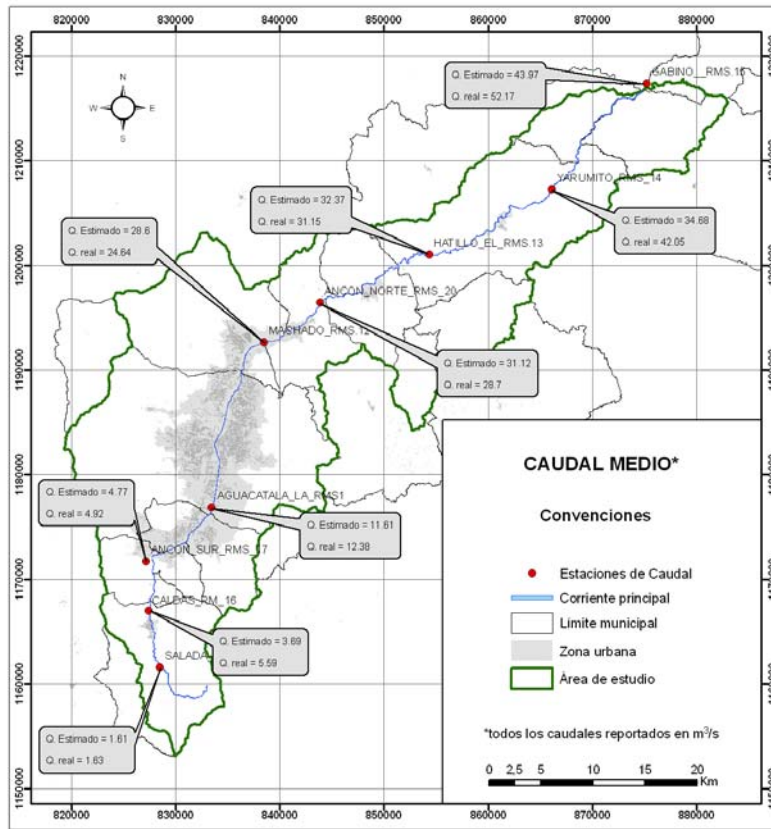


Figura 2.7. Caudales medios (m³/s) estimados en algunas estaciones del corredor fluvial

Es pertinente destacar que las estimaciones de los aportes de aguas residuales, tienen un alto grado de incertidumbre, debido a la manera como fueron calculados y a la falta de medición puntual en los puntos de descarga.

2.3.7 Caudales máximos

Para la determinación de los caudales máximos se aplicaron dos metodologías, las cuales involucran tanto parámetros geomorfológicos como estadísticos: análisis de frecuencia y regionalización de las características medias.

■ Análisis de frecuencia

Esta metodología consiste en determinar los caudales para diferentes periodos de retorno (Q_T) basados en las características estadísticas de registros de caudal. La ecuación de Ven te Chow (Chow, et al., 1996), permite obtener caudales máximos asociados a cualquier período de retorno de la siguiente manera:

$$Q_{Tr} = \mu_{Q_{\max}} + K \sigma_{Q_{\max}}$$

Donde Q_{Tr} es el caudal máximo para un periodo de retorno Tr ; $\mu_{Q_{\max}}$ es la media estimada de los caudales máximos instantáneos anuales; $\sigma_{Q_{\max}}$ es la desviación estándar de los caudales máximos instantáneos anuales y K es el factor de frecuencia que depende de la función de distribución de probabilidad de los caudales máximos anuales y del periodo de retorno.

Después de evaluar diferentes funciones de distribución de probabilidad, se encontró que la distribución Lognormal es la que mejor ajustó los caudales máximos anuales. En ésta distribución, el factor de frecuencia K para eventos extremos máximos se puede calcular así:

$$K = \frac{\exp\left[Z\sqrt{\ln(1+Cv^2)} - 0.5\ln(1+Cv^2)\right] - 1}{Cv}$$

Donde Z es la variable normal estándar para un período de retorno dado y Cv es el coeficiente de variación (Chow, et al., 1996).

Se analizaron las estaciones de caudal a lo largo del río Aburrá (Anexo A2.2) y se seleccionaron las que tenían registros máximos anuales superiores a 15 años, debido a que estadísticamente no es adecuado hacer análisis en períodos de registros con menor longitud, donde sólo 5 estaciones cumplieron esta condición. En La Tabla 2.5 y la Figura 2.8 (mapa disponible en la base de datos espacial: directorio: "1LB", objeto geográfico: "ag_qmax#. #=233, 5, 10, 25, 50, 100") aparece el resumen los caudales obtenidos mediante esta metodología.

■ Regionalización de las características medias

Esta metodología propuesta por Unalmed, UPME-Colciencias (2000), considera que la media y la desviación estándar del caudal dependen únicamente de parámetros morfométricos medibles en cualquier punto de interés sobre la cuenca. Una vez conocidas éstas variables es posible estimar, mediante el uso de distribuciones de probabilidad para valores extremos, los caudales máximos instantáneos asociados a diferentes períodos de retorno.

Tabla 2.5. Caudales máximos (m³/s) estimados por análisis de frecuencia en las estaciones con períodos de registro superiores a 15 años

CAUDAL MÁXIMO (m ³ /s)									
ESTACIÓN	ÁREA (km ²)	μ max	σ max	PERÍODO DE RETORNO (Años)					
				2.33	5	10	25	50	100
SALADA_LA_RMS_11	43.2	9.1	3.9	8.33	11.76	14.08	16.34	19.32	21.60
AGUACATALA_LA	278.3	54.1	26.6	48.57	71.86	88.19	104.43	126.32	143.41
HATILLO_EL_RMS.13	864.1	237.0	118.0	212.10	315.20	387.71	460.01	557.63	633.97
YARUMITO_RMS_14	1,096	320.0	73.3	311.93	377.36	416.85	452.57	496.43	528.01
GABINO__RMS.15	1,443.8	445.0	116.1	430.56	534.40	598.30	656.79	729.48	782.36

Según ésta metodología, la media y la desviación estándar de los caudales máximos están dadas por:

$$\mu_{\max} = K_{\sigma} (P - E)^{\theta_{\mu}} A^{\phi_{\mu}}$$

$$\sigma_{\max} = K_{\sigma} (P - E)^{\theta_{\sigma}} A^{\phi_{\sigma}}$$

Donde K_{μ} y K_{σ} son los factores de frecuencia para la media y la desviación estándar (distribución lognormal), respectivamente; P , la precipitación media sobre la cuenca; E , la evapotranspiración; A , el área de la cuenca y θ_{μ} , ϕ_{μ} , θ_{σ} y ϕ_{σ} son constantes asociadas a la media y a la desviación estándar.

Los valores de dichas constantes se estimaron mediante procedimientos de regresión múltiple, utilizando como variables independientes los parámetros climáticos (precipitación y evapotranspiración) y geomorfológicos de la cuenca (área de drenaje) y como variables dependientes los valores de μ_{\max} y σ_{\max} calculados para cada estaciones de caudal localizada en el corredor del río. Una vez obtenida la media y desviación estándar de los caudales máximos en cada estación, se realizaron correlaciones simples entre éstas y las variables climáticas. Luego, se realizaron regresiones múltiples, en éste caso considerando como variable independiente el área, y se obtuvieron las siguientes ecuaciones de regionalización (Unalmed, et al., 2005):

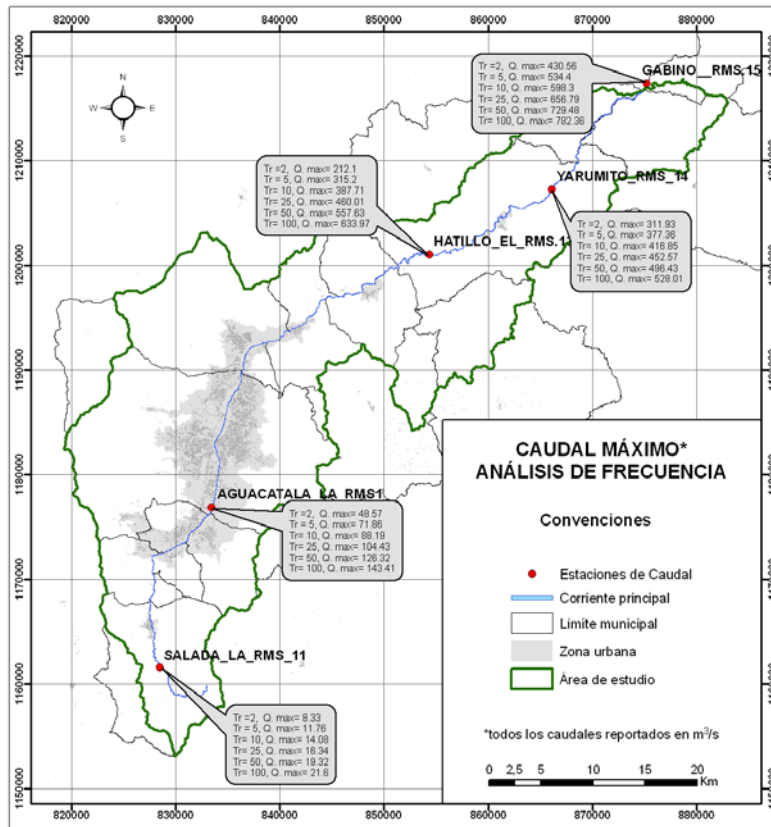


Figura 2.8. Caudales máximos (m³/s) asociados a diferentes períodos de retorno con la metodología de análisis de frecuencia.

$$\mu_{\max} = 0.38546A^{0.97650}$$

$$\sigma_{\max} = 0.64579A^{0.70852}$$

Las expresiones anteriores permiten obtener la media, μ_{\max} , y la desviación estándar, σ_{\max} , para los caudales máximos en m³/s, siendo A él área de la cuenca en km².

Conocidas la media, μ_{\max} , y la desviación estándar, σ_{\max} , se aplica la ecuación de Ven Te Chow (Chow, et al., 1996) y se realiza análisis de frecuencia como se explicó en el cálculo de los caudales máximos por medio del análisis de frecuencias.

Los caudales máximos estimados por el método de Regionalización de características medias para diferentes períodos de retorno, se presentan en la Tabla 2.6 y en la Figura 2.9.

Tabla 2.6. Caudales máximos (m³/s) estimados por el método de regionalización de las características medias

ESTACIÓN	ÁREA (km ²)	PERÍODO DE RETORNO (AÑOS)					
		2.33	5	10	25	50	100
SALADA_LA_RMS_11	43.2	15.58	23.17	29.35	37.17	42.96	48.71
CALDAS_RM_16	99.8	35.34	49.09	60.30	74.45	84.95	95.37
ANCON_SUR_RMS_17	120.7	42.55	58.28	71.09	87.28	99.30	111.22
AGUACATALA_LA_RMS1	278.3	96.16	124.59	147.75	177.01	198.71	220.26
MACHADO_RMS.12	639.5	216.64	267.90	309.65	362.41	401.54	440.39
ANCON_NORTE_RMS_20	738.3	249.28	306.03	352.26	410.66	453.99	497.00
GIRAROTA	784.9	264.63	323.90	372.17	433.17	478.42	523.33
HATILLO_EL_RMS.13	864.1	290.66	354.11	405.78	471.07	519.51	567.59
YARUMITO_RMS_14	1,096	366.63	441.72	502.88	580.15	637.48	694.38
GABINO_RMS.15	1,443.8	479.85	571.13	645.48	739.42	809.11	878.28

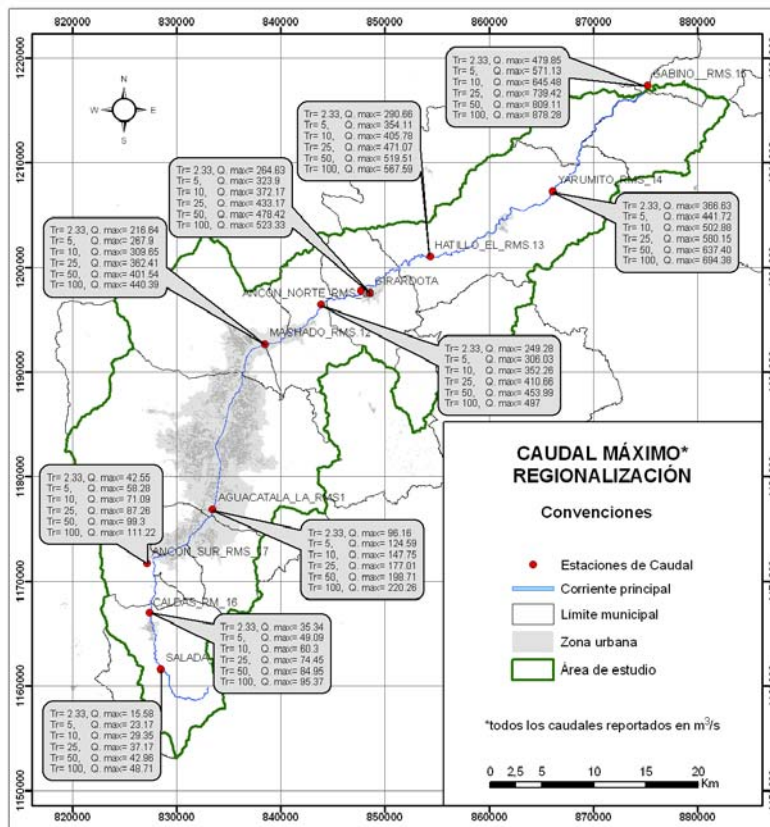


Figura 2.9. Caudales máximos (m³/s) para diferentes períodos de retorno estimados con regionalización de características medias

Al comparar, en algunas estaciones, los caudales obtenidos por medio de las dos metodologías, se observa que en general los caudales encontrados mediante análisis de

frecuencia son menores que los hallados con regionalización. En el modelamiento hidráulico se utilizaron los caudales máximos obtenidos mediante regionalización de características medias.

2.3.8 Caudales mínimos

Con la información secundaria con la que se contaba se realizó el cálculo de los caudales mínimos por medio del método de regionalización de características medias.

- **Regionalización de características medias**

Este método sigue la misma metodología empleada para caudales máximos pero aplicada a los caudales mínimos. Mediante regresiones múltiples y considerando el área como variable independiente se obtienen las siguientes ecuaciones de regionalización (Unalmed, et al., 2005):

$$\mu_{\min} = 0.013158A$$

$$\sigma_{\min} = 0.003648A$$

Las expresiones anteriores permiten obtener la media, μ_{\min} , y la desviación estándar, σ_{\min} , para los caudales mínimos en m^3/s , siendo A el área de la cuenca en km^2 . Con los valores obtenidos para la media y la desviación estándar se realiza el cálculo de los caudales usando análisis de frecuencia anteriormente explicado. Los caudales mínimos utilizando este método se presentan en la Tabla 2.7 y en la Figura 2.10 (mapa disponible en la base de datos espacial: directorio: "1LB", objeto geográfico: "ag_qmin#. #=233, 5, 10, 25, 50, 100").

Tabla 2.7. Caudales mínimos (m^3/s) con la metodología de regionalización

ESTACIÓN	ÁREA (km^2)	PERÍODO DE RETORNO (AÑOS)					
		2.33	5	10	25	50	100
SALADA_LA_RMS_11	43.2	0.52	0.44	0.39	0.35	0.33	0.31
CALDAS_RM_16	99.8	1.20	1.01	0.91	0.82	0.76	0.72
ANCON_SUR_RMS_17	120.7	1.45	1.23	1.10	0.99	0.92	0.87
AGUACATALA_LA_RMS1	278.3	3.34	2.83	2.54	2.28	2.13	2.00
MACHADO_RMS.12	639.5	7.67	6.50	5.85	5.24	4.88	4.59
ANCON_NORTE_RMS_20	738.3	8.85	7.50	6.75	6.05	5.64	5.30
GIRARDOTA	784.9	9.41	7.98	7.18	6.43	5.99	5.63
HATILLO_EL_RMS.13	864.1	10.36	8.78	7.90	7.08	6.60	6.20
YARUMITO_RMS_14	1,096	13.14	11.14	10.02	8.98	8.37	7.86
GABINO	1,443.8	17.32	14.67	13.20	11.83	11.03	10.36

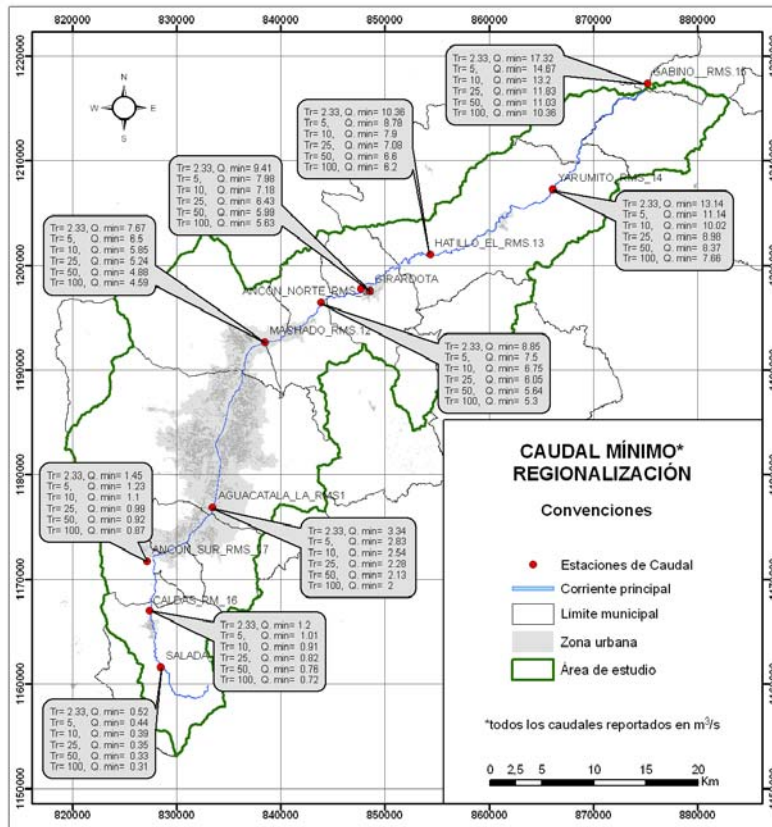


Figura 2.10. Caudales mínimos (m^3/s) para diferentes períodos de retorno estimados con el método regionalización de características medias

2.4 OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA

Conocer la cantidad de agua disponible para el desarrollo de actividades humanas e industriales y la que se requiere para que sean sostenibles en el tiempo, se convierte en una poderosa herramienta de planeación.

La estimación del consumo de agua potable en la región de estudio, es indispensable para conocer la población asentada en la cuenca y la cantidad de agua que ésta requiere para el desarrollo de sus actividades económicas y humanas. Para cada municipio del Valle de Aburrá, se evaluaron las condiciones actuales de población y la proyección de la misma para el año 2020, considerando las pérdidas del sistema de conducción.

2.4.1 Información disponible

■ Información demográfica

Para determinar la demanda de agua en la Cuenca se requiere conocer la población actual y futura. En la página Web del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), www.dane.gov.co, se encuentran publicados los resultados de los censos que la entidad ha realizado, incluyendo los resultados del censo del año 2005. En la Tabla 2.8 se presenta la información de población total y rural de cada municipio de la Cuenca, para los tres últimos censos (1985, 1993 y 2005).

Tabla 2.8. Población de los municipios de la Cuenca

MUNICIPIO	CENSO 1985		CENSO 1993		CENSO 2005	
	Total	Rural	Total	Rural	Total	Rural
Barbosa	28,623	18,240	31,839	18,460	42,547	23,826
Bello	212,861	6,542	264,009	6,298	373,013	13,609
Caldas	42,158	5,955	51,240	5,989	68,157	15,525
Copacabana	40,309	12,778	46,273	6,652	61,421	8,388
Don Matías	11,168	5,655	12,332	4,485	17,759	6,307
Envigado	91,391	5,750	115,484	8,082	175,337	8,595
Girardota	23,684	11,858	28,973	11,842	42,818	17,623
Guarne	23,269	17,012	27,038	16,378	39,753	25,805
Itagüí	137,623	1,727	180,354	4,728	231,768	22,270
La Estrella	29,918	13,486	38,956	5,330	52,763	24,225
Medellín	1,468,089	48,917	1,630,009	78,849	2,223,660	129,771
Sabaneta	20,491	4,915	28,173	4,809	44,874	9,346
San Vicente	19,643	16,702	20,243	16,903	19,273	12,420
Santo Domingo	15,233	12,275	12,026	9,547	11,418	9,245
Yolombó	20,369	15,114	14,858	9,294	19,999	14,031

Fuente: DANE, 2005.

Los métodos de cálculo de proyección de población demandaron información referente al número de nacimientos y defunciones del año inicial, estos datos también fueron consultados en la página Web del DANE (Tabla 2.9).

De otro lado la definición de la población necesitó información de las inmigraciones, con este fin se consultó la página Web de la Agencia Presidencial para la Acción Social y la Cooperación Internacional (www.accionsocial.gov.co). En esta se encontró una base de datos con los acumulados para el año 2006 de personas desplazadas en cada municipio del departamento. Los datos para los municipios de la Cuenca se presentan en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Nacimientos, Defunciones e Inmigraciones en los municipios de la Cuenca, año 2005

MUNICIPIO	NACIMIENTOS (habitantes)	DEFUNCIONES (habitantes)	INMIGRACIONES (habitantes)
Barbosa	297	264	2,584
Bello	3,756	1,642	6,147
Caldas	458	389	726
Copacabana	914	320	512
Don Matías	375	95	101
Envigado	829	930	523
Girardota	319	223	432
Guarne	174	203	368
Itagüí	1,453	1,136	2,706
La Estrella	1,023	243	374
Medellín	32,343	14,454	86,734
Sabaneta	398	216	309
San Vicente	328	45	525
Santo Domingo	172	110	808
Yolombó	425	148	397

Fuente: Acción Social, 2005.

■ Revisión de información de trámites ambientales en las entidades

En la Cuenca del río Aburrá, las funciones de administración de los recursos naturales se reparten en tres entes de los cuales Corantioquia y Cornare tienen jurisdicción en la zona rural, y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá tiene competencia en la zona urbana. Se recopiló información de captaciones y vertimientos a las fuentes hídricas que constituyen la Cuenca en las corporaciones mencionadas.

Con el propósito de determinar el número real de usuarios legalizados en la Cuenca y los volúmenes de agua otorgados en concesión por las autoridades ambientales se hizo una revisión de expedientes. Esta incluyó expedientes activos y archivados por el Ministerio de Agricultura (antes de 1968), el Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Medio Ambiente, INDERENA (1968-1993) y por las autoridades ambientales, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Corantioquia y Cornare (de 1993 en adelante).

Se revisó el 70% del total de los expedientes de concesiones y vertimientos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (se suspendió la revisión por los inconvenientes mencionados más adelante), el 26% de éstos corresponde a concesiones y el restante 74% a vertimientos. Además, se revisaron 320 expedientes de Corantioquia y además se revisaron los expedientes digitales suministrados por Cornare. En la Tabla 2.10 se

presenta un resumen de la información encontrada en los expedientes de Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Corantioquia.

Tabla 2.10. Revisión de expedientes Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Corantioquia

ENTIDAD	EXPEDIENTES REVISADOS	OBSERVACIONES
Área Metropolitana del Valle de Aburrá	830	<ul style="list-style-type: none"> - 68 correspondían a vertimientos directo - 11 correspondían a solicitudes de conexión de EEPPM a alcantarillado - 88 correspondían a trámites de Juntas de Acción Comunal y Asociaciones de usuarios de concesión de aguas - 663 correspondían a usuarios conectados al sistema de alcantarillado y concesiones. <p>Los expedientes no se encuentran asociados a una cuenca específica sino que están almacenados por Municipio. Las solicitudes de conexión obedecen a un alto porcentaje de usuarios que están por encima de la cota de servicios de EEPPM. Muchas solicitudes corresponden a operativos para detectar posibles vertidos con colorantes en áreas industriales.</p>
Corantioquia	320	<ul style="list-style-type: none"> - 17 correspondían a vertimientos: <ul style="list-style-type: none"> o 5 son para aguas residuales domésticas o 4 incluyen aguas domésticas y pecuarias o 4 vierten aguas industriales o 1 vierte aguas industriales y pecuarias o 1 vierte aguas pecuarias o 2 provienen de otros usos. - 303 correspondían a concesiones expedidas en la territorial Aburrá Norte. <p>Los permisos de vertimiento exigen, en general, la construcción de sistemas estándar de tratamiento de aguas residuales domésticas constituidos por pozo séptico, filtro anaerobio, y pozo de absorción, campo o zanja de infiltración.</p>

Después de realizar la revisión, se decidió cancelar la digitación de estos expedientes, debido a que se presentaron los siguientes inconvenientes:

- En general, los puntos de concesión y vertimientos carecían de la georeferenciación correspondiente
- En muchos expedientes no se aclaraba el estado de vigencia o prórroga del permiso de la concesión
- En la mayoría de ellos no se tienen valores del caudal de vertimiento
- Se encontraron expedientes sin la respectiva resolución

- No se aclara si el usuario (persona natural o jurídica que capta y/o que realiza algún vertimiento) construyó la estructura de captación recomendada por la entidad
- No aportan información suficiente ni veraz para la estimación de la demanda de agua superficial en la Cuenca
- No es posible inventariar los usuarios ilegales en la Cuenca.

Aunque la información mencionada hubiera servido para el estudio detallado de la oferta del agua, cabe aclarar de nuevo que la escala del proyecto fue 1:25000, en la cual el análisis de información detallada de captaciones y vertimientos puntuales no estaba dentro del alcance del proyecto.

2.4.2 Estimación de la población

En la Tabla 2.11 y 0 se presentan los datos iniciales utilizados en el cálculo de la población total y rural mediante los diferentes métodos. El valor de la tasa corresponde al valor de natalidad, mortalidad y migración sobre la población total.

Tabla 2.11. Datos iniciales del modelo para la población total de la Cuenca

MUNICIPIO	POBLACIÓN 2005 (habitantes)	NATALIDAD		MORTALIDAD		INMIGRACIÓN	
		Nacimientos en 2006	Tasa (adim)	Defunciones en 2006	Tasa (adim)	Inmigraciones en 2006	Tasa (adim)
Barbosa	42,547	297	0.00698	264	0.00620	2,584	0.06073
Bello	373,013	3,756	0.01007	1,642	0.00440	6,147	0.01648
Caldas	68,157	458	0.00672	389	0.00571	726	0.01065
Copacabana	61,421	914	0.01488	320	0.00521	512	0.00834
Don Matías	1,231	26	0.02112	7	0.00535	8	0.00569
Envigado	175,337	829	0.00473	930	0.00530	523	0.00298
Girardota	42,818	319	0.00745	223	0.00521	432	0.01009
Guarne	5,789	25	0.00438	30	0.00511	54	0.00926
Itagüí	231,768	1,453	0.00627	1,136	0.00490	2,706	0.01168
La Estrella	52,763	1,023	0.01939	243	0.00461	374	0.00709
Medellín	2,223,660	32,343	0.01454	14,454	0.00650	86,734	0.03901
Sabaneta	44,874	398	0.00887	216	0.00481	309	0.00689
San Vicente	3,657	62	0.01702	9	0.00233	100	0.02724
Santo Domingo	2,439	37	0.01506	23	0.00963	173	0.07077
Yolombó	86	2	0.02125	1	0.00740	2	0.01985

Tabla 2.12. Datos iniciales del modelo para la población rural de la Cuenca

MUNICIPIO	POBLACIÓN (habitantes)	NATALIDAD		MORTALIDAD		INMIGRACIÓN	
		Nacimientos en 2006	Tasa (adim)	Defunciones en 2006	Tasa (adim)	Inmigraciones en 2006	Tasa (adim)
Barbosa	23,826	166	0.00698	148	0.00620	1,448	0.06073
Bello	13,609	137	0.01007	60	0.00440	225	0.01648
Caldas	15,525	104	0.00672	89	0.00571	166	0.01065
Copacabana	8,388	125	0.01488	44	0.00521	70	0.00834
Don Matías	1,231	26	0.02112	7	0.00535	8	0.00569
Envigado	8,595	41	0.00473	46	0.00530	26	0.00298
Girardota	17,623	131	0.00745	92	0.00521	178	0.01009
Guarne	5,789	25	0.00438	30	0.00511	54	0.00926
Itagüí	22,270	140	0.00627	109	0.00490	261	0.01168
La Estrella	24,225	470	0.01939	112	0.00461	172	0.00709
Medellín	129,771	1,888	0.01454	844	0.00650	5,062	0.03901
Sabaneta	9,346	83	0.00887	45	0.00481	65	0.00689
San Vicente	3,657	105	0.02873	14	0.00394	169	0.04598
Santo Domingo	2,439	22	0.00892	14	0.00571	103	0.04192
Yolombó	86	2	0.02125	1	0.00740	2	0.01985

Cabe notar que los datos de los municipios: Don Matías, Guarne, San Vicente, Santo Domingo y Yolombó se refieren a la porción del territorio incluido en la Cuenca. Estas porciones corresponden a diferentes porcentajes del área de cada municipio a saber Guarne (22%), Don Matías (19%), San Vicente (29%), Santo Domingo (26%) y Yolombó (0.6%). El concepto tenido en cuenta para la estimación de la población de los municipios antes mencionados en la Cuenca del río Aburrá fue la densidad de población rural en el municipio (ya que solo hay asentamientos de población rural de los mismos en la Cuenca) dado por la razón entre la población rural y el área rural del municipio. Conocida la densidad rural de cada municipio y teniendo en cuenta las áreas correspondientes a la Cuenca del río Aburrá se obtuvo la fracción de la población en la Cuenca (Tabla 2.13). De igual forma se hizo esta consideración para la natalidad, la mortalidad y la inmigración.

Tabla 2.13. Población para municipios usando densidad de población rural

MUNICIPIO	ÁREA (km ²)	POBLACIÓN RURAL 2005	DENSIDAD (hab/km ²)	ÁREA POMCA (/km ²)	POBLACIÓN POMCA (hab)
Don Matías	180.4	6,307	34.96	35.20	1,231
Guarne	145.9	25,805	176.87	32.73	5,789
San Vicente	241.4	12,420	51.45	71.07	3,657
Santo Domingo	270	9,245	34.24	71.20	2,439
Yolombó	939.40	14,031	14.94	5.73	86

Existen diversos métodos para proyectar la población usando datos de poblaciones anteriores, algunos de ellos se enumeran a continuación.

■ **Métodos matemáticos**

Las proyecciones de la población se realizaron hasta el año 2020 por medio de cinco modelos matemáticos: Método Aritmético, Método Geométrico, Método Variación Logarítmica, Método de la Universidad Nacional y Método de la Tasa Decreciente (Aguas y Aguas y Unalmed, 2004). La formulación matemática de estos métodos se presenta en el Anexo A2.4. En la Figura 2.11 se presenta la proyección de la población total para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá calculada por los anteriores métodos.

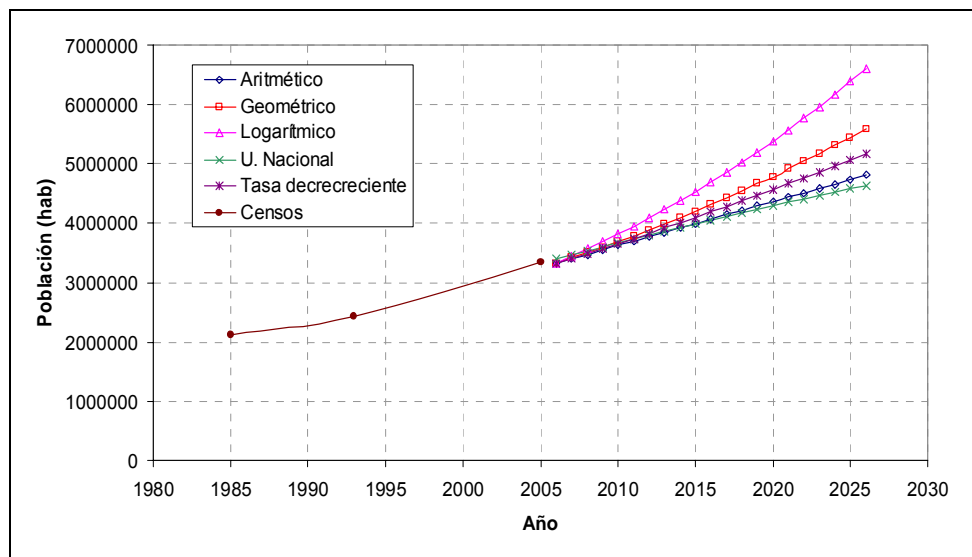


Figura 2.11. Proyección de la población total de la cuenca del río Aburrá.

■ **Dinámica poblacional**

La población en una región no es estática, ésta sufre cambios en el tiempo los cuales se describen mediante el concepto denominado *Dinámica Poblacional*, y hace referencia a aquellas características como: natalidad, mortalidad y flujos de migración. El crecimiento poblacional es el aumento o disminución del número total de individuos de una localidad. Este proceso está determinado por dos factores generales: el primero es inherente a la especie y se fundamenta en mecanismos biológicos, se le conoce como *Potencial Biótico* y consiste en la capacidad de los individuos para reproducirse en condiciones óptimas. El segundo factor es la *Resistencia Ambiental* y se refiere a los factores bióticos y abióticos que impiden a los individuos alcanzar su capacidad de reproducción máxima.

La variación en el crecimiento poblacional se debe a la interacción entre el potencial biótico y la resistencia ambiental que actúa como mecanismo de regulación y control de la velocidad de crecimiento poblacional. Este mecanismo de resistencia ambiental se divide

en dos grupos: *Factores Extrínsecos*, que operan desde el exterior de la población tales como el clima, los recursos alimenticios y las enfermedades y los *Factores Intrínsecos*, los cuales se generan al interior de la población y corresponden a características biológicas, como la conducta social, la territorialidad, entre otros.

Las dinámicas poblacionales permiten comprender los cambios en la estructura de la población en una determinada comunidad a medida que cambian variables demográficas como la tasa de natalidad, mortalidad y migración.

La tasa de emigración no se tuvo en cuenta, debido a que la información existente para esta variable presenta unidades diferentes y que implican hacer una serie de consideraciones subjetivas. La inmigración para la zona del Valle de Aburrá tiene gran impacto en la dinámica poblacional local, actualmente corresponde a familias desplazadas asentadas en la zona de estudio (Personería de Medellín, 2006). La Figura 2.12 presenta la relación entre las variables consideradas en la estimación de la población.

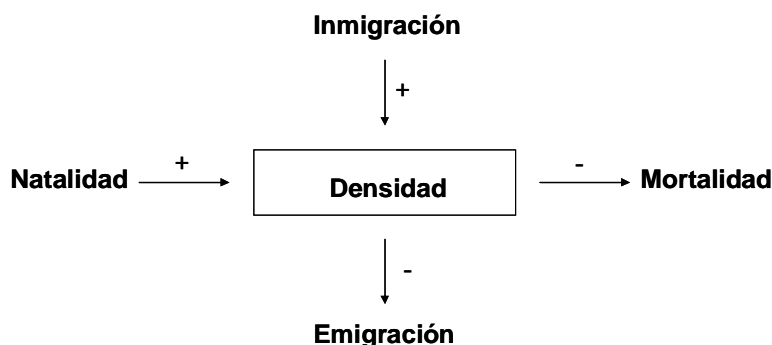


Figura 2.12. Variables del modelo de dinámica poblacional

Las tasas de natalidad y la mortalidad, por cada 1000 habitantes, pueden expresarse de la siguiente manera:

$$Tasa\ de\ natalidad = \frac{Número\ de\ Nacimientos}{Población\ Total} * 1000$$

$$Tasa\ de\ mortalidad = \frac{Número\ de\ Defunciones}{Población\ Total} * 1000$$

- Ecuación para el cálculo de la dinámica poblacional

La estimación de la población se determinó por medio de las siguientes expresiones:

$$PP = p(1+i)^n$$

$$p = PA + FPI + TN - TM$$

Donde:

PP: Población Proyectada

p: Población dinámica actual

PA: Población Actual

FPI: Flujo Población que Inmigra

TN: Tasa Natalidad

TM: Tasa Mortalidad

i: Tasa promedio de crecimiento, calculada a partir de censos anteriores

n: Número años a proyectar

■ Acerca de la Información demográfica

La población actual corresponde a la obtenida en el censo poblacional de 2005 (DANE, 2005) la cual se encontró (total y rural) para los 15 municipios que hacen parte del área de estudio.

Los municipios que se encuentran dentro del área metropolitana, están completamente comprendidos en la Cuenca, así que la población en estos casos se obtiene directamente del censo. Sin embargo en municipios como Don Matías, Guarne, San Vicente, Santo Domingo y Yolombó que sólo tienen una porción de territorio en la Cuenca se supuso que los datos (población actual, natalidad, mortalidad, inmigración) estaban distribuidos de

manera uniforme en toda el área del municipio y se usó el concepto de densidad de población para estimar dichos datos.

Para la estimación de la tasa de mortalidad, se contó con un registro de 1994-2005 (www.dssa.gov.co) tomando para nuestro caso como referencia el valor promedio. Las tasas de natalidad y de inmigración se estimaron como la relación entre el número de nacimientos e inmigraciones y la población total de cada municipio, con el fin de aplicar el concepto de densidad poblacional.

El modelo de dinámica poblacional, estima la población con base en la formulación matemática del interés compuesto, la cual requiere una tasa (i) de crecimiento de la población. En éste caso, se estiman dos tasas de crecimiento anual para cada municipio, una correspondiente a una tendencia histórica que considera los 3 últimos censos (1985, 1993, y 2005), promediando el crecimiento anual de los 2 intervalos y la segunda correspondiente a la tasa de crecimiento considerando la representación actual de la variación, es decir usando solo los censos de 1993 y 2005. Esta metodología permite considerar que no todos los municipios obedecen los mismos patrones de crecimiento, sino que mientras unos tienden a crecer poco, otros crecen aceleradamente y además que en los intervalos de tiempo considerados y teniendo en cuenta los cambios sociales puede haber variación aleatoria de la población. En las Tabla 2.14 y Tabla 2.15 se presentan las tasas de crecimiento para la población total de la Cuenca y la población rural, respectivamente.

Tabla 2.14. Tasas de crecimiento para la población total de la Cuenca

MUNICIPIO	TASA CRECIMIENTO CENSOS (1985-1993-2005)	TASA CRECIMIENTO CENSOS (1993-2005)
Barbosa	0.01680	0.02097
Bello	0.02428	0.02435
Caldas	0.02142	0.02068
Copacabana	0.01833	0.02055
Don Matías	0.01863	0.02547
Envigado	0.02726	0.02845
Girardota	0.02488	0.02695
Guarne	0.02204	0.02665
Itagüí	0.02405	0.01849
La Estrella	0.02540	0.02181
Medellín	0.01733	0.02225
Sabaneta	0.03255	0.03101
San Vicente	-0.00024	-0.00419
Santo Domingo	-0.01889	-0.00444
Yolombó	-0.01247	0.02142

Tabla 2.15. Tasas de crecimiento para la población rural de la Cuenca

MUNICIPIO	TASA CRECIMIENTO CENSOS (1985-1993-2005)	TASA CRECIMIENTO CENSOS (1993-2005)
Barbosa	0.01013	0.01877
Bello	0.01996	0.04477
Caldas	0.02595	0.05119
Copacabana	-0.04893	0.01725
Don Matias	-0.00427	0.02407
Envigado	0.02052	0.00497
Girardota	0.01358	0.02734
Guarne	0.01280	0.03044
Itagui	0.07249	0.06564
La Estrella	-0.06314	0.06500
Medellín	0.04008	0.03270
Sabaneta	0.01885	0.04045
San Vicente	-0.01430	-0.03008
Santo Domingo	-0.01922	-0.00272
Yolombo	-0.02507	0.02813

Puede observarse que las tendencias de crecimiento son diferentes según los censos considerados, lo cual puede explicarse por los cambios que ocurren a nivel social y que limitan el desarrollo de un municipio y la distribución espacial de sus habitantes. Teniendo en cuenta los datos de población de 1993 y 2005 se obtienen tasas de crecimiento mayor.

2.4.3 Proyección de la población

Las Tabla 2.16 y Tabla 2.17 resumen los resultados obtenidos para la proyección de la población en los diferentes municipios (cuenca total y rural) usando la tasa de crecimiento de los dos últimos censos, dado que en cuanto a demanda de agua es la condición más crítica. Las poblaciones total y rural en toda la Cuenca pueden observarse en las Figura 2.13.

Tabla 2.16. Población total de la Cuenca del río Aburrá, estimada mediante el método de dinámica poblacional hasta el año 2025

MUNICIPIOS	AÑO								
	2005	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2019	2025
Barbosa	42,547	46,111	48,066	50,103	52,227	54,440	56,748	60,394	68,403
Bello	373,013	390,559	409,812	430,015	451,214	473,457	496,797	533,983	616,911
Caldas	68,157	70,378	73,320	76,384	79,577	82,903	86,368	91,838	103,842
Copacabana	61,421	63,812	66,462	69,222	72,096	75,090	78,209	83,131	93,923
Don Matías	1,231	1,291	1,359	1,431	1,506	1,585	1,669	1,803	2,103
Envigado	175,337	180,759	191,189	202,221	213,890	226,232	239,286	260,293	308,002

MUNICIPIOS	AÑO								
	2005	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2019	2025
Girardota	42,818	44,514	46,945	49,509	52,213	55,065	58,072	62,894	73,773
Guarne	5,789	5,991	6,306	6,638	6,988	7,356	7,744	8,363	9,756
Itagui	231,768	239,131	248,054	257,310	266,912	276,871	287,202	303,426	338,676
La Estrella	52,763	55,093	57,522	60,058	62,706	65,470	68,357	72,927	83,004
Medellín	2,223,660	2,380,082	2,487,161	2,599,059	2,715,990	2,838,183	2,965,873	3,168,259	3,615,406
Sabaneta	44,874	46,772	49,718	52,850	56,179	59,718	63,480	69,571	83,564
San Vicente	3,657	3,910	4,116	4,333	4,561	4,801	5,054	5,458	6,367
Santo Domingo	2,439	2,694	2,835	2,985	3,142	3,307	3,482	3,760	4,386
Yolombo	86	92	96	101	107	112	118	128	149
TOTAL	3,329,560	3,531,187	3,692,962	3,862,219	4,039,306	4,224,591	4,418,457	4,726,228	5,408,265

Tabla 2.17. Población rural de la Cuenca del río Aburrá, estimada mediante el método de dinámica poblacional hasta el año 2025

MUNICIPIOS	AÑO								
	2005	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2019	2025
Barbosa	23,826	25,767	26,743	27,757	28,808	29,900	31,033	32,813	36,686
Bello	13,609	14,534	15,864	17,317	18,902	20,632	22,521	25,683	33,401
Caldas	15,525	16,511	18,244	20,160	22,276	24,615	27,200	31,594	42,626
Copacabana	8,388	8,686	8,989	9,301	9,625	9,960	10,306	10,849	12,021
Don Matías	1,231	1,289	1,351	1,417	1,486	1,559	1,635	1,756	2,025
Envigado	8,595	8,659	8,745	8,832	8,921	9,010	9,099	9,236	9,515
Girardota	17,623	18,328	19,344	20,416	21,547	22,742	24,002	26,025	30,596
Guarne	5,789	6,017	6,388	6,783	7,203	7,648	8,121	8,885	10,637
Itagui	22,270	24,042	27,302	31,004	35,208	39,982	45,403	54,944	80,462
La Estrella	24,225	26,364	29,903	33,916	38,469	43,632	49,488	59,779	87,225
Medellín	129,771	140,320	149,647	159,594	170,202	181,515	193,580	213,198	258,600
Sabaneta	9,346	9,831	10,643	11,521	12,472	13,502	14,616	16,463	20,885
San Vicente	3,657	3,799	3,574	3,362	3,163	2,975	2,799	2,554	2,126
Santo Domingo	2,439	2,543	2,529	2,515	2,502	2,488	2,475	2,454	2,415
Yolombo	86	92	97	102	108	114	121	132	155
TOTAL	286,380	306,782	329,364	353,999	380,892	410,274	442,399	496,364	629,375

Es importante tener en cuenta que la metodología de dinámica poblacional es un método que requiere información actualizada, de ahí que las proyecciones para periodos superiores a 9 años deben ser utilizadas con cuidado.

Se destaca que la población y las tasas de crecimiento para los municipios Don Matías, Guarne, San Vicente, Santo Domingo y Yolombó son las mismas para el modelo de población total y para el rural, dado que estos municipios sólo tienen áreas rurales en la zona de estudio. Algunas tasas de crecimiento rural presentan valores negativos indicando desplazamiento de familias de áreas rurales hacia los centros urbanos (por lo general en búsqueda de mejores oportunidades laborales o por motivos de orden público).

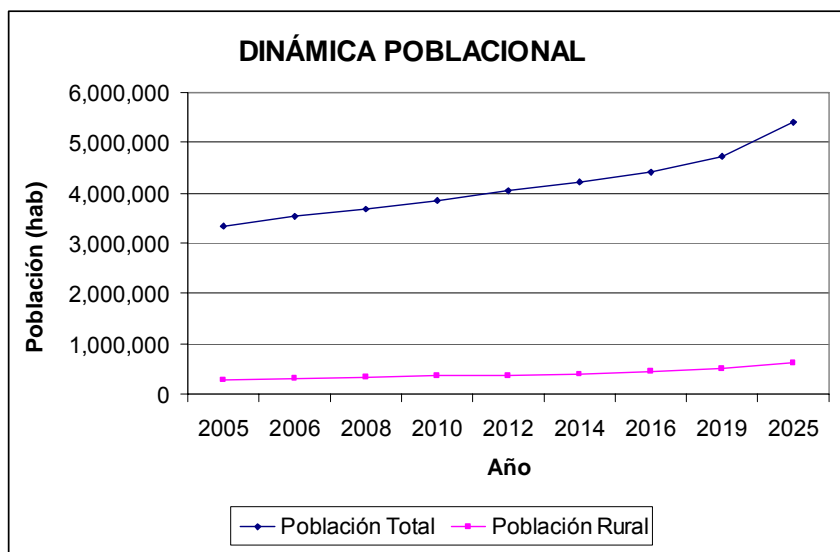


Figura 2.13. Proyección para la población total y rural de la Cuenca según dinámica poblacional

■ **Comparación de resultados**

Una comparación de las proyecciones de la población usando diferentes metodologías se presenta en las Figura 2.14. En éstas se descartan los métodos Logarítmico y Geométrico por presentar valores muy diferentes a los demás.

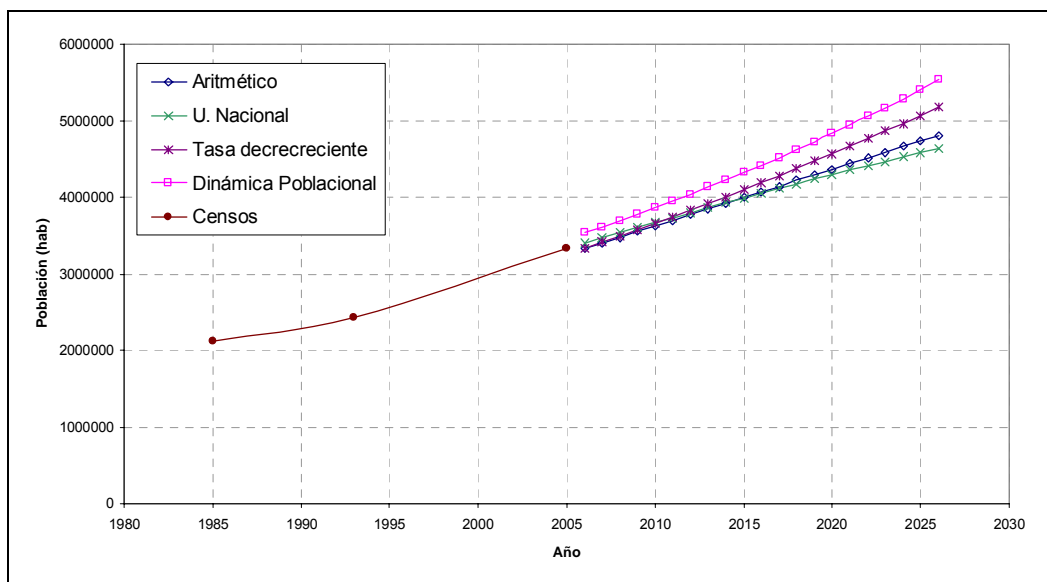


Figura 2.14. Comparación de la metodología de Dinámica Poblacional con otros métodos para las proyecciones en la Cuenca del río Aburrá

Se puede observar que en general las proyecciones evaluadas con las diferentes metodologías presentan valores similares, siendo *Dinámica Poblacional* el método con los valores más altos. Por esta razón y teniendo en cuenta que dicho modelo relaciona las variables propias de la Cuenca (además el horizonte de planificación es de mediano plazo) se considera que este método puede representar en buena medida el funcionamiento de la población en la Cuenca del río Aburrá. Sus proyecciones se usaron para la estimación de la demanda de agua potable.

2.4.4 Cálculo de la demanda de agua potable

La estimación futura o proyección de los consumos de agua, se realizó con la finalidad de formular posibles escenarios de demanda de agua potable en la Cuenca en un horizonte de 13 años (hasta el año 2020).

- **Escenarios de dotación para la proyección de la demanda**

Se plantearon tres escenarios de dotación: Un escenario positivo (Escenario 1), el cual supone un uso eficiente del recurso y una consecuente disminución en la dotación (disminuye un 15%); un escenario normal (Escenario 2), donde se considera que el consumo permanece estable en el tiempo; y un escenario negativo (Escenario 3), donde el consumo se incrementa debido a la no racionalización del agua (aumenta un 15%).

El dato de dotación actual (Escenario 2), fue calculado a partir de información histórica (1995-2006) del sistema total de acueducto suministrada por EEPPM. En la Figura 2.15 se presentan las dotaciones estimadas con base en los consumos totales de cada año, donde el promedio histórico corresponde a 211 l/hab/día. Se observa claramente una tendencia decreciente en la dotación admitiendo la posibilidad de escenarios de uso eficiente y racional del recurso. Las dotaciones netas asumidas en cada escenario, se presentan en la Tabla 2.18.

Tabla 2.18. Dotación neta asumida para el cálculo de la demanda de agua

(L/hab/día)	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Dotación	242	211	180

En los tres escenarios de dotación se plantea un decrecimiento de las pérdidas en el sistema, que actualmente son del 35.47%, esperando que en el año 2020 se alcancen un 34.47 % de pérdidas totales, de éste modo, se presume una disminución anual del 0.077% en las pérdidas totales (Área normalización y Soporte aguas, EEPPM, 2007).

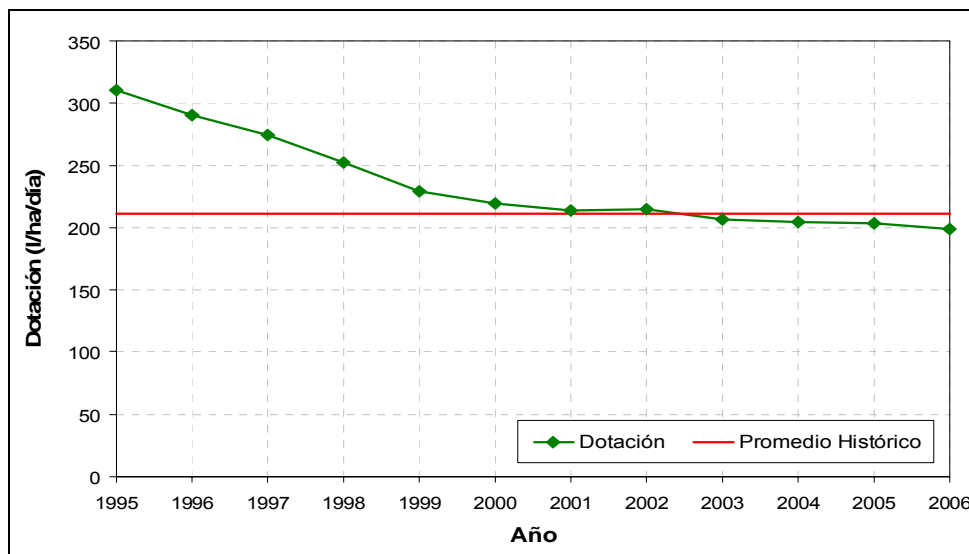


Figura 2.15. Dotaciones históricas estimadas: base consumos totales sistema de acueducto.
Fuente: EEPPM, 2006

En la Figura 2.16 y la Tabla 2.19 se presentan los resultados de la demanda de agua potable para los habitantes de la Cuenca del río Aburrá, considerando que tanto los usuarios rurales como urbanos tienen la misma dotación de agua diaria.

Tabla 2.19. Proyección de demanda de agua potable para habitantes de la Cuenca del río Aburrá

AÑO	DEMANDA DE AGUA (m ³ /s)		
	ESCENARIO 1 PESIMISTA	ESCENARIO 2 TENDENCIAL	ESCENARIO 3 OPTIMISTA
2005	11.3	9.8	8.4
2006	11.9	10.4	8.9
2007	12.2	10.7	9.1
2008	12.5	10.9	9.3
2009	12.8	11.1	9.5
2010	13.1	11.4	9.7
2011	13.3	11.6	9.9
2012	13.6	11.9	10.1
2013	13.9	12.2	10.4
2014	14.2	12.4	10.6
2015	14.6	12.7	10.8
2016	14.9	13.0	11.1
2017	15.2	13.3	11.3
2018	15.5	13.5	11.6
2019	15.9	13.8	11.8
2025	20.0	17.4	14.9

Sabiendo que la capacidad instalada de las plantas de tratamiento de agua de EEPMP es de 17.25 m³/s, se puede concluir que es suficiente para abastecer la demanda de agua potable en la cuenca durante todo el horizonte de planificación, inclusive en el escenario tendencial de uso del recurso hídrico.

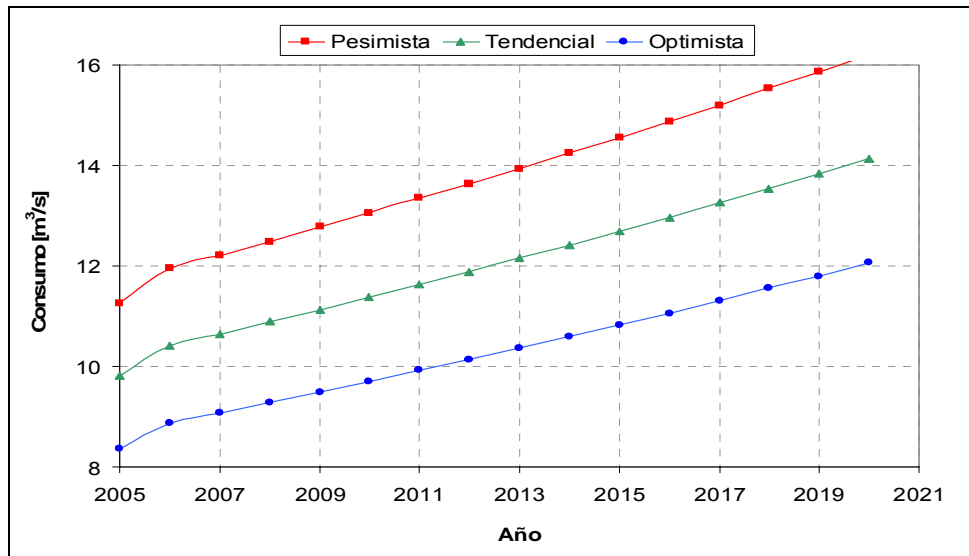


Figura 2.16. Proyección de la demanda de agua para habitantes de la Cuenca del río Aburrá.

2.4.5 Disponibilidad de agua potable en la Cuenca

Un alto porcentaje del agua consumida en la Cuenca del río Aburrá es importada de cuencas vecinas, generándose una condición de dependencia hídrica ya que la cantidad de agua producida al interior de la Cuenca para su consumo interno es realmente baja. En general el consumo de agua de fuentes internas se da en la zona rural de la Cuenca, de las cuales algunas son ilegales. Con el fin de caracterizar la disponibilidad de agua potable en la Cuenca se utilizó información de las captaciones que se hacen directamente en la red.

- **Plantas de tratamiento de agua potable**

Para distribuir el agua potable en la población del Valle de Aburrá, EEPMP cuenta con diez plantas de tratamiento para abastecer la demanda. En la Figura 2.17 (mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: “1LB”, objeto: “AG_Planta_tratamiento”) se presenta la distribución espacial de dichas plantas. De éstas, seis toman el agua de la Cuenca del río Aburrá, dos de agua de cuencas externas y las dos restantes utilizan agua interna y externa a la Cuenca. La capacidad instalada de estas plantas es de 17.25 m³/s. Las plantas de tratamiento que utilizan agua de la

Cuenca del río Aburrá tienen una capacidad instalada que corresponde al 4% de la capacidad total. Las plantas de tratamiento que usan agua de cuencas externas tienen embalse, lo cual permite la regulación de los caudales. Las Tabla 2.20 y Tabla 2.21 presentan las capacidades de las diferentes plantas de tratamiento y las quebradas de las cuales se surten.

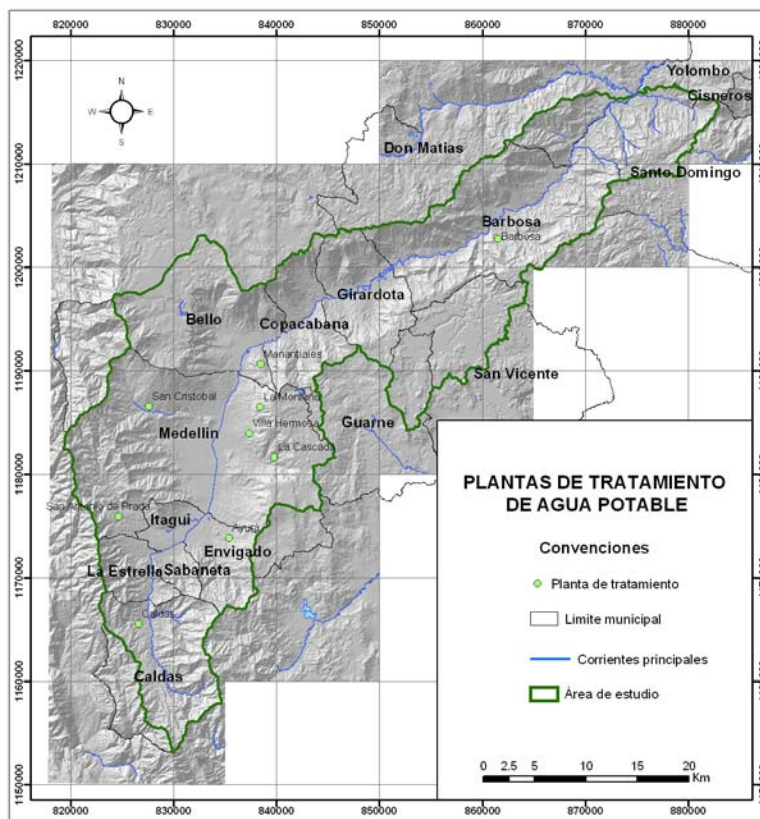


Figura 2.17. Ubicación de las plantas de tratamiento de aguas en la Cuenca del río Aburrá

Tabla 2.20. Plantas de tratamiento que usan agua del interior de la Cuenca

PLANTA	CAPACIDAD INSTALADA (m ³ /s)	FUENTES	EMBALSE
La Cascada	0.10	Q. Sta. Helena	
San Cristóbal	0.23	Q. la Iguana Q. La Puerta Q. La Tenche	
San Antonio de Prado	0.10	Q. Doña María Q. La Manguala Q. Despensas	
Aguas Frías	0.03	Q. La Picacha	

PLANTA	CAPACIDAD INSTALADA (m ³ /s)	FUENTES	EMBALSE
Barbosa	0.06	Q. El Viento Q. La López	
Caldas	0.20	Q. La Valeria Q. La Reventota	
Villa Hermosa	0.95	Q. La Honda Q. Piedras Blancas Q. Chorrillos	Piedras Blancas (1.2 Mm ³)
La Montaña	0.38	Q. La Honda Q. Piedras Blancas Q. Chorrillos	Piedras Blancas (1.2 Mm ³)
TOTAL	2.05		

Fuente: Restrepo, 2001.

Tabla 2.21. Plantas de Tratamiento que usan agua de cuencas externas

PLANTA	CAPACIDAD INSTALADA (m ³ /s)	FUENTES	EMBALSE
Ayurá	9.2	Río Buey Río Piedras Río Pantanillo Q. Las Palmas Q. Potrero	La Fé (12,1 Mm ³)
Manantiales	6.00	Río Grande Río Chico	Río Grande II (150.9 Mm ³)
TOTAL	15.2		

Fuente: Restrepo, 2001.

Cabe destacar, que aunque las plantas que se surten de agua de la Cuenca trabajaran al 100% de su capacidad, sólo cubrirían el 27% de la demanda total de la Cuenca, la cual actualmente es de aproximadamente 9 m³/s.

Se hace evidente que para poder suplir las necesidades de agua potable de los habitantes de la Cuenca del río Aburrá, es preciso importar agua de cuencas vecinas (Figura 2.18, mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: “2DG”, objeto: “AG_Cuenca_aportante”), almacenándose en grandes embalses y distribuyéndose hacia las plantas de tratamiento. De hecho, la distribución de agua potable sería imposible en el sur del Valle de Aburrá sin la Planta Ayurá, y en el Norte sin la planta Manantiales.

2.4.6 Acueductos comunitarios

Dentro del análisis de disponibilidad de agua en la Cuenca se hizo un inventario de los acueductos comunitarios existentes en la Cuenca del río Aburrá. El inventario se realizó a través de visitas a las respectivas autoridades ambientales y oficinas administrativas de los municipios, donde el funcionario encargado del tema suministró la información sobre el

servicio en su unidad territorial. La base de datos obtenida se presenta en el anexo, apartado A2.5.14 y en la geodatabase del POMCA, y un análisis legal y social de este tema se presenta en el Anexo A2.5.

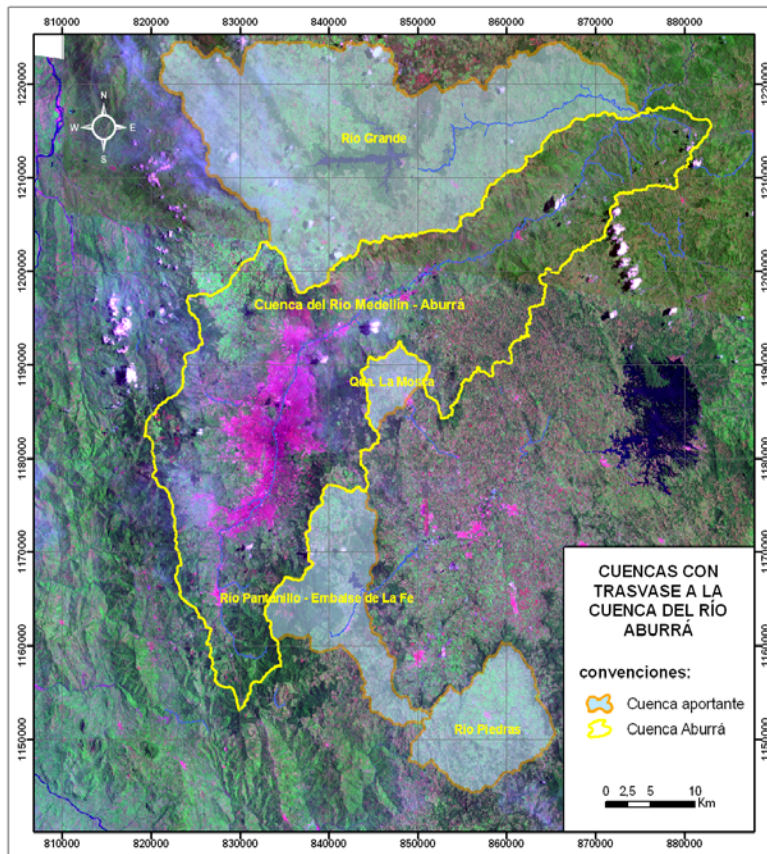


Figura 2.18. Cuencas externas que abastecen la Cuenca del río Aburrá

En cada unidad se recopilaban los datos disponibles respecto al nombre del acueducto y de la fuente donde se capta el agua, coordenadas de la captación (o en su defecto, del sitio donde se distribuye el agua), caudal de la fuente y caudal otorgado, número de usuarios, presencia de macromedidores y micromedidores y tipo de tratamiento (sedimentación, floculación, filtración, cloración). Esto no quiere decir que la base de datos resultante contenga información sobre la totalidad de estos campos, pues los niveles de seguimiento a los sistemas son muy variables.

Con el fin de facilitar un futuro trabajo de campo detallado, cuya logística permita la visita a cada uno de los acueductos, también se recopilaban datos sobre el nombre del administrador del acueducto, dirección y teléfono. Obtener información sobre tarifas, subsidios, cumplimiento de la normatividad definida por la superintendencia, condiciones

administrativas y técnicas, requeriría visitas a cada uno de los acueductos, actividad que estuvo por fuera del alcance de este trabajo.

La importancia de este inventario radica en que la falta de información, control y vigilancia sobre estos sistemas es notable, dado su número y dispersión. Según la Superintendencia de Servicios Públicos en Colombia existen unos 12,000 sistemas comunitarios que deberían estar registrados en la base de datos de la Superintendencia de Servicios Públicos denominada Sistema Único de Información, SUI, sin embargo, en dicho sistema no hay más de 600 registros, de manera que el inventario local de los mismos, es una actividad indispensable para definir herramientas de gestión, sobre un sistema cuya magnitud no solo alcanzará a percibirse con un trabajo de campo detallado.

Al observar la base de datos resultante podrá notarse que el nivel de información en cada uno de los municipios es muy heterogéneo. En la Tabla 2.22 se describen las fuentes de información para cada caso. Además se consultó el SUI de la Superintendencia del Servicios Públicos, donde solo se encuentran inscritos 44 de los 287 acueductos inventariados.

Tabla 2.22. Fuentes de información para el inventario de acueductos comunitarios en la Cuenca

MUNICIPIO	FUENTE DE INFORMACIÓN SOBRE ACUEDUCTOS COMUNITARIOS
Caldas	Alcaldía Municipal
La estrella	Alcaldía Municipal
Sabaneta	Alcaldía Municipal
Itagüí	Estudio para la reglamentación del aprovechamiento y uso de las aguas de la Cuenca Doña María, Universidad Nacional, 2007
Envigado	Alcaldía Municipal
Medellín	Alcaldía Municipal, Área Metropolitana del Valle de Aburrá
Bello	Alcaldía Municipal
Girardota	Alcaldía Municipal
Copacabana	Alcaldía Municipal
Barbosa	Alcaldía Municipal
Don Matías	Cornare
Guarne	Cornare

Igualmente cabe notar que los datos sobre concesiones de agua con los que cuentan las autoridades ambientales presentan poca concordancia con la situación real. Durante el desarrollo de Planes de Ordenamiento de Cuencas a cargo del Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Facultad de Minas, Universidad Nacional

de Colombia Sede Medellín (casos específicos Quebradas Doña María, La Aguacatala y La Iguañá), se ha encontrado una mínima correlación (10%) entre las captaciones reales y los datos oficiales de las entidades ambientales.

■ **Abastecimiento de agua en la Cuenca del río Aburrá, autoconsumo e importación del recurso**

Según la información expuesta en este capítulo, dedicado al componente agua, la proporción del agua importada en la Cuenca es mucho mayor que la utilizada de sus propias fuentes (83% del agua potable abastecida por EEPPM). Datos específicos indican que las plantas de tratamiento de EEPPM tienen una capacidad instalada de 17.25 m³/s.

Se precisa que EEPPM tiene asegurada la oferta hídrica para la población urbana del Valle de Aburrá por 20 años más (teniendo en cuenta la capacidad instalada de las plantas de tratamiento), sin embargo, por fuera de su área de cobertura, se usa necesariamente el agua del interior de la Cuenca. En algunos sectores, a pesar de existir la posibilidad de contar con el servicio de EEPPM, se recurre a fuentes propias y en otros, se cuenta con los dos servicios: el agua de EEPPM y el servicio de acueductos locales. Ocurre también que ambas fuentes compartan la misma tubería, con la consecuente contaminación del agua de mejor calidad.

El inventario los acueductos comunitarios en el área de la Cuenca (Figura 2.19, mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: “1LB”, objeto: “AG_Acueducto_veredal”), muestra que son más de 36,000 los suscriptores de acueductos locales, es decir, unas 160,000 personas consumiendo el agua suministrada a través de estos sistemas. Se aclara que éste es un dato subestimado, porque la información es dispersa y en muchos casos no está completa. De acuerdo con el reporte de las concesiones, el caudal total otorgado a los sistemas comunitarios para el consumo doméstico es 0.76 m³/s. Con una dotación diaria de 211 l/hab/día y una de 242 l/hab/día (escenario pesimista) este caudal sería suficiente para una población cercana a las 311,200 y 271,300 personas respectivamente.

La Tabla 2.23 muestra el número de acueductos comunitarios por municipio dentro de la Cuenca. Podría decirse que el número de sistemas comunitarios está relacionado con la densidad de población, sin que haya otras variables como oferta hídrica mediando en esta distribución.

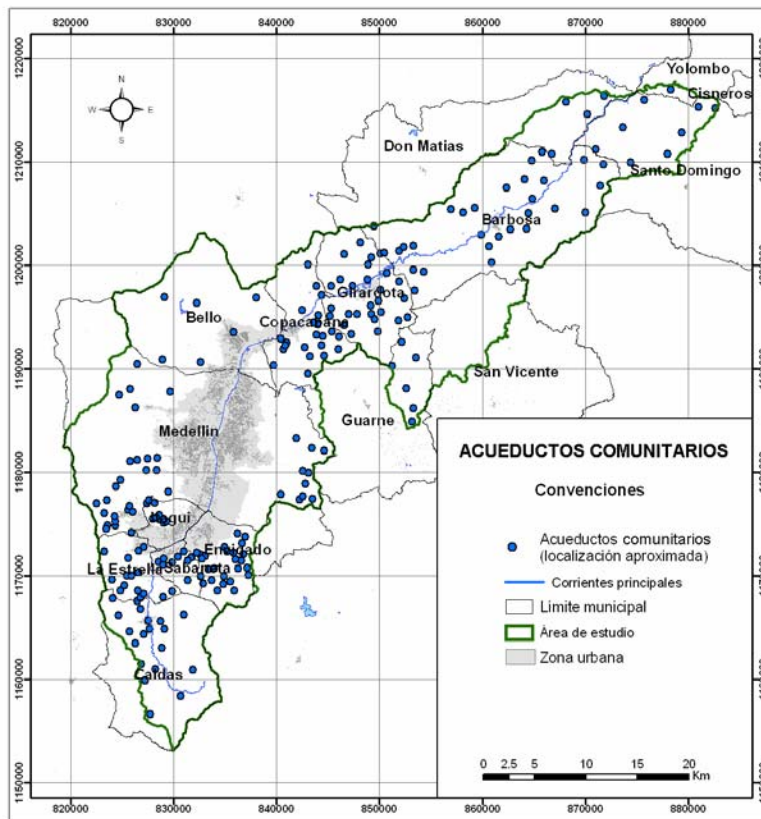


Figura 2.19. Ubicación de los acueductos comunitarios en la Cuenca del río Aburrá

Tabla 2.23. Número de acueductos comunitarios por municipio

MUNICIPIO	No DE ACUEDUCTOS COMUNITARIOS
Caldas	19
Sabaneta	9
La Estrella	18
Envigado	35
Itagüí	43
Medellín	49
Bello	7
Copacabana	35
Girardota	26
Guarne	8
Barbosa	26
Don Matías	6
Santo Domingo	8

Sólo en Medellín se rompe esta relación, donde la presencia histórica del servicio suministrado por EEPPM es la explicación a poca presencia de las organizaciones comunitarias. En el caso de Bello, el número reducido de acueductos obedece

principalmente a falta de información. En la 0 (mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: “1LB”, objeto: “AG_Acueducto_veredal”) se muestra la ubicación de los acueductos por zonas (Sur, centro y norte).

Las características de estos sistemas comunitarios son muy diversas, algunos atienden 600, 800, 1,500 o más usuarios, otros se ocupan de pequeñas poblaciones de menos de 100 viviendas. El mayor número corresponde a acueductos con menos de 300 usuarios. (Tabla 2.24).

Tabla 2.24. Caracterización de los acueductos de la Cuenca, según el número de usuarios

USUARIOS	NÚMERO DE ACUEDUCTOS
Menos de 100	73
Entre 100 y 300	54
Entre 300 y 500	9
Más de 500	16

Al comparar el caudal otorgado a los sistemas con el número de usuarios de los mismos (Tabla 2.25), se encuentra que las dotaciones asignadas para cada habitante superan muy ampliamente la dotación promedio de un usuario de la zona urbana (211 litros/hab/día). Hay municipios como Sabaneta, Envigado o Barbosa donde las dotaciones a pesar de ser altas, son menores que en los demás. La explicación a ello se sustenta en una mayor demanda de la población. Durante la etapa de diagnóstico, se estimó un índice de escasez (sección 2.4.10) para aquellas áreas dependientes del agua de la Cuenca. Los resultados mostraron que hay zonas críticas en la cuencas de La Doctora (Sabaneta, municipio con la más baja dotación) y La Jabalcona (Itagüí).

Tabla 2.25. Dotación de agua para usuarios de los diferentes sistemas por municipio

MUNICIPIO	ASIGNACIÓN DE AGUA POR USUARIO (l/hab/día)
Caldas	1,230.65
Sabaneta	543.19
La Estrella	1,173.25
Envigado	785.60
Itagüí	Sin suficiente información
Medellín	1,453.52
Bello	Sin suficiente información
Copacabana	Sin suficiente información
Girardota	Sin suficiente información
Guarne	Sin suficiente información
Barbosa	776.51
Don Matías	1,173.25

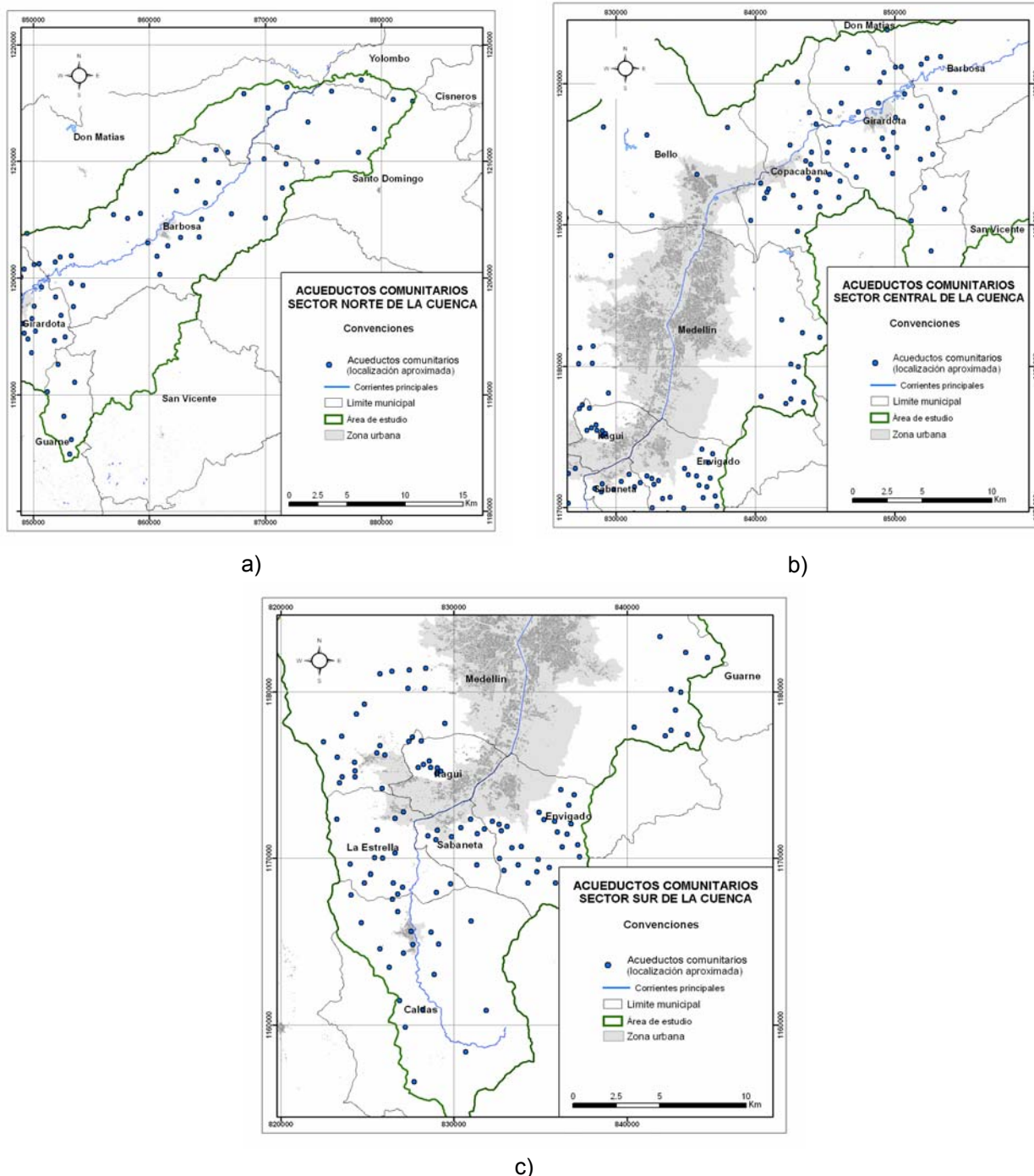


Figura 2.20. Ubicación de los acueductos comunitarios por zonas. (a) Zona Norte, (b) Zona Centro y (c) Zona Sur

Los altos valores encontrados en la dotación por habitante en los municipios donde la información disponible permite hacer el cálculo, obedecen a las características de los sistemas comunitarios y a problemas inherentes a la falta de información (tiempo de captación y características del sistema de distribución y almacenamiento). En el caso de los sistemas como tal los bajos costo del servicio y la común ausencia de micromedidores estimulan el uso irracional del recurso. En muchas ocasiones las canillas permanecen abiertas todo el día, el agua se utiliza para barrer las calles, lavar vehículos, regar prados y pequeñas plantaciones.

Sobre la calidad del agua suministrada se debe anotar que se carece de información suficiente para obtener conclusiones. Las respectivas secretarías de salud de cada municipio son los entes encargados de hacer control al respecto y sería necesario recopilar ésta información para obtener elementos adecuados para el análisis, sin embargo, la percepción que se tiene en campo, es que algunos sistemas cumplen con las normas de potabilidad –especialmente aquellos con mayor número de usuarios-, pero la mayoría de ellos no alcanza los parámetros mínimos de calidad. Muchos presentan algún tipo de tratamiento sin que ello signifique el logro de la potabilización (Tabla 2.26).

La información referente al municipio de Envigado evidencia buenas condiciones de potabilidad en la mayoría de los casos, el porcentaje expuesto en la tabla es menor al de otros municipios, probablemente porque en allí se tiene registrado un alto número de pequeños abastos.

Tabla 2.26. Porcentaje de usuarios que reciben agua tratada, por municipio

MUNICIPIO	% DE USUARIOS QUE RECIBEN AGUA CON TRATAMIENTO
Caldas	27
Sabaneta	100
La Estrella	sin información
Envigado	47
Itagüí	No hay suficiente información
Medellín	No hay suficiente información
Bello	sin información
Copacabana	51
Girardota	66
Guarne	sin información
Barbosa	60
Don Matías	100

Entiéndase que agua tratada no significa agua potabilizada.

La principal conclusión que se obtiene a partir de la información recopilada, es que el aporte de las comunidades locales a la prestación del servicio de acueducto es muy

significativo, pero sobre todo, que en la Cuenca del río Aburrá se está subutilizando el recurso hídrico disponible para el consumo. Los acueductos comunitarios son actualmente elementos claves en el abastecimiento de agua en zonas periurbanas y rurales.

La calidad del servicio es muy variable, pero no solo depende de la administración de los sistemas sino de las condiciones ambientales en las Cuencas abastecedoras. En este mismo sentido, se anota que el gran potencial relacionado con la oferta hídrica, estaría condicionado por escenarios de calidad del recurso y esta a su vez, con la gestión ambiental en cada una de las microcuencas.

El trabajo realizado evidencia además que no se cuenta con información que permita plantear una detallada propuesta de gestión sobre el servicio comunitario de acueducto en la Cuenca. La importancia de estas instituciones comunitarias y su significativa participación en el servicio de acueducto del sector periurbano y rural, además de la alta variabilidad entre las características de unos y otros acueductos, son una invitación a ampliar y mejorar la base de datos resultado de este trabajo.

▪ **Conflictos entre uso del suelo y uso del agua con respecto a los acueductos comunitarios**

Existe una relación indiscutible entre las condiciones ambientales en la Cuenca que abastece un acueducto y su sostenibilidad a mediano y largo plazo. En la Cuenca del río Aburrá hay conflictos asociados a incompatibilidades entre el uso del suelo y la necesidad de abastecimiento de agua a través de fuentes locales. A continuación se presenta una lista de situaciones recurrentes enunciadas por los administradores de los acueductos, funcionarios de las administraciones municipales y usuarios de los sistemas. Se trata de una enumeración de carácter muy general que reúne problemas comunes y de variable importancia según condiciones locales:

- Contaminación del agua por presencia de zonas de explotación porcícola, avícola o ganadera, siendo particularmente impactante la actividad ganadera cuando se acompaña de la costumbre de fertilizar potreros utilizando para el riego aguas enriquecidas con porquinaza.
- Contaminación del agua por agroquímicos, especialmente en cultivos de papa y cebolla.
- Utilización del agua de las fuentes para el riego de zonas agrícolas. En épocas de verano es común la suspensión temporal del servicio por la destinación del recurso hídrico para el riego de cultivos aguas arriba de las bocatomas.

- Contaminación por aguas servidas de uso doméstico.
- Significativo aporte de sedimentos debido a la construcción de carreteras, manejo inadecuado de taludes, urbanización y diversos usos del suelo que favorecen la generación de procesos erosivos.
- Dificultades para establecer convenios para la protección de zonas cercanas a las fuentes de agua, con propietarios de áreas de nacimiento y zonas de retiro.
- Dificultades en el manejo de servidumbres para el paso de tuberías de conducción. Los propietarios de los terrenos restringen el acceso para actividades de mantenimiento a las redes o se oponen a permitir el paso de las mismas. En ocasiones las servidumbres se hacen costosas o las autoridades no tienen la capacidad de gestión que permita el paso de las redes por algunos predios.
- Incumplimiento de las directrices que obligan a los municipios a adquirir tierras en las partes altas de las cuencas abastecedoras de acueductos para el cuidado del recurso hídrico.
- Los casos de sobre-demanda del recurso en zonas donde no es posible contar con el servicio de EEPPM ya empiezan a surgir dentro de la cuenca. El ejemplo más significativo es el del municipio de Sabaneta, donde los proyectos de expansión urbanística riñen con la oferta hídrica. La principal constructora del municipio ha optado por tratar de constituir una empresa privada de acueducto para garantizar el servicio a las nuevas viviendas, sin embargo, la concesión de agua otorgada pone en peligro las posibilidades de expansión de las redes comunitarias.
- La información recopilada no permite relacionar presencia de enfermedades infecciosas con la calidad del agua suministrada, sin embargo, se espera que esta sea una situación frecuente en zonas donde no hay condiciones óptimas de potabilidad.

■ Cuerpos de agua

En la Cuenca del río Aburrá existen cuerpos de agua artificiales y naturales, tales como lagos y lagunas, que se usan con fines de abastecimiento, recreación, conservación biótica y generación de energía. Las características generales de estos cuerpos de aguas varían con su uso y ubicación, dependiendo de la geomorfología de la zona y de su origen natural o antrópico. La realidad es que se encuentra muy poca información en los centros

de documentación y bibliotecas, relacionada con la caracterización física de dichos cuerpos de agua.

En la Cuenca del río Aburrá se encuentran además, muchos lagos que se han generado a partir del abandono de la explotación de material de playa (sobretudo en la zona norte) lo que se ha convertido en un problema para la gestión ambiental, dado que no existen políticas claras sobre el carácter de estas áreas abandonadas, además, algunas empresas mineras los usan para extraer agua o como parte del proceso de sedimentación de los efluentes de procesos de lavados.

Dentro de los cuerpos de agua más importantes se tienen:

- El embalse de Piedras Blancas: de tipo antrópico y con fines de abastecimiento y generación de energía; actualmente este embalse se encuentra con problemas de sedimentación, por lo que ha perdido un alto porcentaje de capacidad de almacenamiento, 1.2 millones de m³ (Restrepo, 2001) y 550 mil m³ (EPPM, 2005).
- Embalse construido por Fabricato en la quebrada La García: ubicado en la parte rural del municipio de Bello, con una capacidad de 2 millones de m³ y una extensión de 300 hectáreas, del cual Fabricato consume agua para sus procesos industriales y genera energía para su planta en Bello.
- El lago del Parque Norte y el del Jardín Botánico: Ubicados en la zona urbana de Medellín, los cuales son producto de explotación minera, PIT (fosas de explotación abandonadas). Actualmente estos cuerpos de agua están siendo caracterizados por consultores independientes y por la Universidad de Antioquia. El lago del Parque Norte es para uso recreativo, restringido a recreación sin contacto directo con el mismo, dada su alta contaminación bacteriana (Metroparques, 2007), aun cuando en estas condiciones de calidad tienen fauna acuática como peces y patos. Para la mejora de las condiciones de calidad de este se tienen priorizados 3 proyectos investigativos (por la Universidad de Antioquia) orientados a la mejora de la calidad, identificación del origen de la contaminación y un análisis epidemiológico de sus aguas dado el uso. En el lago del Jardín Botánico, recientemente se realizó un análisis físico-biótico para definir pautas de manejo y conservación del mismo; este lago ha sido de gran interés entre los estudiantes de limnología de la Universidad de Antioquia, por lo que se encuentran diferentes trabajos sobre este cuerpo de agua.

Dados los variados usos que se le dan a estos lentes de agua es necesario tenerlos en cuenta dentro de la gestión integral del agua, considerando su manejo y monitoreo, desde

el punto de vista de estabilidad estructural, capacidad e influencia ambiental en su entorno.

2.4.7 Análisis de caudales mínimos para las cuencas externas abastecedoras del recurso hídrico.

Teniendo en cuenta la dependencia hídrica del Valle de Aburrá de las cuencas aledañas, se realizó el análisis de los caudales mínimos para las cuencas externas abastecedoras y se definió el caudal regulable por los embalses, esto con el fin de visualizar el escenario que eventualmente pueda presentarse como el más desfavorable y así diseñar un plan contingencia para resolver el déficit.

EEPPM con el fin de prestar un servicio oportuno y confiable ha recurrido a diversas fuentes de abastecimiento, situadas en el norte y oriente antioqueño. (Figura 2.21, mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: “2DG”, objeto: “AG_Cuenca_aportante”)

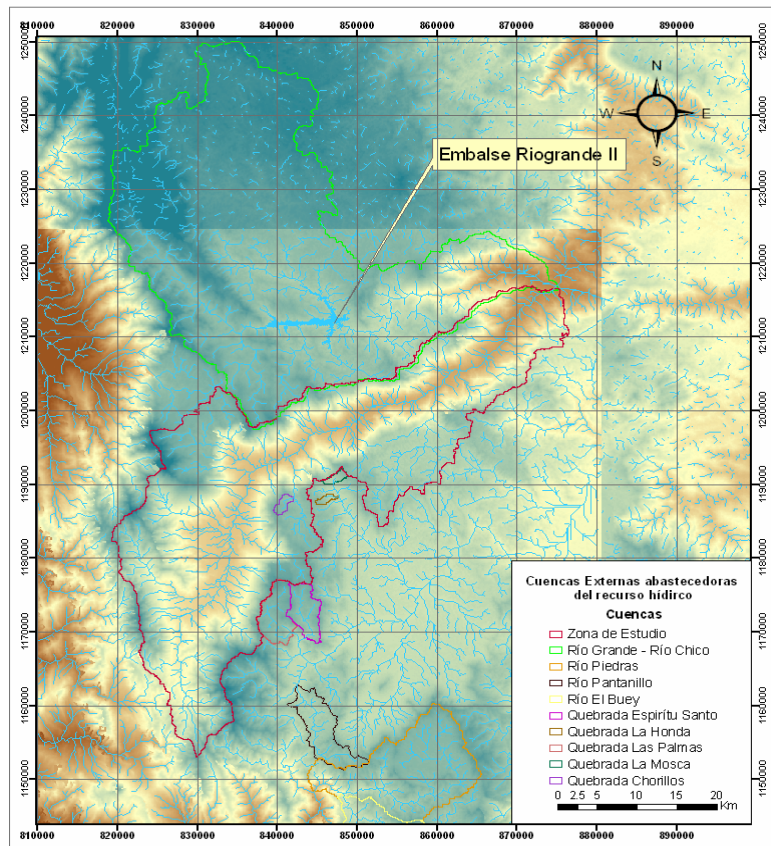


Figura 2.21. Ubicación de las cuencas externas abastecedoras del recurso hídrico

Los siguientes son los embalses que proveen el agua para gran parte de la zona rural del Valle de Aburrá.

El embalse de Riogrande II que se encuentra ubicado al Norte del departamento de Antioquia y posee una capacidad total de almacenamiento de 240 millones de metros cúbicos. Sus principales afluentes son los ríos Grande, Chico y la quebrada Las Ánimas. A diferencia de los demás embalses de EEPPM, en éste se realiza un aprovechamiento múltiple ya que sus aguas se utilizan en la generación de energía, abastecimiento de agua potable y mejoramiento ambiental. Las aguas aprovechadas por la central de Niquía, son conducidas hasta la planta de tratamiento de Manantiales para abastecer con agua potable a una porción muy importante de los habitantes del municipio de Medellín, Bello, Itagüí, Envigado y Sabaneta, a través del sistema interconectado de acueducto (EEPPM, 2005).

El embalse La Fe está ubicado en el oriente del departamento de Antioquia y posee una capacidad total de almacenamiento de 14 millones de metros cúbicos. Sus principales afluentes son las quebradas Las Palmas y Espíritu Santo, el embalse recibe adicionalmente las aguas de los ríos El Buey, Piedras y Pantanillo, a través de un sistema de bombeo. Las aguas captadas en el embalse de La Fe son conducidas hasta la planta de tratamiento La Ayurá, y posteriormente se utilizan para el abastecimiento de agua potable de los municipios de Medellín, Bello, Itagüí, Envigado y Sabaneta, a través del sistema interconectado de acueducto (EEPPM, 2005).

El embalse de Piedras Blancas está ubicado al noroccidente del municipio de Medellín y posee una capacidad total de almacenamiento de 550 mil metros cúbicos. Sus principales afluentes son las quebradas Piedras Blancas y Chorrillos. El Embalse recibe adicionalmente las aguas de la quebrada la Honda, a través de un sistema de bombeo. Las aguas captadas en el embalse Piedras Blancas son conducidas hasta la planta de tratamiento de Villa Hermosa, y posteriormente se utilizan para el abastecimiento de agua potable de los municipios de Medellín, Bello, Itagüí, Envigado y Sabaneta, a través del sistema interconectado de acueducto. (EEPPM, 2005).

Para la estimación de los caudales mínimos se usó el modelo de tanques.

En la calibración de los modelos de tanques para las diferentes cuencas aferentes a cada embalse, se tuvieron en cuenta las estaciones de caudal diarias operadas por EEPPM localizadas en cada región de estudio (Tabla 2.27). El punto en el cual se encuentra cada estación representa la salida de la cuenca a la cual se le realiza la calibración. Estas estaciones se localizan en corrientes con diferentes características morfológicas y climatológicas.

Tabla 2.27. Estaciones de caudal utilizadas para la calibración del modelo

CÓDIGO	NOMBRE	CORRIENTE	PERIODO DE REGISTRO USADO		ÁREA (km ²)	PERIODO DE CALIBRACIÓN
			Inicial	Final		
2701707	RG_6_Pte.Belmira	Grande	01/01/1980	01/01/2006	442.79	1992 - 2006
2308938	RN-36 Las Palmas	Las Palmas	01/01/2003	01/01/2006	27.33	2003 - 2006
2308703	Mosca_La_RN.2	Q_La_Mosca	01/01/1955	31/12/1990	123.71	1954 - 1990

Las estaciones de precipitación utilizadas para la calibración se seleccionaron de forma tal que quedarán al interior o cerca de cada subcuenca, de tal manera que representaran la distribución espacial de la precipitación (Tabla 2.28).

Se seleccionaron las estaciones de precipitación y caudal con longitud de registros más larga. Para dichas series usadas (precipitación y caudal), se les realizó el análisis de homogeneidad descrito en el Anexo A2.2.

Tabla 2.28. Estaciones de precipitación utilizadas para la calibración del modelo

ESTACIÓN DE CAUDAL		ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN		
Código	Nombre	Código	Nombre	Corriente
2701707	RG_6_Pte.Belmira	2701118	Los Atajos	Q_San_Francisco
		2701072	El Gómez	Grande
		2701055	Aragón	Grande
		2701523	Cucurucho	Grande
2308938	RN_36_Las_Palmas	2308023	Palmas_Las	Las Palmas
2308703	RN_2_La_Mosca	2308026	Mosca_La	Negro
		2308022	Severa_La	Negro
		2308024	Vasconia	Negro

En la Tabla 2.29 y Tabla 2.30 se muestra un resumen de los parámetros de calibración y condiciones iniciales obtenidos en las diferentes cuencas externas analizadas, y se presenta como ejemplo las curvas de calibración y la curva de duración para la estación Las Palmas (Figura 2.22 y Figura 2.23).

Tabla 2.29. Condiciones iniciales para la calibración del modelo de tanques

CUENCA	ALMACENAMIENTO CAPILAR (mm)	CONDUCTIVIDAD CAPA SUPERFICIAL (mm/día)	CONDUCTIVIDAD CAPA INFERIOR (mm/día)	PÉRDIDAS SUBTERRÁNEAS (mm)
RG_6_Pte.Belmira	173.054	0.009	3.624	239.238
RN_36_Las_Palmas	111.180	0.087	4.653	54.810
RN_2_La_Mosca	111.541	0.002	8.780	129.052

Tabla 2.30. Parámetros de calibración del modelo de tanques

CUENCA	Almacenamiento Capilar (mm)	Conductividad Capa Superficial (mm/día)	Conductividad Capa Inferior (mm/día)	Pérdidas Subterráneas (mm)	Tiempo Medio de Residencia Flujo Superficial (días)	Tiempo Medio de Residencia Flujo Subsuperficial (días)	Tiempo Medio de Residencia Flujo Base (días)
RG_6_Pte_Belmira	200	15	4	0	1	10	180
RN_36_Las_Palmas	150	20	5	0	1	4	30
RN_2_La_Mosca	180	40	4	0	1	7	100

Para la generación de series de caudales en las cuencas de interés, es decir, las que descargan al embalse o que son trasvasadas con el fin de ser aprovechadas, se usan como base los modelos de tanques calibrados.

En el caso del embalse de río Grande es necesario generar caudales en la Cuenca del río Chico, Las Ánimas y en la del río Grande (dado que la estación de caudal está aguas arriba del punto de interés), el modelo usado corresponde al calibrado con la estación RG_6_Pte.Belmira.

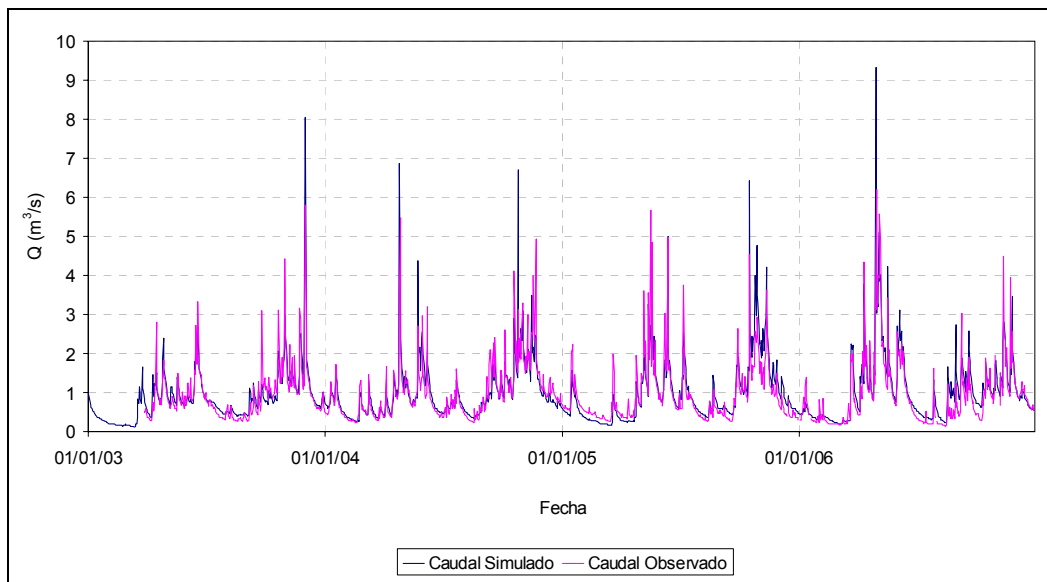


Figura 2.22. Curva de calibración estación Las Palmas

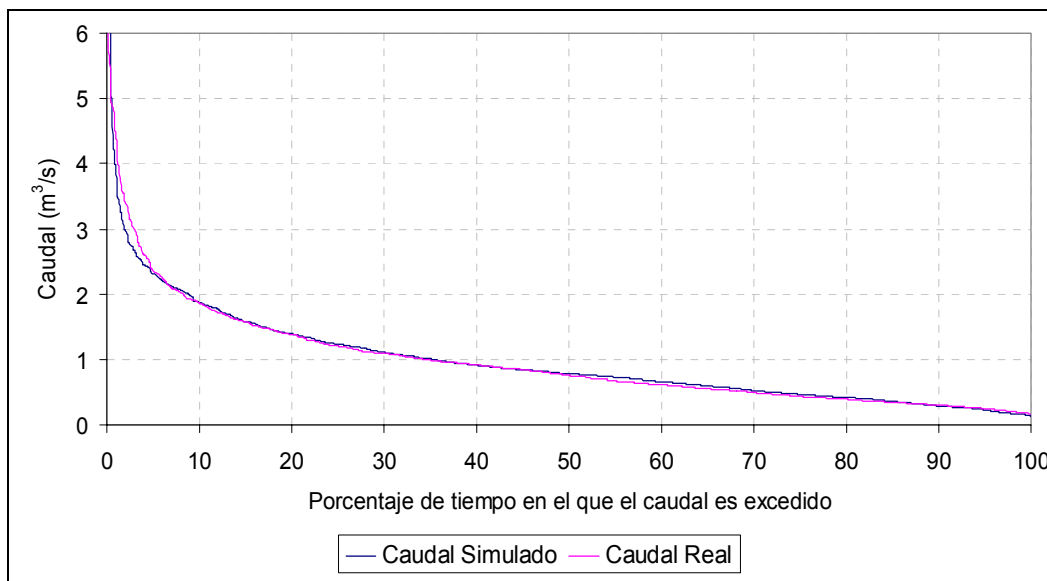


Figura 2.23. Curva de duración estación Las Palmas

Para el embalse de La Fe se generan caudales para las cuencas del río Pantanillo, río Piedras y Las Palmas a partir del modelo calibrado con la estación RN-36 Las Palmas.

Para las simulaciones se usan los parámetros calibrados de los modelos descritos y las estaciones de precipitación que se encuentra al interior o cercanas a cada cuenca. (Tabla 2.31).

Tabla 2.31. Estaciones de precipitación utilizadas para simular caudales

CUENCA	ESTACIÓN DE PRECIPITACIÓN		PERIODO SIMULACIÓN		AÑOS
	Nombre	Código	Desde	Hasta	
Las Ánimas	Los Atajos	2701118	01/01/1992	01/01/2006	15
	El Gómez	2701072			
	Aragón	2701055			
	Cucurucho	2701523			
Río Chico	Los Atajos	2701118	01/01/1992	31/12/2006	15
	El Gómez	2701072			
	Aragón	2701055			
	Cucurucho	2701523			
Piedras	Campoalegre	2308065	01/01/1980	31/12/2003	24
	La Unión	2618017			
Pantanillo	La Selva	2308504	01/01/1980	31/12/1998	19
	La Unión	2618017			
	La Fe	2308021			
	La Palmas	2308023			
Las Palmas	Las Palmas	2308023	01/01/1980	31/12/2006	27

Las consideraciones que se tuvieron en cuenta para simular los caudales son las siguientes:

- En el embalse La Fe se consideró que la cuenca de la corriente Espíritu Santo está dentro del área de la cuenca de la quebrada Las Palmas, y que el área de la cuenca del Río Buey está contenida en la cuenca del Río Piedras.
- En el caso del embalse de Piedras Blancas igualmente fueron consideradas las áreas de las cuencas de la quebrada Chorrillos y la quebrada La Honda dentro del de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas.

Mediante las simulaciones para cada una de las cuencas se obtuvo una serie de caudal diario. Con dichas series que llegan a cada embalse y conociendo las capacidades de almacenamiento de los mismos, se analizó el caudal regulado por cada embalse, es decir, el caudal que puede entregar constantemente a la red del sistema de acueducto de EPPM.

Para este análisis se usa el método de la curva estirada el cual corresponde a un algoritmo gráfico que parte de la curva de masas residual y permite determinar el caudal óptimo que puede ser regulado para evitar déficit o “vertimientos” en el embalse (Pulgarín, 1997).

Una breve explicación del método de la curva estirada se presenta a continuación:

- Con las series de caudal se construye la curva de masas residual, la cual corresponde al agregado de los caudales en el tiempo. Esta curva representa el estado vacío del embalse.
- A cada ordenada de la curva de masa residual (volumen acumulado) se le suma la capacidad de almacenamiento del embalse, para obtener la curva de embalse lleno. Cualquier caudal de salida del embalse se encuentra en el corredor formado por las dos curvas.
- El método para encontrar la curva estirada, comienza al unir el punto inicial de almacenamiento con su punto final mediante una línea recta, considerando que el embalse comienza en un estado de almacenamiento dado y termina en el mismo estado.
- Si es posible regular la media de los caudales, dicha línea horizontal quedará dentro del corredor factible, si la línea de operación se sale se procede a “acomodarla” dentro del corredor como si fuera una cuerda estirada al punto de mayor desviación. Luego

se parte recursivamente el dominio en dos tramos aplicando a cada tramo el mismo procedimiento. Este procedimiento termina cuando todos los puntos de entrega están dentro del corredor (entre vacío y lleno). La mayor pendiente de los tramos de la curva estirada representará el caudal de regulación óptimo.

Se puede demostrar que dados un estado inicial y uno final, la trayectoria óptima de operación está representada por la línea de operación, curva estirada, formada por una línea elástica, templada, fija en los extremos y confinada al estar dentro del corredor formado por las dos curvas límites.

Para la obtención de una única serie de caudal por embalse se suman los datos en los periodos comunes simulados de los cauces que drenan al mismo embalse.

El análisis de la curva estirada para cada uno de los embalses se realizó con la agregación de la serie diaria a mensual multianual (Figura 2.24 y Figura 2.25) y considerando las capacidades de almacenamiento de cada uno descritas anteriormente.

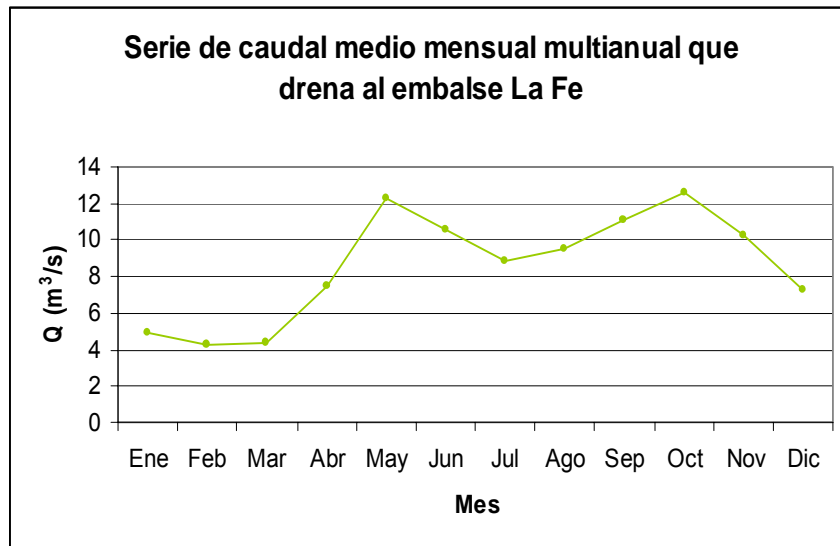


Figura 2.24. Serie de caudal medio multianual que drena al embalse La Fe

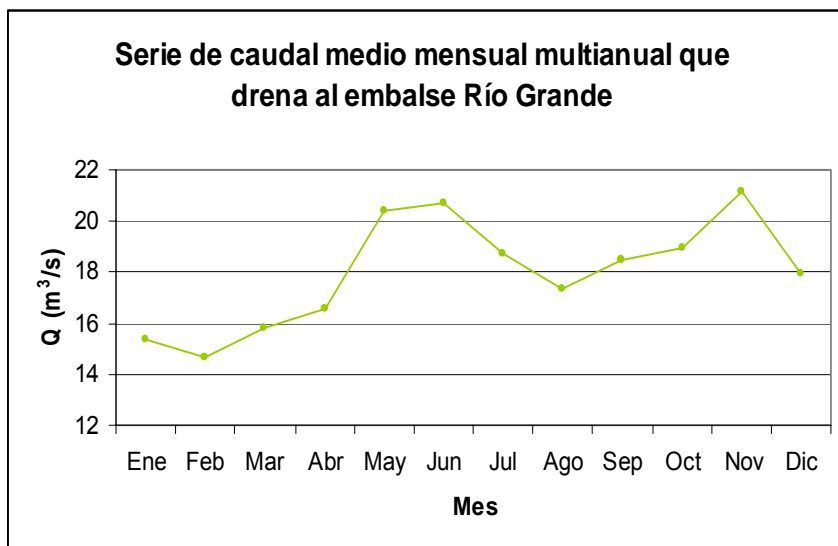


Figura 2.25. Serie de caudal medio multianual que drena al embalse río Grande

En la Figura 2.26 y Figura 2.27 se presenta las curvas de embalse lleno y vacío para Río Grande y La Fe.

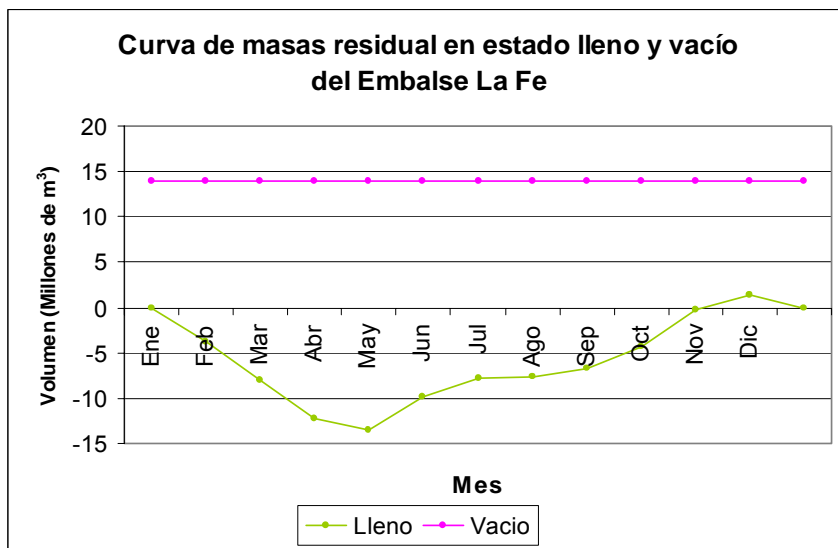


Figura 2.26. Curva de masa residual en estado lleno y vacío del embalse La Fe

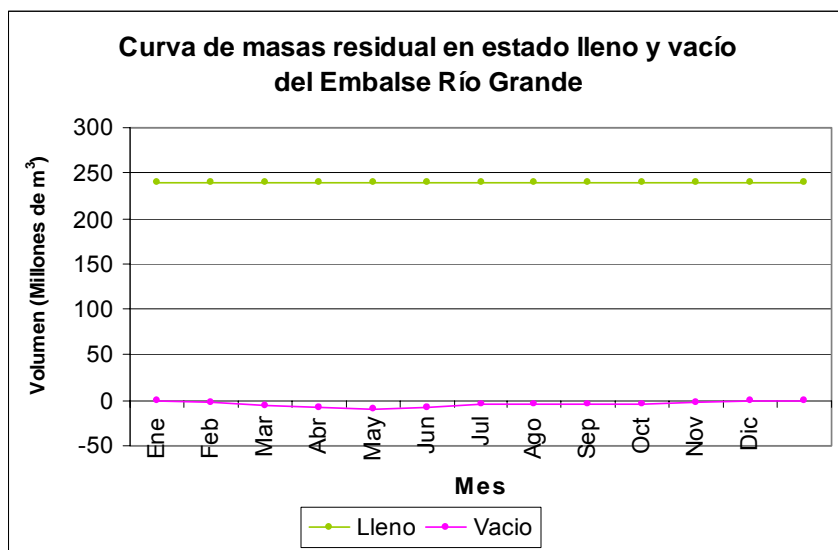


Figura 2.27. Curva de masa residual en estado lleno y vacío del embalse río Grande

Puede observarse que en ambos casos, según lo expuesto en la metodología, los embalses son capaces de regular el caudal medio multianual que almacena, el cual es de 8.6 m³/s para La Fe y 18.0 m³/s para Río Grande, para un caudal total regulable de 26.6 m³/s.

2.4.8 Disponibilidad hídrica en la zona rural

Con el fin de determinar la disponibilidad del recurso agua, se seleccionó una metodología que tiene en cuenta la situación actual de abastecimiento de agua potable de la población rural y urbana en la Cuenca. El abastecimiento en el área urbana y en ciertas áreas rurales, depende fundamentalmente de las redes de EEPPM. El abastecimiento en las áreas rurales por encima de la cota de servicio de acueducto, depende de los nacimientos de agua y de las quebradas que hacen parte de la Cuenca del río Aburrá. Dado que la demanda de la población urbana proyectada al año 2025 está cubierta por EEPPM, este estudio se concentra en las áreas rurales que están por encima de la cota de servicio del acueducto, ya que son las áreas más vulnerables a la escasez del recurso.

Para determinar la disponibilidad, se supone que la oferta hídrica de cada una de los municipios no varía a lo largo de los años, y que la demanda varía de acuerdo con el crecimiento de la población.

En el cálculo de la demanda en cada una de los municipios, se utilizó la siguiente metodología: se superponen a cada municipio (Figura 2.28 -a) los polígonos urbanos (Figura 2.29 (mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: "1LB", objeto:

“SG_Zona_urbana”) considerando que estos limitan la zona atendida por EEPPM (Figura 2.28-b). Se busca entonces la población en el área resultante (Figura 2.28-c) y con ella se determina la demanda para la zona no atendida por EEPPM de cada municipio.

Para encontrar la oferta hídrica, se superpone la red de drenaje con la cota de servicio de EEPPM (Figura 2.28-d) y se busca el caudal medio en los punto de las intersección. Si la red de drenaje se cruza más de una vez con los polígonos de la zona urbana, se toma el valor del caudal medio en cada uno de esos puntos y luego se agregan, dando así el valor de la oferta hídrica en cada municipio. Con la oferta y la demanda hídrica, se encuentra la disponibilidad y el índice de escasez en cada una de las cuencas.

Con el fin de analizar la disponibilidad en los municipios se determinó la oferta hídrica como la sumatoria de las contribuciones en caudal que aportan todos los puntos de intersección, para cada uno de los municipios (Tabla 2.32). Para determinar la demanda se utilizaron las proyecciones realizadas con método de dinámica poblacional para la zona rural de cada uno de los municipios de la Cuenca, se asumió además una dotación promedio de 211 l/hab/día considerando el valor medio histórico de dotación reportado por EEPPM. Las proyecciones para la demanda hasta el año 2020 se presentan en la Tabla 2.32. Finalmente, la disponibilidad de agua, usando como oferta el caudal medio obtenido por Balance Hidrológico, en la zona rural de cada municipio de la Cuenca se presenta en la Tabla 2.33.

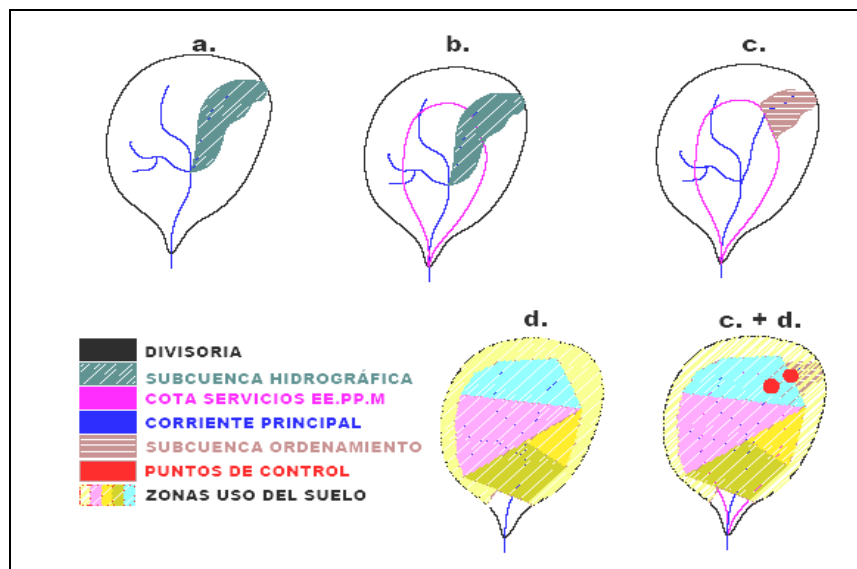


Figura 2.28. Metodología usada en la evaluación de disponibilidad hídrica en la zona rural

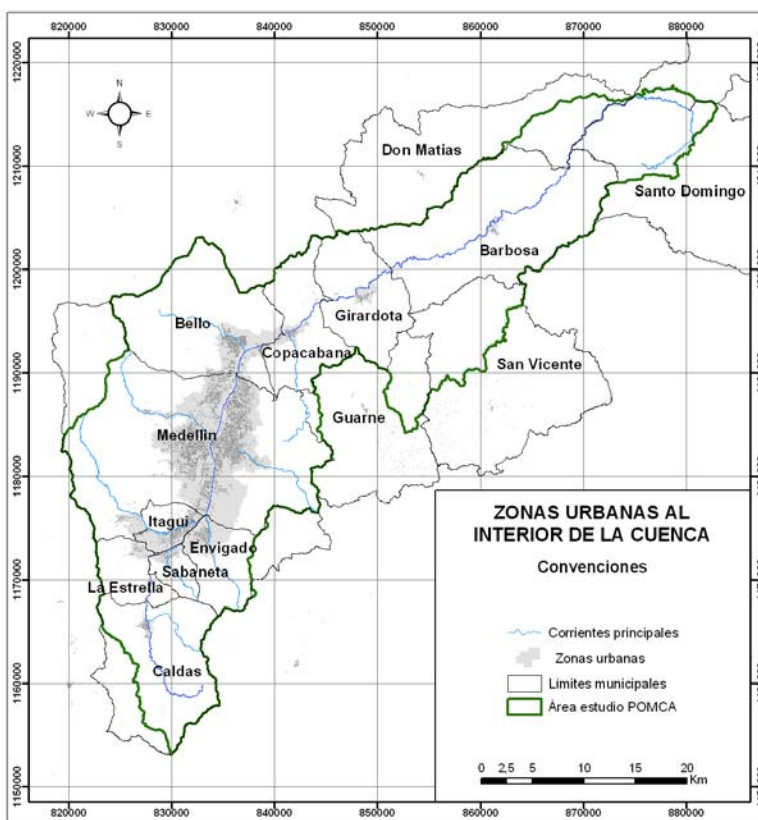


Figura 2.29. Polígonos de zona urbana en el Valle de Aburrá

Tabla 2.32. Oferta hídrica para la zona rural de la Cuenca

MUNICIPIO	OFERTA [m ³ /s]	OFERTA [m ³ /año]
Barbosa	7.519	237,110,278
Bello	2.964	93,465,708
Caldas	3.417	107,768,199
Copacabana	1.023	32,269,965
Don Matías	1.349	42,556,275
Envigado	0.884	27,874,670
Girardota	2.604	82,113,022
Guarne	1.564	49,313,706
Itagüí	0.301	9,506,008
La Estrella	0.968	30,530,153
Medellín	5.337	168,313,181
Sabaneta	0.501	15,790,075
San Vicente	2.169	68,409,386
Santo Domingo	3.973	125,291,305
Yolombó	0.348	10,962,172

Tabla 2.33. Demanda hídrica proyectada para la zona rural de la Cuenca

MUNICIPIOS	DEMANDA [m ³ /año]							
	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2019	2025
Barbosa	1,984,459	2,059,646	2,137,683	2,218,676	2,302,738	2,389,984	2,527,091	2,825,353
Bello	1,119,329	1,221,792	1,333,636	1,455,718	1,588,975	1,734,430	1,977,956	2,572,387
Caldas	1,271,570	1,405,076	1,552,598	1,715,610	1,895,736	2,094,774	2,433,191	3,282,874
Copacabana	668,983	692,257	716,342	741,264	767,054	793,740	835,521	925,797
Don Matías	99,249	104,086	109,157	114,476	120,054	125,904	135,218	155,963
Envigado	666,865	673,516	680,232	687,016	693,867	700,786	711,295	732,788
Girardota	1,411,547	1,489,775	1,572,339	1,659,478	1,751,446	1,848,512	2,004,289	2,356,332
Guarne	463,363	492,005	522,417	554,709	588,997	625,405	684,279	819,176
Itagüí	1,851,627	2,102,692	2,387,800	2,711,565	3,079,230	3,496,748	4,231,531	6,196,750
La Estrella	2,030,436	2,302,964	2,612,070	2,962,666	3,360,319	3,811,346	4,603,891	6,717,667
Medellín	10,806,757	11,525,072	12,291,133	13,108,114	13,979,398	14,908,596	16,419,472	19,916,087
Sabaneta	757,146	819,644	887,302	960,544	1,039,831	1,125,664	1,267,878	1,608,477
San Vicente	292,567	275,231	258,923	243,581	229,148	215,570	196,697	163,763
Santo Domingo	195,842	194,777	193,718	192,665	191,617	190,575	189,023	185,957
Yolombo	7,062	7,465	7,891	8,342	8,817	9,321	10,130	11,964

Tabla 2.34. Disponibilidad proyectada para la zona rural de la Cuenca

MUNICIPIOS	OFERTA [m3/año]	DISPONIBILIDAD [m3/año]							
		2006	2008	2010	2012	2014	2016	2019	2025
Barbosa	237,110,278	235,125,820	235,050,632	234,972,596	234,891,603	234,807,541	234,720,294	234,583,187	234,284,925
Bello	93,465,708	92,346,379	92,243,915	92,132,072	92,009,990	91,876,733	91,731,277	91,487,752	90,893,321
Caldas	107,768,199	106,496,628	106,363,123	106,215,600	106,052,589	105,872,463	105,673,425	105,335,008	104,485,324
Copacabana	32,269,965	31,600,982	31,577,707	31,553,623	31,528,701	31,502,911	31,476,224	31,434,444	31,344,168
Don Matías	42,556,275	42,457,025	42,452,189	42,447,117	42,441,798	42,436,220	42,430,370	42,421,057	42,400,312
Envigado	27,874,670	27,207,805	27,201,155	27,194,438	27,187,655	27,180,803	27,173,884	27,163,375	27,141,882
Girardota	82,113,022	80,701,475	80,623,247	80,540,683	80,453,544	80,361,575	80,264,510	80,108,733	79,756,690
Guarne	49,313,706	48,850,343	48,821,701	48,791,289	48,758,997	48,724,709	48,688,301	48,629,427	48,494,530
Itagüí	9,506,008	7,654,380	7,403,315	7,118,208	6,794,443	6,426,777	6,009,260	5,274,477	3,309,258
La Estrella	30,530,153	28,499,717	28,227,189	27,918,082	27,567,487	27,169,834	26,718,807	25,926,262	23,812,486
Medellín	168,313,181	157,506,425	156,788,109	156,022,048	155,205,067	154,333,783	153,404,585	151,893,710	148,397,094
Sabaneta	15,790,075	15,032,929	14,970,431	14,902,774	14,829,532	14,750,244	14,664,411	14,522,198	14,181,599
San Vicente	68,409,386	68,116,819	68,134,154	68,150,463	68,165,805	68,180,238	68,193,816	68,212,689	68,245,623
Santo Domingo	125,291,305	125,095,463	125,096,528	125,097,587	125,098,640	125,099,687	125,100,729	125,102,281	125,105,348
Yolombo	10,962,172	10,955,109	10,954,706	10,954,280	10,953,830	10,953,354	10,952,851	10,952,042	10,950,207

En general, el análisis a escala municipal de la disponibilidad hídrica, no presentan situaciones deficitarias en el horizonte de proyección de la demanda. Cabe resaltar que la situación de superávit que se presenta en el análisis de disponibilidad no tiene en cuenta la calidad del agua en la estimación de la oferta, la cual en muchos casos podría disminuir considerablemente la cantidad de recurso aprovechable.

2.4.9 Módulo de disponibilidad hídrica

Se desarrolló una módulo para el software HydroSIG v 3.1 (desarrollado por el Posgrado de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín). Dicho módulo sirve para el cálculo de la disponibilidad del recurso hídrico en la Cuenca y microcuencas. Con esta herramienta es posible establecer en una microcuenca de interés, la disponibilidad del recurso hídrico y definir si los usuarios se verán afectados por nuevas concesiones. El modelo permite identificar los tramos de la red de drenaje en que se presentan estados deficitarios y puede servir como sistema de soporte a la decisión en la reglamentación del uso del agua.

El modelo establece la disponibilidad hídrica, calculada como la diferencia entre la oferta natural de los caudales mínimos (analizando la condición mas crítica) y las demandas del recurso en la Cuenca, tomadas como la agregación en la dirección del flujo de todos los valores de captaciones registrados en la cuenca.

En el Anexo A2.6 se presenta la explicación del funcionamiento del mismo y los manuales para el usuario y el administrador del sistema.

2.4.10 Situación actual de la disponibilidad de agua en la Cuenca a partir del índice de escasez

Con el fin de analizar el comportamiento actual de la Cuenca con respecto a su posible autosuficiencia se empleó el índice de escasez. Se definieron tres puntos de control de dicho índice: Ancón Sur, Ancón Norte y la salida de la Cuenca (desembocadura de la quebrada Santiago).

El índice de escasez está definido como la relación entre la demanda y la oferta hídrica, se expresa en forma de porcentaje y representa la cantidad de agua utilizada sobre el agua disponible en la Cuenca.

$$Ie = \frac{\text{Demanda hídrica}}{\text{Oferta hídrica}} \cdot FR$$

Para determinarlo se utilizó la metodología para el análisis de disponibilidad propuesta por el IDEAM. Esta metodología se basa en la aplicación de la Resolución 0865 de 2004. En la obtención de la oferta hídrica se empleó el caudal medio, el cual se redujo usando dos factores, uno por calidad de aguas y otro referido al caudal ecológico, cada uno del 25%. Se tomó el valor del 25% del caudal medio como el caudal ecológico ya que para las subcuencas de este estudio dicho caudal no fue calculado. En la Tabla 2.35 se presenta la clasificación del índice de escasez según el IDEAM. El factor de reducción usado fue de 1.778. A medida que el factor de reducción es mayor, va a presentar situaciones de escasez más graves.

Tabla 2.35. Categorización índice de escasez

CATEGORÍA	RANGO	COLOR	EXPLICACIÓN
Alto	> 50%	Rojo	Demanda alta
Medio alto	21–50%	Naranja	Demanda apreciable
Medio	11–20%	Amarillo	Demanda baja
Mínimo	1–10%	Verde	Demanda muy baja
No significativo	<1%	Azul	Demanda no significativa

Fuente: Rivera, et al., 2004.

Se involucraron otros parámetros que eran necesarios para el cálculo del índice de escasez, tales como la población y las áreas de drenaje, aguas arriba de cada uno de los tres puntos de control. Cabe resaltar que la población fue calculada como el producto entre la densidad poblacional de cada municipio, ya sea rural o urbana, y el área asociada a dicho drenaje, esto para el caso en el que todo el municipio no drenaba a la cuenca; cuando el área de drenaje era igual al área total del municipio, la población total se tomó del análisis presentado anteriormente.

En los municipios de Don Matías, San Vicente, Santo Domingo y Yolombó, no se encontró información correspondiente a las densidades poblacionales, por lo tanto se distribuyó el total de la población rural de cada municipio, en el área total del mismo, de esta manera se obtuvo la densidad rural poblacional; esta aproximación se realizó dado que la zona urbana de cada una de estas poblaciones es despreciable en comparación con el área total del municipio. En las Tabla 2.36, Tabla 2.37, Tabla 2.38 y Tabla 2.39 se presentan todos los parámetros antes mencionados necesarios para el cálculo del índice de escasez, así como el resultado del mismo en los tres puntos de control por los dos métodos antes comentados (Tabla 2.40).

Tabla 2.36. Cálculo de la demanda aguas arriba de Ancón Sur

MUNICIPIO	DENSIDAD POBLACIONAL (hab/km ²)		DEMANDA (l/día)		DEMANDA TOTAL (l/día)	DEMANDA (m ³ /s)
	Urbana	Rural	Urbana	Rural		
La Estrella	8,918	762		2,941,509	2,941,509	0.034
Sabaneta	11,843	779	124,940	98,600	223,540	0.003
Caldas	26,316	105	10,272,451	2,189,015	12,461,465	0.144
Envigado	15,583	219		4,615	4,615	0.0001
						0.181

Tabla 2.37. Cálculo de la demanda aguas arriba de Ancón Norte

MUNICIPIO	DENSIDAD POBLACIONAL (hab/km ²)		DEMANDA (l/día)		DEMANDA TOTAL (l/día)	DEMANDA (m ³ /s)
	Urbana	Rural	Urbana	Rural		
La Estrella	8,918	762	4,892,483	5,063,254	9,955,737	0.115
Sabaneta	11,843	9346	10,744,851	24,255,674	35,000,525	0.405
Caldas	26,316	105	42,054	2,189,015	2,231,068	0.026
Envigado	15,583	219	558,369	1,568,970	2,127,339	0.025
Itagüí	20,950	3,181	49,950,608	6,645,686	56,596,294	0.655
Medellín	18,881	479	427,867,053	21,149,849	449,016,902	5.197
Guarne	2,735	176.87		203,389	203,389	0.002
Copacabana	11,049	129	10,956,839	1,286,683	12,243,522	0.142
Girardota	4,845	242		15,323	15,323	0.000
Bello	19,967	104	82,996,367	2,584,349	85,580,716	0.991
						7.558

Tabla 2.38. Cálculo de la demanda aguas arriba de la salida de la Cuenca

MUNICIPIO	POBLACION (hab)		DEMANDA (l/día)		DEMANDA TOTAL (l/día)	DEMANDA (m ³ /s)
	Urbana	Rural	Urbana	Rural		
Barbosa	18,721	23,826	3,950,131	5,027,286	8,977,417	0.1039
Bello	359,404	13,609	75,834,244	2,871,499	78,705,743	0.9109
Caldas	52,632	15,525	11,105,352	3,275,775	14,381,127	0.1664
Copacabana	53,033	8,388	11,189,963	1,769,868	12,959,831	0.1500
Don Matías		1,231		259,741	259,741	0.0030
Envigado	166,742	8,595	35,182,562	1,813,545	36,996,107	0.4282
Girardota	25,195	17,623	5,316,145	3,718,453	9,034,598	0.1046
Guarne		5,789		1,221,479	1,221,479	0.0141
Itagüí	209,498	22,270	44,204,078	4,698,970	48,903,048	0.5660
La Estrella	28,538	24,225	6,021,518	5,111,475	11,132,993	0.1289
Medellín	2,093,889	129,771	441,810,579	27,381,681	469,192,260	5.4305
Sabaneta	35,528	9,346	7,496,408	1,972,006	9,468,414	0.1096
San Vicente		3,657		771,627	771,627	0.0089
Santo Domingo		2,439		514,629	514,629	0.0060

MUNICIPIO	POBLACIÓN (hab)		DEMANDA (l/día)		DEMANDA TOTAL (l/día)	DEMANDA (m ³ /s)
	Urbana	Rural	Urbana	Rural		
Yolombó		86		18,146	18,146	0.0002
						8.131

Tabla 2.39. Cálculo de la oferta hídrica

CAUDALES (m ³ /s)	ANCÓN SUR	ANCÓN NORTE	SALIDA CUENCA
Qmed	4.379	21.231	41.609

Tabla 2.40. Resultados índice de escasez

ÍNDICE DE ESCASEZ, Ie (%) Ie = *FrxDh/Oh			
Punto de Control	Ancón Sur	Ancón Norte	Salida Cuenca
Q med (m ³ /s)	7.35	63.29	34.75
Categoría	Mínimo	Alto	Medio Alto

*Fr = Factor de reducción (Fr = 1.778)

Los resultados obtenidos para el índice de escasez fueron comparados con los intervalos definidos en la Tabla 2.35, con el fin de clasificar los tres puntos de control. Como puede observarse el único punto que tiene una demanda baja o media con respecto a la oferta es Ancón Sur, los demás puntos presentan una mediana y alta demanda con respecto a la oferta, concluyéndose en una primera instancia que la cuenca presenta un déficit en la oferta hídrica para poder ser autosuficiente.

2.4.11 Situación actual de la demanda abastecida por agua de la Cuenca en la zona rural a partir del índice de escasez

La demanda en la zona rural se determina usando la misma metodología que se usó para determinar la disponibilidad hídrica en las zonas rurales de la cuenca. Dada la escala de trabajo del proyecto, no se localizó y cuantificó la demanda agro-industrial, pecuaria y de riego, por lo tanto este análisis de disponibilidad solo se realiza para la demanda domestica. Esta demanda en el escenario actual se calculó utilizando un valor de dotación rural por habitante de 211 l/día. Adicionalmente a este escenario, se calcularon 2 escenarios futuros, para los años 2019 y 2025, donde se utilizó un valor dotación pesimista de 245 l/hab/día. En cada escenario se evaluó el índice de escasez por medio de la metodología propuesta por el IDEAM.

Para la demanda, también se tuvieron en cuenta las captaciones del sistema de acueducto de EEPPM que están ubicadas dentro de la Cuenca, por encima de la cota de servicio. Estas captaciones se presentan en la Tabla 2.41.

Tabla 2.41. Captaciones por encima de la cota de servicios de EEPPM

CAPTACIÓN	SUBCUENCA	CAUDAL (m ³ /s)
Subsistema Caldas	Q. La Valeria	0,112
Subsistema Barbosa	Q. Llano Chiquito	0,035
Subsistema San Antonio de Prado	Q. Doña María	0,078
Subsistema La Cascada	Q. Santa Helena	0,12

En el cálculo de la oferta hídrica se utilizó además el Modelo Digital de Terreno, MDT. Sin embargo debido a la escala de trabajo y a la resolución del MDT este estudio se restringió a subcuencas con áreas totales mayores de 1.8 km². En Tabla 2.42 se presenta, como ejemplo, los resultados del índice de escasez para la zona de estudio proyectados al 2025.

Tabla 2.42. Índice de escasez en la zona rural por subcuencas para el año 2025 por la metodología IDEAM

NOMBRE DE LA CUENCA	MUNICIPIO	ÁREA (km ²)	DEMANDA (m ³ /s)	OFERTA DISTRIBUIDA (m ³ /s)	ÍNDICE ESCASEZ (%)	VALORACIÓN IDEAM
Q. AGUA FRIA	BARBOSA	4.88	0.00180	0.2546	1.26	Mínimo
Q. LA CHUCHA	BARBOSA	1.42	0.00052	0.0697	0.36	No significativo
Q. LA MONTERA	BARBOSA	3.18	0.00117	0.1589	0.82	No significativo
Q. LA CALDAS	BARBOSA	7.01	0.00259	0.3393	1.81	Mínimo
Q. SANTO DOMINGO	BARBOSA	4.90	0.00181	0.2505	1.26	Mínimo
Q. AGUAS CLARAS	BARBOSA	8.10	0.00299	0.4159	2.09	Mínimo
Q. EL CARRETERO	BARBOSA	1.33	0.00049	0.0642	0.34	No significativo
Q. EL SILENCIO	BARBOSA	2.20	0.00081	0.1023	0.57	No significativo
Q. EL GUAYABO	BARBOSA	4.06	0.00150	0.1830	1.05	Mínimo
Q. LA HERRADURA	BARBOSA	13.41	0.00494	0.6947	3.45	Mínimo
Q. LA LAJA	BARBOSA	1.51	0.00056	0.0691	0.39	No significativo
Q. LA AMOLADORA	BARBOSA	0.84	0.00031	0.0383	0.22	No significativo
Q. EL HOYO	BARBOSA	0.78	0.00029	0.0349	0.20	No significativo
Q. LA CHILCAGUA	BARBOSA	1.99	0.00074	0.0882	0.51	No significativo
Q. YARUMITO	BARBOSA	0.81	0.00030	0.0358	0.21	No significativo
Q. TAMBORCITO	BARBOSA	0.91	0.00034	0.0391	0.24	No significativo
Q. CINCONALES	BARBOSA	3.31	0.00122	0.1448	0.85	No significativo
Q. LOS CHORROS	BARBOSA	14.35	0.00529	0.6420	3.70	Mínimo
Q. LLANO CHIQUITO	BARBOSA	23.33	0.00860	1.0477	6.01	Mínimo
Q. EL REVENTON	BARBOSA	6.53	0.00241	0.2623	1.68	Mínimo
Q. CESTILLAL	BARBOSA	6.72	0.00248	0.2438	1.73	Mínimo
Q. AGUA CALIENTE	BARBOSA	0.56	0.00021	0.0140	0.14	No significativo
Q. LA LOPEZ	BARBOSA	3.58	0.00132	0.1210	0.92	No significativo
Q. EL GUADUAL	BARBOSA	1.97	0.00073	0.0670	0.51	No significativo
Q. OVEJAS	BARBOSA	14.34	0.00529	0.4708	3.69	Mínimo
Q. LOS PERROS	BARBOSA	2.27	0.00084	0.0729	0.58	No significativo
Q. LA ESE	BARBOSA	1.85	0.00068	0.0584	0.48	No significativo

NOMBRE DE LA CUENCA	MUNICIPIO	ÁREA (km ²)	DEMANDA (m ³ /s)	OFERTA DISTRIBUIDA (m ³ /s)	ÍNDICE ESCASEZ (%)	VALORACIÓN IDEAM
Q. PIEDRA CANDELA	BARBOSA	0.61	0.00022	0.0176	0.16	No significativo
Q. DON JUAN	BARBOSA	0.79	0.00029	0.0230	0.20	No significativo
Q. LA GOMEZ	BARBOSA	4.76	0.00175	0.1389	1.22	Mínimo
Q. DE GUAYABAL	BARBOSA	3.82	0.00141	0.1093	0.98	No significativo
Q. LOS LAURELES	BARBOSA	1.70	0.00063	0.0502	0.44	No significativo
Q. SAN EUGENIO	BARBOSA	2.35	0.00087	0.0641	0.61	No significativo
Q. EL CHOCHO	BARBOSA	2.18	0.00081	0.0679	0.56	No significativo
Q. LA CHOCONA	BARBOSA	1.97	0.00073	0.0583	0.51	No significativo
Q. LOS TOTUMOS	BARBOSA	4.49	0.00166	0.1277	1.16	Mínimo
Q. LA TROCHA	BARBOSA	3.55	0.00131	0.1025	0.91	No significativo
Q. PLATANILLO	BARBOSA	7.52	0.00277	0.2023	1.94	Mínimo
Q. LA QUESARIEGA	BARBOSA	4.19	0.00155	0.1157	1.08	Mínimo
Q. LA SILVA	BARBOSA	1.99	0.00073	0.0444	0.51	No significativo
Q. GUASIMAL	BELLO	3.48	0.00127	0.0498	0.89	No significativo
Q. NIQUIA	BELLO	1.93	0.00070	0.0645	0.49	No significativo
Q. LA SECA	BELLO	6.27	0.00228	0.1375	1.59	Mínimo
Q. LA RODAS	BELLO	2.26	0.00083	0.0607	0.58	No significativo
Q. LA SEÑORITA	BELLO	1.12	0.00041	0.0002	0.28	No significativo
Q. LA GARCIA	BELLO	78.84	0.02875	2.0195	20.07	Medio
Q. EL HATO	BELLO	18.72	0.00683	0.4798	4.77	Mínimo
Q. LA LOCA	BELLO	4.17	0.00152	0.0885	1.06	Mínimo
Q. LA GABRIELA	BELLO	1.06	0.00039	0.0180	0.27	No significativo
Q. LA MADERA	BELLO	1.62	0.00059	0.0080	0.41	No significativo
Q. SECA	BELLO	1.09	0.00040	0.0198	0.28	No significativo
Q. LA RAYA	CALDAS	0.36	0.00023	0.0121	0.16	No significativo
Q. LA MIEL	CALDAS	21.77	0.01380	0.7713	9.63	Mínimo
Q. LA VALERIA	CALDAS	11.99	0.00760	0.2984	5.31	Mínimo
Q. LA CORRALA	CALDAS	2.12	0.00134	0.0782	0.94	No significativo
Q. LA CHUSCALA	CALDAS	2.02	0.00128	0.0619	0.89	No significativo
Q. EL ZARZO	CALDAS	1.62	0.00103	0.0647	0.72	No significativo
Q. LA SALADA	CALDAS	11.10	0.00703	0.4417	4.91	Mínimo
Q. LA CLARA	CALDAS	6.40	0.00406	0.2430	2.83	Mínimo
Q. LA MINA	CALDAS	8.02	0.00508	0.2850	3.55	Mínimo
ALTO DE SAN MIGUEL	CALDAS	16.27	0.01031	0.5706	7.20	Mínimo
Q. EL MOLINAL	COPACABANA	10.78	0.00120	0.0916	0.84	No significativo
Q. LA VETA	COPACABANA	2.21	0.00024	0.0470	0.17	No significativo
Q. EL CHUSCAL	COPACABANA	12.39	0.00137	0.2478	0.96	No significativo
Q. LA TOLDA	COPACABANA	4.95	0.00055	0.1064	0.38	No significativo
Q. PIEDRAS BLANCAS	COPACABANA	13.39	0.00149	0.1412	1.04	Mínimo
Q. EL CONVENTO	COPACABANA	0.79	0.00009	0.0138	0.06	No significativo
Q. GUASIMAL	COPACABANA	1.52	0.00017	0.0218	0.12	No significativo
Q. LA TRINIDAD	COPACABANA	2.14	0.00024	0.1108	0.17	No significativo
Q. LA RODAS	COPACABANA	3.37	0.00037	0.0201	0.26	No significativo
Q. MANZANARES	DON MATIAS	1.68	0.00024	0.0993	0.17	No significativo

NOMBRE DE LA CUENCA	MUNICIPIO	ÁREA (km ²)	DEMANDA (m ³ /s)	OFERTA DISTRIBUIDA (m ³ /s)	ÍNDICE ESCASEZ (%)	VALORACIÓN IDEAM
Q. MONTECRISTO	DON MATIAS	1.39	0.00020	0.0806	0.14	No significativo
Q. ARENALES	DON MATIAS	2.60	0.00037	0.1496	0.26	No significativo
Q. LAURELES	DON MATIAS	5.19	0.00073	0.2937	0.51	No significativo
Q. SAN JACINTO	DON MATIAS	13.72	0.00193	0.4485	1.35	Mínimo
Q. LA MANDIJUI	DON MATIAS	1.92	0.00027	0.0924	0.19	No significativo
Q. LA MONTERA	DON MATIAS	2.29	0.00032	0.1148	0.23	No significativo
Q. LA AYURA	ENVIGADO	33.55	0.02288	0.8491	15.98	Medio
Q. LA MINA	ENVIGADO	1.37	0.00094	0.0348	0.65	No significativo
Q. LA SILVA	GIRARDOTA	1.72	0.00120	0.0513	0.84	No significativo
Q. FULGENCIO ENCE	GIRARDOTA	4.80	0.00334	0.0957	2.33	Mínimo
Q. EL CAIMITO	GIRARDOTA	2.24	0.00156	0.0578	1.09	Mínimo
Q. LA CORREA	GIRARDOTA	8.75	0.00608	0.2279	4.25	Mínimo
Q. EL SALADO	GIRARDOTA	24.13	0.01677	1.1583	11.71	Medio
Q. LA FERRERIA	GIRARDOTA	2.67	0.00186	0.0507	1.30	Mínimo
Q. LA REPRESA	GIRARDOTA	1.67	0.00116	0.0395	0.81	No significativo
Q. JUAN COJO	GIRARDOTA	5.93	0.00412	0.1508	2.88	Mínimo
Q. LA MATA	GIRARDOTA	7.29	0.00507	0.1801	3.54	Mínimo
Q. DE DOÑA CHEPA	GIRARDOTA	1.69	0.00118	0.0388	0.82	No significativo
Q. EL MOLINAL	GIRARDOTA	3.80	0.00264	0.2595	1.85	Mínimo
Q. LA CASCADA	GIRARDOTA	1.68	0.00117	0.0399	0.82	No significativo
Q. OVEJAS	GUARNE	29.90	0.02373	0.9813	16.57	Medio
Q. PIEDRAS BLANCAS	GUARNE	5.64	0.00447	0.5825	3.12	Mínimo
Q. LA JABALCONA	ITAGUI	3.02	0.03178	0.0823	22.19	Medio - Alto
Q. DOÑA MARIA	ITAGUI	6.58	0.06935	0.2191	48.43	Medio - Alto
Q. DOÑA MARIA	LA ESTRELLA	4.27	0.00205	0.1420	1.43	Mínimo
Q. LA GRANDE	LA ESTRELLA	8.85	0.00426	0.2624	2.98	Mínimo
Q. MIL PESOS	LA ESTRELLA	0.53	0.00025	0.0165	0.18	No significativo
Q. LA BERMEJALA	LA ESTRELLA	5.37	0.00259	0.1736	1.81	Mínimo
Q. LA CULEBRA	LA ESTRELLA	3.27	0.00158	0.1079	1.10	Mínimo
Q. SAN MIGUEL	LA ESTRELLA	1.44	0.00069	0.0474	0.48	No significativo
Q. TABLACITA	LA ESTRELLA	1.16	0.00056	0.0383	0.39	No significativo
Q. LA RAYA	LA ESTRELLA	0.74	0.00035	0.0246	0.25	No significativo
Q. PIEDRAS BLANCAS	MEDELLÍN	23.26	0.05340	0.0197	37.29	Medio - Alto
Q. LA MADERA	MEDELLÍN	0.76	0.00174	0.0037	1.21	Mínimo
Q. SECA	MEDELLÍN	1.09	0.00251	0.0198	1.75	Mínimo
Q. TOSCANA-TINAJA	MEDELLÍN	0.03	0.00006	0.0001	0.04	No significativo
Q. LA ROSA	MEDELLÍN	0.63	0.00144	0.0075	1.01	Mínimo
Q. MINITAS	MEDELLÍN	0.44	0.00102	0.0073	0.71	No significativo
Q. LA CANTERA	MEDELLÍN	0.49	0.00113	0.0056	0.79	No significativo
Q. LA BERMEJALA	MEDELLÍN	0.61	0.00140	0.0062	0.98	No significativo
Q. QUINTANA	MEDELLÍN	1.09	0.00251	0.0234	1.75	Mínimo
Q. LA CHORRERA	MEDELLÍN	2.30	0.00527	0.0436	3.68	Mínimo
Q. MALPASO	MEDELLÍN	0.34	0.00078	0.0066	0.54	No significativo
Q. EL AHORCADO	MEDELLÍN	0.27	0.00062	0.0067	0.43	No significativo

NOMBRE DE LA CUENCA	MUNICIPIO	ÁREA (km ²)	DEMANDA (m ³ /s)	OFERTA DISTRIBUIDA (m ³ /s)	ÍNDICE ESCASEZ (%)	VALORACIÓN IDEAM
Q. SANTA ELENA	MEDELLÍN	32.81	0.07532	0.9229	52.60	Alto
Q. LA IGUANA	MEDELLÍN	44.65	0.10251	1.2077	71.58	Alto
Q. LA HUESO	MEDELLÍN	12.94	0.02970	0.3641	20.74	Medio
Q. LA PICACHA	MEDELLÍN	6.93	0.01591	0.3837	11.11	Medio
Q. EL INDIO	MEDELLÍN	0.24	0.00056	0.0045	0.39	No significativo
Q. ALTAVISTA	MEDELLÍN	14.30	0.03283	0.1399	22.93	Medio - Alto
Q. LA PRESIDENTA	MEDELLÍN	8.12	0.01864	0.2036	13.01	Medio
Q. LA SUCIA	MEDELLÍN	0.03	0.00008	0.0024	0.05	No significativo
Q. LA VOLCANA	MEDELLÍN	0.73	0.00167	0.0229	1.17	Mínimo
Q. LA AGUACATALA	MEDELLÍN	3.50	0.00803	0.0990	5.61	Mínimo
Q. DOÑA MARIA	MEDELLÍN	54.69	0.12557	1.8205	87.68	Alto
Q. LA DOCTORA	SABANETA	12.32	0.02498	0.5007	17.44	Medio
Q. OVEJAS	SAN VICENTE	66.10	0.00483	2.1692	3.37	Mínimo
Q. SANTIAGO	SANTO DOMINGO	36.73	0.00304	2.2567	2.12	Mínimo
Q. LOS MORROS	SANTO DOMINGO	3.59	0.00030	0.2160	0.21	No significativo
Q. PUERTO RICO	SANTO DOMINGO	2.43	0.00020	0.1431	0.14	No significativo
Q. PIEDRA GORDA	SANTO DOMINGO	13.56	0.00112	0.7675	0.78	No significativo
Q. LAS LAJAS	SANTO DOMINGO	1.96	0.00016	0.1063	0.11	No significativo
Q. DE LA M	SANTO DOMINGO	3.62	0.00030	0.1936	0.21	No significativo
Q. LA SUCIA	SANTO DOMINGO	1.71	0.00014	0.0872	0.10	No significativo
Q. AGUA FRIA	SANTO DOMINGO	3.71	0.00031	0.1939	0.21	No significativo
Q. SANTIAGO	YOLOMBO	5.66	0.00037	0.3476	0.26	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.07	0.00003	0.0033	0.02	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.06	0.00002	0.0029	0.02	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.69	0.00025	0.0280	0.18	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.14	0.00005	0.0058	0.04	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.13	0.00005	0.0060	0.03	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.58	0.00021	0.0261	0.15	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.42	0.00015	0.0191	0.11	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.49	0.00018	0.0244	0.12	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.41	0.00015	0.0172	0.10	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	1.28	0.00047	0.0592	0.33	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.16	0.00006	0.0070	0.04	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.39	0.00014	0.0171	0.10	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.27	0.00010	0.0467	0.07	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.46	0.00017	0.0203	0.12	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.12	0.00004	0.0050	0.03	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.61	0.00023	0.0265	0.16	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.30	0.00011	0.0125	0.08	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.38	0.00014	0.0162	0.10	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.10	0.00004	0.0043	0.03	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.11	0.00004	0.0035	0.03	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.10	0.00004	0.0034	0.03	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.38	0.00014	0.0125	0.10	No significativo

NOMBRE DE LA CUENCA	MUNICIPIO	ÁREA (km ²)	DEMANDA (m ³ /s)	OFERTA DISTRIBUIDA (m ³ /s)	ÍNDICE ESCASEZ (%)	VALORACIÓN IDEAM
Corriente sin nombre	BARBOSA	0.66	0.00024	0.0168	0.17	No significativo
Corriente sin nombre	BARBOSA	1.15	0.00042	0.0298	0.30	No significativo
Corriente sin nombre	BELLO	0.35	0.00013	0.0117	0.09	No significativo
Corriente sin nombre	BELLO	0.28	0.00010	0.0005	0.07	No significativo
Corriente sin nombre	BELLO	0.29	0.00011	0.0053	0.08	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.06	0.00004	0.0021	0.03	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.12	0.00008	0.0041	0.05	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.06	0.00004	0.0019	0.03	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.17	0.00011	0.0057	0.08	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.21	0.00013	0.0069	0.09	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.88	0.00056	0.0301	0.39	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.07	0.00004	0.0024	0.03	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.64	0.00041	0.0213	0.28	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.06	0.00004	0.0019	0.03	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.48	0.00030	0.0003	0.21	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.18	0.00011	0.0078	0.08	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.52	0.00033	0.0171	0.23	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.38	0.00024	0.0115	0.17	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.08	0.00005	0.0030	0.04	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	1.37	0.00087	0.0538	0.61	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.52	0.00033	0.0187	0.23	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.22	0.00014	0.0093	0.10	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	3.13	0.00198	0.1277	1.38	Mínimo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.20	0.00012	0.0077	0.09	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.26	0.00016	0.0106	0.11	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.23	0.00015	0.0087	0.10	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.83	0.00053	0.0362	0.37	No significativo
Corriente sin nombre	CALDAS	4.39	0.00278	0.1751	1.94	Mínimo
Corriente sin nombre	CALDAS	0.63	0.00040	0.0265	0.28	No significativo
Corriente sin nombre	COPACABANA	6.14	0.00068	0.1410	0.48	No significativo
Corriente sin nombre	COPACABANA	0.36	0.00004	0.0078	0.03	No significativo
Corriente sin nombre	COPACABANA	0.67	0.00007	0.0149	0.05	No significativo
Corriente sin nombre	COPACABANA	0.01	0.00000	0.0000	0.00	No significativo
Corriente sin nombre	COPACABANA	0.25	0.00003	0.0009	0.02	No significativo
Corriente sin nombre	COPACABANA	0.48	0.00005	0.0018	0.04	No significativo
Corriente sin nombre	COPACABANA	0.36	0.00004	0.0072	0.03	No significativo
Corriente sin nombre	COPACABANA	0.23	0.00002	0.0008	0.02	No significativo
Corriente sin nombre	COPACABANA	0.78	0.00009	0.0156	0.06	No significativo
Corriente sin nombre	COPACABANA	0.37	0.00004	0.0014	0.03	No significativo
Corriente sin nombre	COPACABANA	0.28	0.00003	0.0040	0.02	No significativo
Corriente sin nombre	COPACABANA	0.04	0.00000	0.0006	0.00	No significativo
Corriente sin nombre	COPACABANA	0.12	0.00001	0.0062	0.01	No significativo
Corriente sin nombre	COPACABANA	0.39	0.00004	0.0204	0.03	No significativo
Corriente sin nombre	DON MATIAS	0.06	0.00001	0.0038	0.01	No significativo

NOMBRE DE LA CUENCA	MUNICIPIO	ÁREA (km ²)	DEMANDA (m ³ /s)	OFERTA DISTRIBUIDA (m ³ /s)	ÍNDICE ESCASEZ (%)	VALORACIÓN IDEAM
Corriente sin nombre	DON MATIAS	0.11	0.00001	0.0067	0.01	No significativo
Corriente sin nombre	DON MATIAS	0.13	0.00002	0.0080	0.01	No significativo
Corriente sin nombre	DON MATIAS	0.06	0.00001	0.0038	0.01	No significativo
Corriente sin nombre	DON MATIAS	0.10	0.00001	0.0060	0.01	No significativo
Corriente sin nombre	DON MATIAS	0.91	0.00013	0.0423	0.09	No significativo
Corriente sin nombre	GIRARDOTA	2.13	0.00148	0.0537	1.03	Mínimo
Corriente sin nombre	GIRARDOTA	1.35	0.00094	0.0321	0.66	No significativo
Corriente sin nombre	GIRARDOTA	1.09	0.00076	0.0267	0.53	No significativo
Corriente sin nombre	GIRARDOTA	0.38	0.00026	0.1410	0.18	No significativo
Corriente sin nombre	LA ESTRELLA	0.03	0.00001	0.0009	0.01	No significativo
Corriente sin nombre	LA ESTRELLA	0.15	0.00007	0.0049	0.05	No significativo
Corriente sin nombre	LA ESTRELLA	0.23	0.00011	0.0071	0.08	No significativo
Corriente sin nombre	LA ESTRELLA	0.12	0.00006	0.0038	0.04	No significativo
Corriente sin nombre	LA ESTRELLA	0.22	0.00011	0.0067	0.07	No significativo
Corriente sin nombre	LA ESTRELLA	0.12	0.00006	0.0037	0.04	No significativo
Corriente sin nombre	LA ESTRELLA	0.54	0.00026	0.0175	0.18	No significativo
Corriente sin nombre	LA ESTRELLA	0.20	0.00010	0.0064	0.07	No significativo
Corriente sin nombre	LA ESTRELLA	2.10	0.00101	0.0688	0.71	No significativo
Corriente sin nombre	LA ESTRELLA	0.68	0.00033	0.0219	0.23	No significativo
Corriente sin nombre	LA ESTRELLA	0.45	0.00022	0.0137	0.15	No significativo
Corriente sin nombre	MEDELLÍN	0.49	0.00112	0.0101	0.78	No significativo
Corriente sin nombre	MEDELLÍN	0.03	0.00008	0.0002	0.05	No significativo
Corriente sin nombre	MEDELLÍN	0.36	0.00082	0.0054	0.57	No significativo
Corriente sin nombre	MEDELLÍN	0.00	0.00001	0.0001	0.01	No significativo
Corriente sin nombre	SANTO DOMINGO	0.14	0.00001	0.0087	0.01	No significativo

Las cuencas que aparecen como “Corriente sin nombre”, están asociadas a pequeñas corrientes que por la escala de este estudio (1:25000) se desconoce su nombre, pero están asociadas a los gráficos que se muestran a continuación. En la Figura 2.30 (mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: “1LB”, objeto: “AG_Microcuenca, relacionado con datos de TB_AG_INDICE_ESCASEZ”), Figura 2.31 (mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: “1LB”, objeto: “AG_Microcuenca, relacionado con datos de TB_AG_INDICE_ESCASEZ”) y Figura 2.32 (mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: “1LB”, objeto: “AG_Microcuenca, relacionado con datos de TB_AG_INDICE_ESCASEZ”) se presentan los mapas de índice de escasez para los años 2006, 2019 y 2005 respectivamente.

Se observa que los mayores índices de escasez, los cuales se clasifican como “Alto” se encuentran en la zona central de la Cuenca, cerca al casco urbano del municipio de Medellín. Esto se evidencia en el hecho de que las cuencas en donde hay más presión

sobre el recurso agua son: Doña María (Sector perteneciente a Medellín), La Iguaña y Santa Elena. Las cuencas La Jabalcona, Doña María (Sector perteneciente a Itagüí), Piedras Blancas y Altavista, presentan un índice de escasez Medio Alto, dado que se encuentra ubicadas en zonas con densidades de población altas. Adicionalmente, las quebradas La García, La Ayurá, El Salado, Ovejas, La Hueso, La Picacha, La Presidenta y La Doctora presentan una situación de presión importante sobre el recurso, ya que el índice de escasez en estas cuencas es valorado como Medio.

En las zonas sur y norte de la Cuenca, los índices de escasez presentan principalmente valores Mínimos y No Significativos, lo cual refleja la poca densidad poblacional rural en estas áreas.

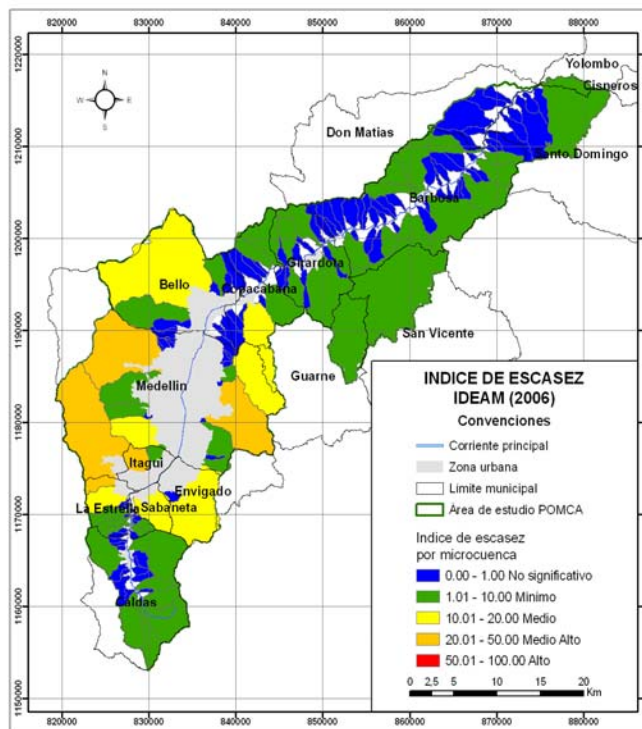


Figura 2.30. Índice de Escasez, Año 2006

Al comparar los mapas de la situación actual y el proyectado al 2025, es posible observar que para el escenario propuesto, en la mayoría de las cuencas el índice de escasez aumenta o sigue igual, haciéndose más notorio el cambio en la zona sur y centro de la Cuenca donde se presentan los índices de escasez más altos.

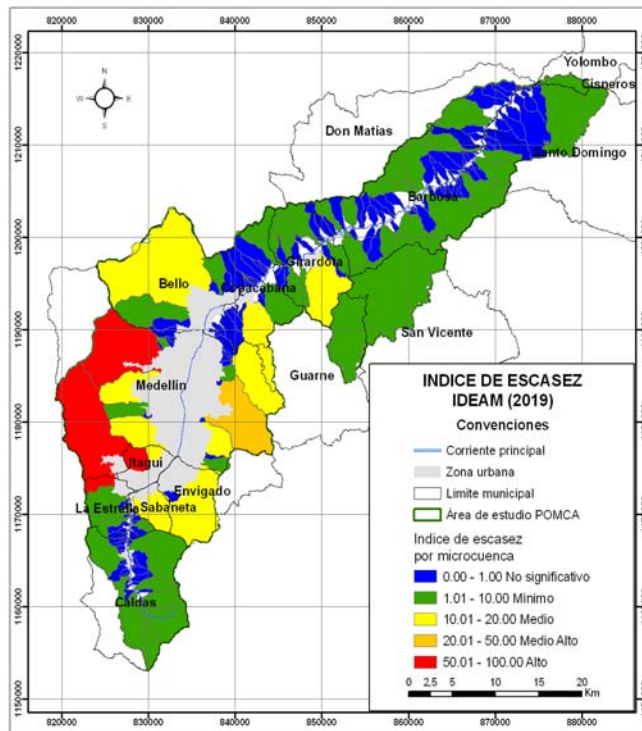


Figura 2.31. Índice de Escasez, Año 2019

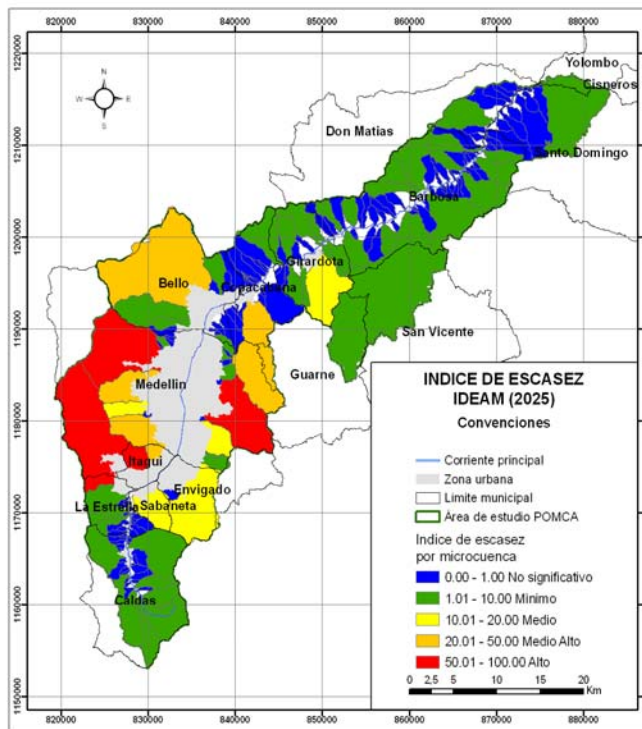


Figura 2.32. Índice de Escasez, Año 2025

2.4.12 Problemáticas identificadas

Después del análisis hecho en cuanto al abastecimiento de agua de los pobladores de la Cuenca se identificaron cuatro problemáticas específicas con respecto al uso del agua, cada una de esta es evaluada mediante un indicador para tener en cuenta cuales son las posibles tendencias. A continuación se hace una descripción de cada problemática con los indicadores propuestos para su evaluación, los que se explicarán más detalladamente en el capítulo de prospectiva.

▪ Dependencia hídrica de otras cuencas

Según lo analizado en el numeral de disponibilidad de agua potable en la Cuenca y teniendo en cuenta la Tabla 2.20, Tabla 2.21, y la Figura 2.18, es claro que el agua que actualmente se consume al interior de los municipios, en la zona urbana, del Área Metropolitana es traída principalmente de dos cuencas: Río grande y Pantanillo. Estas dos cuencas que son externas a la cuenca misma del Valle del Aburrá son las encargadas de proveer en un alto porcentaje el agua consumida al interior. En general la Cuenca del río Aburrá es importadora de los servicios públicos (agua y energía) y aunque esto en la actualidad no representa un problema, se ha decidido incluir esto como problema debido a que las empresas prestadoras de servicios deberán tener en cuenta en el futuro, el desarrollo que las regiones aledañas a estas cuencas puedan tener y su conservación como sitios de protección, de tal manera que puedan seguir contando con dichos servicios.

- Indicador: Porcentaje de agua traída de otras cuencas

El ochenta y tres por ciento (83%) del agua consumida en la zona urbana del Valle Aburrá proviene de las cuencas de los Ríos Grande y Pantanillo.

▪ Ilegalidad en el uso del agua

El trabajo realizado en el inventario de acueductos comunitarios y el análisis de la información de los estudios detallados de la Cuenca dan muestra de la falta de control existente en el valle en cuanto al aprovechamiento del agua, además las falencias de información encontrada en los expedientes de las entidades ambientales con jurisdicción en la Cuenca son la base para la definición de esta problemática. Además, se resalta como detonador de la problemática las limitaciones de cota que presenta EEPPM en la distribución del agua, lo que hace necesario para los usuarios rurales un abastecimiento de fuentes cercanas.

Aunque actualmente se realizan por parte de las instituciones ambientales grandes esfuerzos por legalizar las tomas de agua en la quebradas de la Cuenca, se han encontrado en trabajos de detalle (Figura 2.1), como Planes de manejo y Ordenamiento de Cuencas y Actualizaciones de la Red hídrica, que la gran mayoría de dichas tomas no están legalizadas. En el análisis de la información, la correlación entre las captaciones levantadas en los estudios detallados y la existente en las entidades oficiales es de aproximadamente el 10%, lo cual se considera muy bajo. Este problema es particularmente notorio en las partes altas, donde cada vez es más necesaria la toma de agua. Las captaciones en estos sitios son raramente legalizadas.

Indicador: Porcentaje de captaciones de agua superficial ilegales

■ **Uso y manejo irracional del recurso hídrico en la zona rural**

En las zonas rurales las obras de captación captan más agua que la concedida o en la mayoría de los casos no existen obras técnicamente construidas y diseñadas (Anexo digital A2.5). Según la Tabla 2.25, datos obtenidos a partir del levantamiento de información secundaria sobre acueductos veredales, se observa que las dotaciones, según el número de usuarios de los acueductos alcanzan valores absurdos, los cuales abastecerían a mínimo 2.5 personas en la zona urbana. Esto evidencia, el derroche de agua en la zona rural, y genera escasez en algunos sectores de estas zonas de la Cuenca. Los estudios de oferta y demanda hídrica se realizan con poca información permitiendo que algunas veces se adjudiquen caudales cercanos al medio, lo cual en épocas de verano hace que capte toda el agua que por allí transita, dejando a las fuentes sin el caudal mínimo ecológico.

■ **Baja oferta hídrica en las zonas rurales**

Como resultado del análisis de escasez en las zonas rurales de los municipios se observa en la Figura 2.30 alta presión por el recurso al centro de la Cuenca del río Aburrá, lo que tiende a empeorar con el tiempo (Figura 2.32). En la actualidad la gran mayoría de las zonas rurales deben recurrir a las quebradas más cercanas como fuentes de agua. Sin embargo fenómenos antrópicos y naturales han ocasionado la disminución notable en calidad y cantidad del recurso para estas comunidades.

Indicador: Índice de escasez (Resolución 0865 de 2004)

2.5 HIDRÁULICA

El desarrollo de la modelación hidráulica tiene como objeto determinar aspectos relacionados con la vulnerabilidad y el riesgo de algunos sectores críticos del río Aburrá (solo sobre la corriente principal) a lo largo del Valle con el fin de establecer planes de contingencia y delimitación de retiros.

Se logró una aproximación a la realidad mediante modelación de los niveles de inundación, basadas en información obtenida de secciones topográficas de estudios anteriores y a partir de cartografía de menor escala. Sin embargo a partir de las actividades realizadas en la etapa de recolección de información secundaria del proyecto en diversos centros de documentación de la ciudad, se logró establecer que son pocos los estudios actualizados y detallados que se encuentran a disposición sobre el estado hidráulico del río Aburrá.

Debido a la escala de trabajo (1:25000) no fue posible realizar este tipo de análisis para subcuencas o tributarios del río Aburrá existiendo de esta manera una mayor incertidumbre asociada a los resultados de la modelación. Debe tenerse en cuenta que en este proyecto no se realizó levantamiento de información primaria.

2.5.1 Información utilizada

Para la evaluación hidráulica del río Aburrá, se utilizó la información de los siguientes proyectos:

- “Diseño y Puesta en Marcha de la Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del río Medellín en jurisdicción del Área Metropolitana”, desarrollado para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá por las universidades Pontificia Bolivariana, de Antioquia, de Medellín y Nacional de Colombia Sede Medellín, con la interventoría de COLNET, 2005. Este estudio se realizó en un primer tramo comprendido entre Ancón Sur y Puente Acevedo, en el cual el río se encuentra canalizado, con una longitud total de 23,788 m y un total de 189 secciones.
- “Estudios y Diseños del Canal del río Medellín desde la quebrada El Hato en Bello hasta el puente de Girardota – Sectores 4 y 5”, desarrollado por el ingeniero civil, consultor y profesor Rodrigo Cano Gallego, contrato realizado para el Área Metropolitana en Abril de 2004, para cubrir una longitud total de 6,811 m y un total de 30 secciones.

- “Estudios y Diseños para la Canalización del río Medellín entre Copacabana y Girardota”, desarrollado por la Compañía Colombiana de Consultores S.A., contrato realizado para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en Agosto de 1998, para cubrir una longitud total de 7,023 m y un total de 120 secciones.

Los caudales máximos fueron estimados mediante la metodología Regionalización de Características Medias (los cuales se tomaron de Red Río Fase II).

También se utilizó información de la Planoteca del Metro de Medellín a partir de planos “As Build” de los tramos del Metro y de las canalizaciones, así como información sobre obras hidráulicas que se realizaron durante la construcción del mismo. Se obtuvieron secciones típicas teniendo en cuenta los cambios principales en los alineamientos vertical y horizontal.

El análisis de la información se hizo en tres tramos, dada la similitud de sus condiciones topográficas. El primer tramo se encuentra entre Ancón Sur y el municipio de Bello (desembocadura de la quebrada El Hato); el segundo va desde la quebrada El Hato hasta el municipio de Copacabana (antiguo sector retén de Mulas) y el tercero y último desde este punto hasta 40 m aguas arriba del puente de acceso a el municipio de Girardota.

Para el primer tramo de estudio se tenían 189 secciones transversales con longitudes alrededor del eje del río de hasta 23.78 m, levantadas de izquierda a derecha en dirección del flujo, con una separación promedio de 125.7 m entre secciones. Teniendo en cuenta la estabilidad de las secciones en este tramo del río, esta separación entre secciones transversales se consideró suficiente para obtener una primera aproximación del comportamiento hidráulico.

Para el segundo tramo se contó con 30 secciones transversales con distancias de 6.81 m (alrededor del eje del río), levantadas de izquierda a derecha en dirección del flujo, con una separación promedio de 227.0 m entre secciones.

En el tercer tramo se tenían 120 secciones transversales con distancias de 7.02 m, levantadas de izquierda a derecha y viceversa dependiendo de las condiciones de acceso a la sección transversal, todas levantadas en dirección del flujo, con una separación promedio de 58.5 m entre secciones.

Como la información de estructuras como disipadores de energía y puentes sobre el río no se pudo obtener, en la modelación no se consideraron tales obras a lo largo del corredor del río. Para esto sería indispensable realizar un inventario y levantamiento de estas estructuras, así como sería ideal evaluar el estado actual de las secciones utilizadas en la modelación hidráulica del tramo Ancón Sur-Acevedo.

En los dos últimos tramos se realizó una salida de campo con el fin de verificar de manera cualitativa las condiciones de las secciones transversales en dicho tramo. Se decidió utilizar esta información ya que se verificó que no se presentaban diferencias entre la información secundaria y lo visto en campo, tanto en ubicación sobre el río como en configuración sobre el eje de levantamiento y las márgenes.

De la Figura 2.33 a la Figura 2.35 se presentan las gráficas de algunas de las secciones y la fotografía de dicha sección tomada en la salida de campo, donde **MI** corresponde a la margen izquierda y **MD** margen derecha del río.

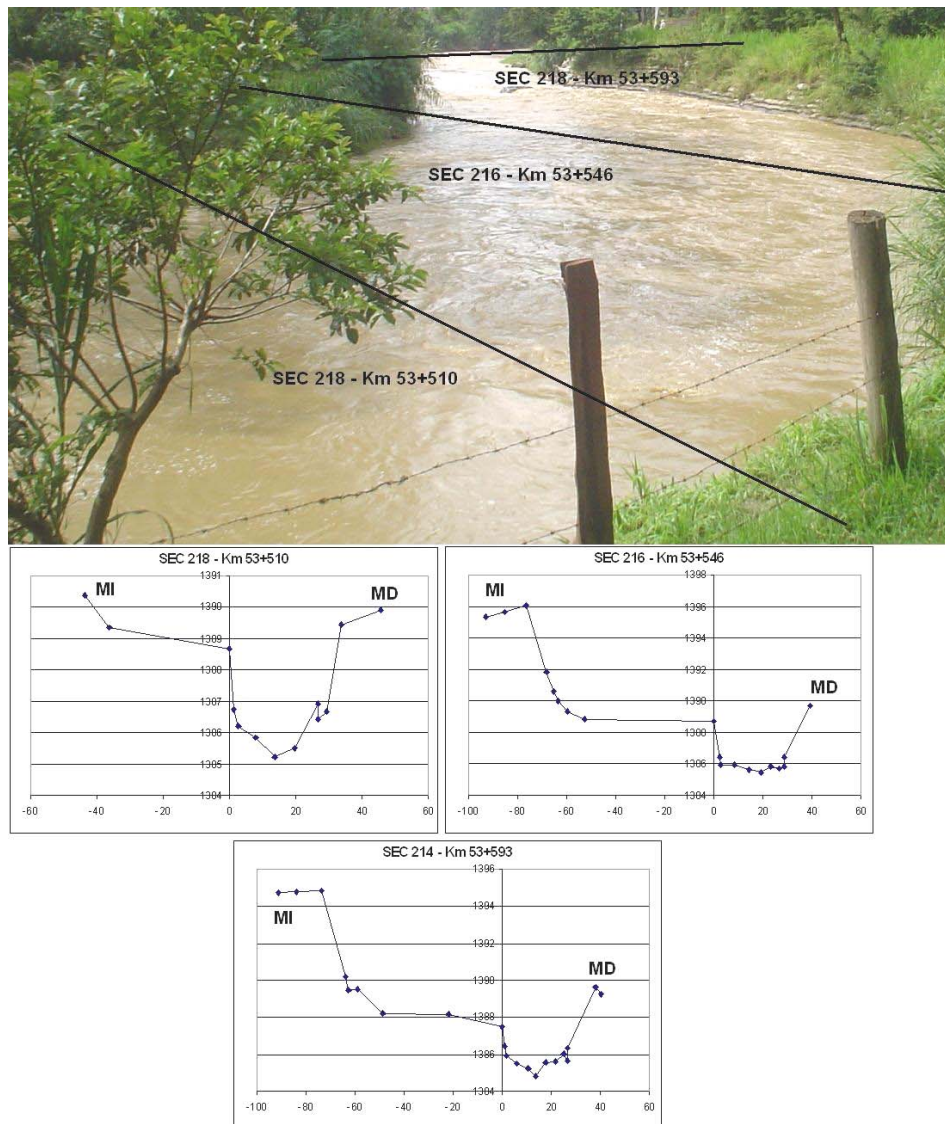
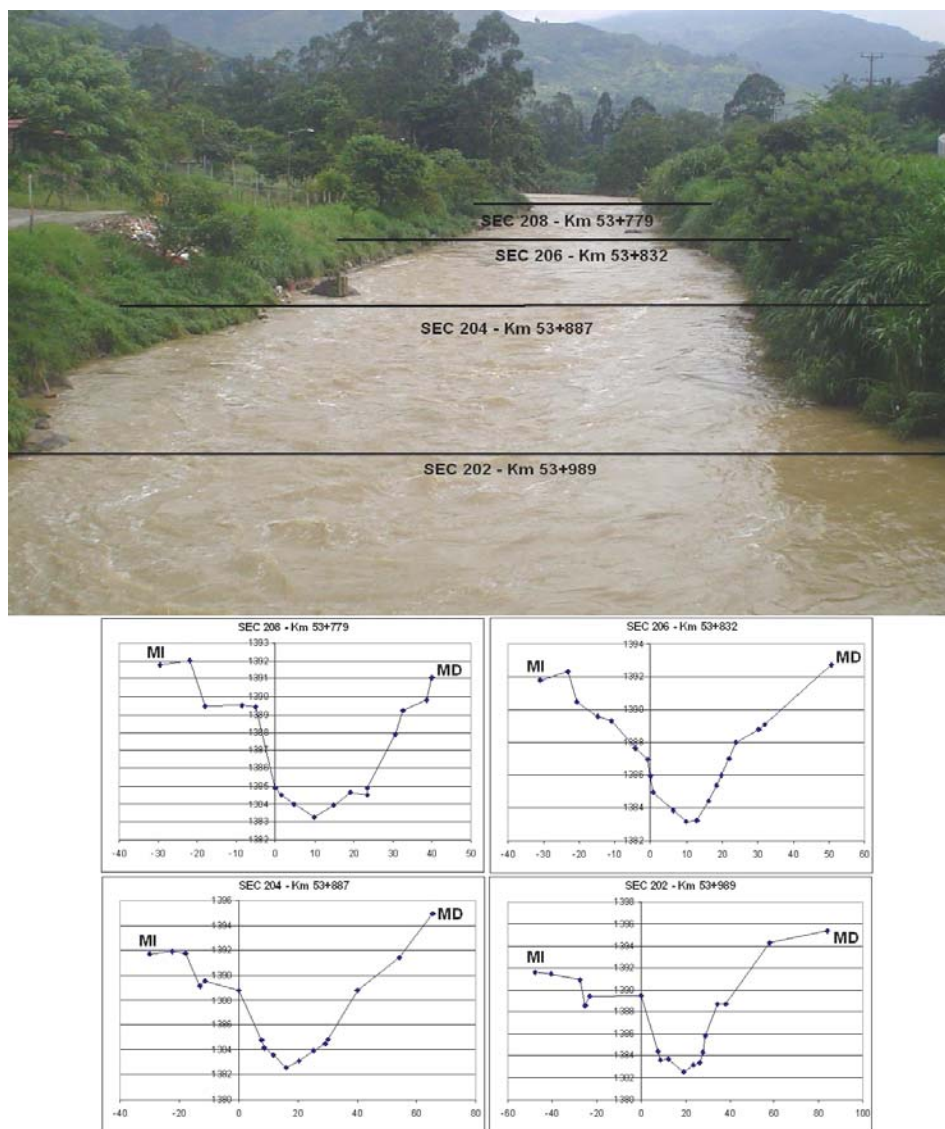


Figura 2.33. Secciones transversales verificadas en campo, Km 53+510 y Km 53+593. Sector vereda El Ancón.

Figura 2.34. Secciones transversales verificadas en campo, Km 53+778 y Km 53+989. Sector vereda El Ancón.



Los valores de la rugosidad de Manning se definieron en cinco estaciones de aforo de las utilizadas en el estudio Red Río Fase I, las cuales se muestran en la Tabla 2.43.

Tabla 2.43. Estaciones de aforo Red Río Fase I

Estación	X	Y
Ancón Sur	828,253.9	1,172,302.9
Antes de San Fernando	833,045.9	1,176,082.1
Puente Guayaquil	834,153.5	1,180,877.0

Estación	X	Y
Aula Ambiental	834,522.9	1,184,488.1
Puente Acevedo	836,275.1	1,189,174.5



SEC - 74
Km 58 + 531

SEC - 72
Km 58 + 564

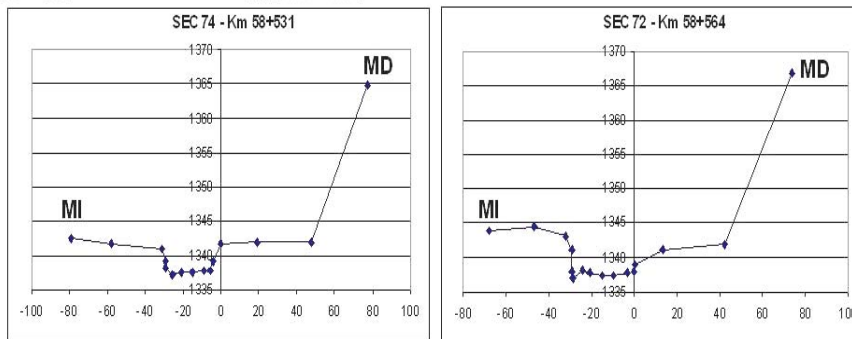


Figura 2.35. Secciones transversales verificadas en campo, Km 58+531 y Km 58+564. Sector acceso a Girardota.

2.5.2 Zona de Estudio

El tramo de estudio esta comprendido entre la estación Ancón Sur y el puente de acceso al municipio de Girardota. Presenta como características generales: márgenes con

taludes en concreto y naturales (hierva y rastrojo bajo) y lecho conformado principalmente por gravas, guijarros y lodo.

La zona de análisis comprende los municipios de Sabaneta, La Estrella, Envigado, Itagüí, Medellín, Bello, Copacabana y Girardota, y está canalizada a lo largo de los municipios: Sabaneta, La Estrella, Envigado, Itagüí y Medellín. Desde allí y hacia aguas abajo hasta el puente de acceso al municipio de Girardota el canal es natural (Figura 2.36).

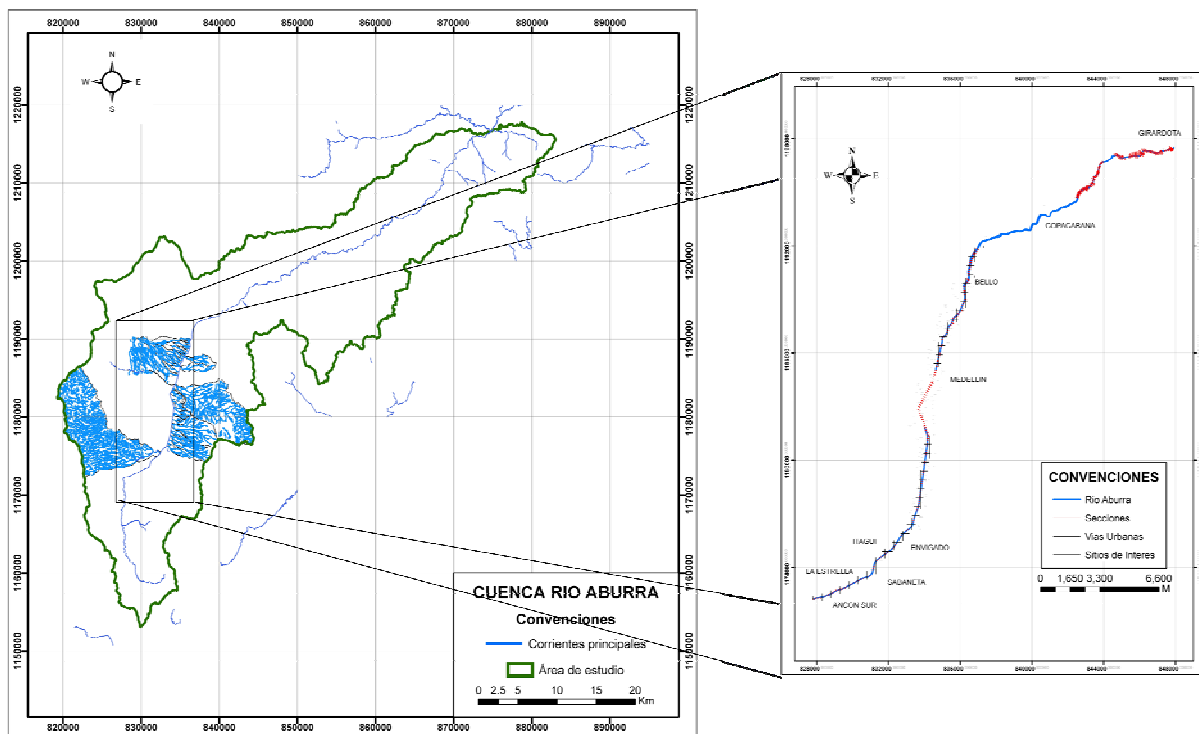


Figura 2.36. Esquema del modelo implementado

2.5.3 Características generales

Se tomó como abscisado de referencia el eje del río Aburrá, el cual se calculó desde su nacimiento. La sección inicial es la estación de aforo de Ancón Sur con abscisa K21+400, y la sección final se encuentra 40 m aguas arriba del puente de acceso al municipio de Girardota. La Tabla 2.44 y la 0 presentan las características más importantes de los tramos de la zona de estudio:

Tabla 2.44. Características generales del tramo de estudio

TRAMO	ANCHO MEDIO DE SECCIONES BASE (m)	PENDIENTE DE TALUDES	QUEBRADAS AFLUENTES
Km 21+400 a Km 24+800	15	1:5:1	La Doctora, Grande.
Km 24+800 a Km 29+500	20	MD: Verticales MI: 6:5:1	Doña Maria, Ayurá, La Aguacatala y La Jabalcona
Km 29+500 a Km 33+300	23	MD: 1:6:1 MI: 1:5:1	La Volcana, La Sucia, La Poblada, La Altavista y El Indio
Km 33+300 a Km 35+600	26	1:5:1	La Hueso, Loreto
Km 35+600 a Km 38+600	34	1:5:1	La Iguana, Santa Elena, El Ahorcado, Malpaso y La Chorrera
Km 38+600 a Km 42+100	38	1:5:1	La Quintana, Minitas, La Rosa, Tozcana y Granizal
Km 42+100 a Km 48+210	35	MI: 1:4:1 MD: 1:3:1	El Hato, La García y La Maquina
Km 48+210 a Km 49+291	17	MI: 1:1:1 MD: 1:3:1	-----
Km 49+291 a Km 51+791	21	MI: 1:3:1 MD: 1:2:1	Occidental
Km 51+791 a Km 54+619	42	MI: 1:0.5:1 MD: 1:1:1	La Tolda, El Chuzcal, y Oriental 1
Km 54+619 a Km 55+053	30	MI: 1:3:1 MD: Verticales	Los Aguacates
Km 55+053 a Km 58+564	36	MI: 1:0.5:1 MD: 1:1.5:1	Quebraditas, San José

Tabla 2.45. Características generales de los tramos de estudio

PARÁMETRO	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TOTAL
Pendiente Máxima (%)	7.69	2.54	5.45	7.69
Pendiente Mínimo (%)	0.02	0.04	0.04	0.02
Pendiente Media (%)	0.97	0.62	1.29	1.05

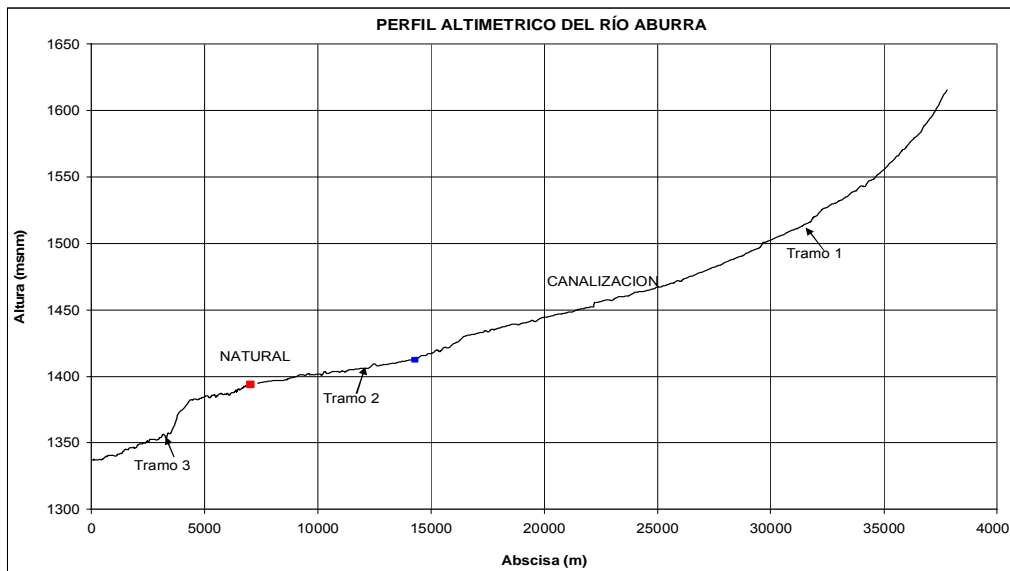


Figura 2.37. Perfil altimétrico del tramo de estudio

2.5.4 Modelación hidráulica

La modelación del tránsito hidráulico de caudales máximos para periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años fue realizado utilizando el programa HEC-RAS versión 3.1.1, desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center. El software requiere como datos de entrada las condiciones de borde, el régimen de flujo, las características de la sección transversal entre ellas los niveles de la sección a banca llena y el valor de rugosidad de Manning η : La solución incluye la ecuación para flujo gradualmente variado en canales naturales y artificiales en régimen permanente. Las profundidades de flujo se calcularon a partir del método estándar por pasos y como resultado del modelo se obtuvo la superficie libre del agua asociada a una condición de caudal impuesta que puede variar a lo largo del cauce.

- **Descripción general del modelo hidráulico HEC-RAS**

El modelo HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Análisis System) fue elaborado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de Norteamérica (USA - COE), basado en la ecuación de energía y la ecuación de Momentum lo cual le permite operar bajo las condiciones de flujo permanente y gradualmente variado en corrientes naturales o canales artificiales. Es aplicable a un tramo aislado, a un sistema dendrítico, una red compleja con canales e incluso a circuitos cerrados. Maneja regimenes tales como flujo subcrítico, supercrítico o régimen mixto; basado en la solución de la ecuación de energía para flujo a superficie libre y conjuntamente con la ecuación de continuidad, además

calcula: pérdidas por fricción consideradas a través de la ecuación de Manning y pérdidas locales por expansión y contracción. El modelo emplea la ecuación de cantidad de movimiento para casos de flujo rápidamente variado, régimen combinado, resaltos hidráulicos, puentes, alcantarillas, box culverts, confluencias y desviaciones; finalmente considera el efecto de obstrucciones en el flujo y el análisis de planicies de inundación.

La experiencia en la modelación hidráulica del río Aburrá, del proyecto Red Río Fase I, demuestra que el modelo a pesar de sus restricciones entrega resultados útiles desde el punto de vista práctico.

Las pérdidas de energía ocasionadas por la fricción del agua con el perímetro mojado de la sección, el programa las calcula entre secciones como el producto de la pendiente media de la línea de energía y la longitud de las bancas y el canal y luego ponderada con los caudales. Las pérdidas locales por contracciones o expansiones, las calcula como un porcentaje del gradiente de la cabeza de velocidad entre las secciones. La modelación se realizó para la opción de flujo mixto que permite diferenciar tramos con flujo subcrítico y supercrítico.

Los coeficientes de rugosidad fueron inicialmente obtenidos a partir de comparación visual con valores previamente registrados en la literatura. Además de la metodología aplicada en esta primera fase, se debe considerar, en estudios posteriores, la posibilidad de realizar una determinación directa de este parámetro a partir del método propuesto por Wolman (Wolman, 1954 en Smart, 2004) en subtramos previamente definidos a lo largo del cauce en el tramo de estudio, y de esta manera, comparar los valores obtenidos en campo con estudios existentes que contengan información relacionada con el material de fondo del río Aburrá y los valores registrados en la literatura.

Los caudales máximos fueron estimados mediante la metodología de Regionalización de Características Medias, tomados del estudio Red Río Fase II los cuales se muestran en la Tabla 2.46. El incremento de caudales de una sección a otra se realizó en algunos puntos donde llegan afluentes al río. Esta consideración se realizó para el balance de masa entre secciones pero no pretende simular canales reales, se utilizan geometrías típicas y pendientes iguales a los tramos asociados. Para el balance se utilizan cuatro (4) afluentes como se mostró en la Figura 2.36.

▪ **Calibración del modelo**

La calibración del modelo hidráulico fue llevada a cabo con los niveles observados en las cinco secciones transversales de control, correspondientes a las secciones de aforos levantadas durante las campañas de campo realizada en Red Río Fase I y la modelación

se hizo con los caudales estimados en los sitios de aforo por medio de regionalización de características medias de Red Río Fase II.

Tabla 2.46. Caudales máximos estimados en los sitios de aforo según regionalización de características medias (m³/s)

ESTACIÓN	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2.33	5	10	25	50	100
Ancón Sur	42.55	58.28	71.09	87.28	99.30	111.22
Antes de San Fernando	80.47	101.66	118.92	140.73	156.91	172.97
Quebrada Aguacatala	96.16	124.59	147.75	177.01	198.71	220.26
Puente Guayaquil	112.61	139.69	161.76	189.63	210.31	230.84
Aula Ambiental	159.27	194.16	222.59	258.49	285.13	311.58
Puente Acevedo	171.34	208.14	238.12	275.99	304.09	331.99

Fuente: Red Río Fase II, 2005.

Los niveles observados en campo fueron comparados con los niveles que el modelo estima empleando los caudales de las campañas de aforo en cada una de las secciones, es decir, para cada sección se conocía el caudal y la lamina de agua, con el fin de minimizar las diferencias entre los niveles medidos y simulados por debajo del 10%.

La calibración del modelo consistió en encontrar un valor de rugosidad de Manning n que represente las pérdidas y ganancias de energía en cada tramo, ajustando el nivel simulado al observado. En la Tabla 2.47 y la 0 se presentan los valores de los niveles observados y calculados. Este criterio es muy conservador, ya que se obtuvieron valores de Manning altos, debido a que de este parámetro tiene en cuenta la disipación de la energía que producirían las estructuras hidráulicas en caso que ellas estuvieran.

Tabla 2.47. Niveles observados y encontrados

SECCIÓN	ESTACIÓN	ALTURA MÁXIMA SECCIÓN (m)				VALORES DE Manning		
		Observado	Modelo	ϵ	%	Banca Izq	Central	Banca Der.
Km 20+942	Ancón Sur	0.56	0.50	-0.06	10.71	0.016	0.040	0.016
Km 27+850	A. San Fernando	0.90	0.96	0.06	6.67	0.016	0.050	0.016
Km 33+378	Puente Guayaquil	0.92	0.96	0.04	4.35	0.016	0.050	0.016
Km 37+000	Aula Ambiental	0.69	0.62	-0.07	10.14	0.016	0.060	0.016
Km 41+568	Puente Acevedo	0.80	0.85	0.05	6.25	0.016	0.060	0.016

Tabla 2.48. Características hidráulicas de las secciones.

SECCIÓN	ESTACIÓN	Q TOTAL (m3/s)	MÍNIMO NIVEL CANAL (m)	NIVEL DEL AGUA (m)	PENDIENTE ENERGÍA (m/m)	VELOCIDAD CANAL (m/s)	ÁREA DE FLUJO (m ²)	ANCHO SUPERFICIAL (m)	Froude
Km 20+942	Ancón Sur	4.79	1,600.21	1,600.71	0.024524	1.74	2.75	9.17	1.02
Km 27+850	A. San Fernando	7.16	1,510.11	1,511.07	0.002596	0.71	10.15	17.12	0.29
Km 33+378	Puente Guayaquil	9.91	1,467.90	1,468.86	0.001945	0.62	15.17	27.13	0.26
Km 37+000	Aula Ambiental	13.53	1,451.60	1,452.22	0.00919	0.93	13.9	33.29	0.45
Km 41+568	Puente Acevedo	23.09	1,431.36	1,432.21	0.003774	0.83	26.12	38.17	0.31

Una vez obtenida la calibración del modelo, se procedió a transitar los caudales máximos.

■ **Análisis de resultados**

De acuerdo a la modelación se observó como en ningún sitio el nivel desborda el canal, incluso ni para el caudal de periodo de retorno de 100 años. Así mismo, las velocidades máximas encontradas son del orden de 5 m/s y se presentan en la primera zona Km 21+400 a Km 24+000, donde las pendientes son más altas, y el estado del flujo es supercrítico (valores de Froude mayores que 1). La lámina de agua máxima para el periodo de retorno de 100 años en dicha zona alcanza 1.65m.

En general las condiciones de flujo para las demás zonas del río presentaron régimen de flujo es subcrítico (números de Froude menores que 1). Las máximas velocidades son 3.6 m/s en la zona del puente de Guayaquil con valores máximos para el nivel de agua de 3.76 m en la zona de Acevedo. Para todos los caudales y periodos de retorno en la escala trabajada, el perfil de flujo no representa cambios en el régimen de flujo, ni el efecto de disipadores y estructuras existentes a lo largo del río.

2.5.5 Ocurrencia de eventos de inundación en la Cuenca

El objetivo de este parte del trabajo busca medir de forma cuantitativa y cualitativa cuales son las corrientes con problemas de inundación y por ende que más afectan la comunidad. En algunos casos las causas pueden estar asociadas a la ocurrencia de los eventos (frecuencia), y en otros a la magnitud de éstos (impacto en la comunidad), dejando consecuencias fatales en la comunidad.

■ **Información disponible**

La principal fuente de información se obtuvo de la base de datos implementada en el software DesInventar 6.2.8, el cual es una herramienta útil, sencilla y eficaz, que permite

inventariar, organizar, clasificar y analizar la información de los reportes existentes de desastres.

En el Valle de Aburrá se contó con una base de datos (Desinventar), la cual se adquirió de manera gratuita en la Web desarrollada por Ricardo Saldarriaga, en el trabajo *“Inventario y Sistematización de los Desastres Naturales reportados en los municipios del Valle de Aburrá, entre los años 1900 y 2002”*. Esta base de datos fue actualizada hasta octubre de 2006 por Edier Aristizábal G. funcionario del Departamento de Prevención de Desastres del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Las fuentes de información de esta base de datos fueron facilitadas por los centros de documentación de las siguientes instituciones: Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), Corporación Autónoma Regional del centro de Antioquia (Corantioquia), Dirección Nacional de Prevención y Atención de Desastres - Observatorio Sismológico del Sur Occidente Colombiano (DNPAD – OSSO), Departamento Administrativo del Sistema de Prevención, Atención y Recuperación de Desastres (DAPARD), Sistema Municipal de Prevención y Atención de Desastres (SIMPAD), Dirección de Prevención y Atención de Desastres (DIPAD – Bello), Alcaldías de cada uno de los municipios del Valle de Aburrá y sus entes relacionados a la temática investigada (Planeación Municipal, Comités Locales de Emergencias (COLE), Obras Públicas, Bomberos, Cruz Roja, Defensa Civil, etc.). También fueron consultados algunos institutos de formación profesional y bibliotecas públicas, tales como: La Universidad de Antioquia, La Universidad Nacional sede Medellín, La Universidad EAFIT, La Escuela de Ingenieros de Antioquia y La Biblioteca Pública Piloto (Sala de Antioquia) entre otras.

De esta manera existe información disponible, desde el año 1900 hasta el 2006, donde la mayor cantidad de registros procesados cuentan con buena información a partir de 1975 hasta 2006, intervalo escogido para el análisis en esta parte del trabajo.

La base de datos cuenta con registros que describen de manera muy explícita el evento, fecha en la que ocurrió, lugar, damnificados, descripción de la causa, pérdidas, entre otros.

La información disponible fue filtrada de tal manera que sólo se consultaron eventos de inundación, avenidas, y deslizamientos. Se identificó el nombre de la corriente hasta donde la información lo permitía, sin entrar en un alto grado de detalle. Para realizar esto, sólo se consideraron los registros que explícitamente mencionaban el nombre de la corriente afectada y en algunos casos se identificó dicha corriente a partir de la vereda donde ocurrió el evento, el barrio, o alguna otra aproximación al lugar. En Medellín se trabajó haciendo uso de la información del SIGAM, que es la misma que se tiene en la base de datos para Medellín. La mayoría de ésta se encuentra incorporada en un SIG, lo que permitió obtener de manera más ágil y precisa los resultados obtenidos.

Con las corrientes identificadas se contabilizó el número de veces que se repetía en el tiempo un evento de inundación, y se determinó la “amenaza” de la corriente en cuestión, caracterizada por la frecuencia con que los eventos se presentaron. Es importante mencionar que la denominada “amenaza” en este trabajo está solamente influenciada por la frecuencia de los eventos ocurridos a lo largo del tiempo y que fueron agregados hasta la fecha para cada quebrada, en ningún momento la magnitud del evento hace parte de esta definición.

En la Tabla 2.49 se presenta la discretización empleada en las frecuencias estudiadas, para los 30 años en estudio (1975 -2006).

Tabla 2.49. Intervalos que evalúan la amenaza

FRECUENCIA	AMENAZA
1-4	Baja
5-10	Media
11-15	Alta
> 15	Muy alta

Estos rangos fueron definidos teniendo en cuenta la escala del proyecto, como producto del análisis de la información.

▪ **Análisis de la información**

La mayoría de los registros revisados muestran que los eventos ocurrieron en las zonas más antropizadas, es decir, en las zonas urbanas de los diferentes municipios. En los municipios de Caldas, Barbosa, Girardota e Itagüí, la afectación, en menor grado, también implicó zonas rurales. Las Tabla 2.50 y Figura 2.38 (mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: “1LB”, objeto: “AG_Pts_criticos_rio y AG_Quebrada_riesgo”) muestran el grado de “amenaza” para las quebradas de cada municipio. Hay que tener en cuenta que allí no se presentan sitios exactos de los eventos, sino que se hace referencia a los ocurridos desde el nacimiento hasta la desembocadura y que la amenaza esta asociada al número de eventos sucedidos en cada una de las quebradas.

Tabla 2.50. Corrientes que han presentado problemas de inundación

MUNICIPIO	CORRIENTE	AMENAZA	CORRIENTE RECEPTORA
Medellín (Urbana)	Río Aburrá	Muy Alta	Río Porce
	Quebrada La Iguana	Muy Alta	Río Aburrá
	Quebrada La Guayabala	Media	Quebrada Altavista
	Quebrada La Presidenta	Baja	Río Aburrá
	Quebrada La Hueso	Alta	Río Aburrá
	Quebrada La Picacha	Media	Río Aburrá

MUNICIPIO	CORRIENTE	AMENAZA	CORRIENTE RECEPTORA
	Quebrada Altavista	Alta	Río Aburrá
	Quebrada Ana Díaz	Media	Quebrada La Hueso
	Quebrada La Herrera	Baja	Río Aburrá
	Quebrada La Aguacatala	Baja	Río Aburrá
	Quebrada La Palencia	Alta	Quebrada Santa Elena
	Quebrada La Minita	Alta	Río Aburrá
	Quebrada La Máquina	Alta	Quebrada La Bermejala
	Quebrada La Morena	Baja	Río Aburrá
	Quebrada La Lorencita	Baja	Quebrada La Aguacatala
	Quebrada Malpaso	Baja	Río Aburrá
	Quebrada La Chorrera o El Molino	Alta	Río Aburrá
	Quebrada Santa Rita	Baja	Quebrada Altavista
	Quebrada La Quintana	Alta	Río Aburrá
	Quebrada La Cantera	Baja	Río Aburrá
	Quebrada Betania 1	Baja	Quebrada Ana Díaz
	Quebrada La Bermejala	Medio	Río Aburrá
	Quebrada Carevieja	Baja	Quebrada La Rosa
	Quebrada Cañada Negra	Baja	Quebrada La Honda
	Quebrada Santa Elena	Alta	Río Aburrá
	Quebrada El Salado	Baja	Quebrada La Hueso
	Quebrada Seca	Baja	Río Aburrá
	Quebrada Santa Cruz	Baja	Río Aburrá
	Quebrada La Gómez	Baja	Quebrada La Iguana
	Quebrada Chorrohondo	Media	Quebrada Santa Elena
	Quebrada La Cangreja	Media	Quebrada Santa Elena
	Quebrada La Honda	Media	Quebrada Chorrera
	Quebrada Juan Bobo	Baja	Río Aburrá
	Quebrada El Ahorcado	Baja	Río Aburrá
	Quebrada La Castro	Baja	Río Aburrá
	Quebrada La Pastora	Baja	Quebrada Santa Elena
	Quebrada La Madera	Baja	Río Aburrá
	Quebrada Aguacatillo	Baja	Quebrada La Rosa
	Quebrada La Rosa	Medio	Río Aburrá
	Quebrada El Ahorcado	Medio	Río Aburrá
	Quebrada El Chupadero	Baja	Quebrada Santa Elena
	Quebrada El Zancudo	Medio	Quebrada La Rosa
	Quebrada La Gallinaza	Baja	Quebrada Santa Elena
	Quebrada La Corcobada	Baja	Quebrada Santa Elena
	Quebrada Pela Huesos	Baja	Quebrada La Hueso
	Quebrada La Picacha (Picacho)	Baja	Río Aburrá
	Quebrada Sucia	Baja	Río Aburrá
	Quebrada La Mansión	Alta	Quebrada Santa Elena
	Quebrada La Francia	Media	Río Aburrá
	Quebrada Doña María	Alta	Río Aburrá

MUNICIPIO	CORRIENTE	AMENAZA	CORRIENTE RECEPTORA
Caldas	Río Aburrá	Baja	Río Porce
	Quebrada La Valeria	Media	Río Aburrá
	Quebrada La Corrala	Media	Río Aburrá
	Quebrada La Chuscala	Media	Río Aburrá
	Quebrada La Limona	Media	Sin Definir
	Quebrada Mandalay	Medio	Quebrada La Chuscala
	Quebrada La Clara	Baja	Río Aburrá
	Quebrada La Limona	Baja	Quebrada La Valeria
	Quebrada La Inmaculada	Baja	
La Estrella	Río Aburrá	Baja	Río Porce
	Quebrada La Grande	Media	Río Aburrá
	Quebrada San Martín	Baja	Quebrada La Grande
	Quebrada La Muñoz	Alta	Quebrada Doña Maria
	Quebrada Bermejala	Baja	Río Aburrá
	Quebrada la Tablacita	Media	Río Aburrá
	Quebrada La Chocha	Media	Quebrada Grande
Sabaneta	Quebrada La Doctora	Alta	Río Aburrá
	Quebrada La Sabanetica	Media	Quebrada la Doctora
	Quebrada Cien Pesos	Media	Quebrada la Doctora
	Quebrada Yoconda	Media	Quebrada la Doctora
	Quebrada San Alejo	Baja	Quebrada la Doctora
	Quebrada La Honda	Baja	Sin Definir
Envigado	Quebrada La Ayura	Alta	Río Aburrá
	Quebrada La Mina	Media	Río Aburrá
	Quebrada Chingui N°1	Media	Quebrada La Ayurá
Itagüí	Quebrada Doña Maria	Alta	Río Aburrá
	Quebrada La Tablaza	Alta	Quebrada Doña Maria
	Quebrada La Justa	Alta	Quebrada Doña Maria
	Quebrada La Arenala	Media	Quebrada Doña Maria
	Quebrada La Muñoz	Alta	Quebrada Doña Maria
	Quebrada Olivares	Media	Quebrada Doña Maria
	Quebrada La Pedregala	Baja	Quebrada La Tablaza
	Quebrada La Jabalcona	Bajo	Río Aburrá
	Quebrada El Ajisal	Baja	Quebrada La Jabalcona
Bello	Quebrada La García	Muy Alta	Río Aburrá
	Quebrada El Barro	Alta	La García
	Quebrada Hato Viejo	Media	Río Aburrá
	Quebrada La Loca	Media	Río Aburrá
	Quebrada Rodas	Baja	Río Aburrá
	Quebrada Tierradentro	Baja	La Chiquita
	Quebrada La Gabriela	Baja	Sin Definir
	Quebrada La Chiquita	Baja	La García
Copacabana	Río Aburrá	Media	Río Porce
Girardota	Río Aburrá	Media	Río Porce

MUNICIPIO	CORRIENTE	AMENAZA	CORRIENTE RECEPTORA
Barbosa	Quebrada El Salado	Media	Río Aburrá
	Quebrada Hatillo	Media	Río Aburrá

En algunas de estas corrientes se produjeron eventos que causaron muertes y dejaron cientos de damnificados. En la Tabla 2.51, se muestra el número de muertos y de damnificados que algunas de estas corrientes han generado a través de la historia.

Tabla 2.51. Número de muertos y afectados en las quebradas de acuerdo al inventario de desastres más críticos

MUNICIPIO	CORRIENTE	No. MUERTOS	No. AFECTADOS
Caldas	Q. La Corrala		102
	Q. La Valeria		400
La Estrella	Q. La Bermejala	2	2
	Q. La Muñoz		342
	Río Medellín		150
Itagüi	Q. La Tablaza	9	500
	Q. Olivares	1	261
	Q. Doña María	2	27
	Q. Pedregala	1	20
	Q. La Justa	29	29
Sabaneta	Q. La Doctora	1	131
	Q. Cien Pesos		7
	Q. La Sabanetica		25
Envigado	Q. La Ayurá	8	
Medellín	Q. Chorro Hondo	1	1
	Q. Palencia	1	20
	Q. La Maquinita	2	10
	Q. La Gómez	2	2
	Q. Pelahueso	2	2
	Q. La Iguaná	14	120
	Q. La Altavista	8	80
Bello	Q. El Barro	38	sin cuantificar
	Q. La Loca		300
Barbosa	Q. La López	17	

Las veinticinco corrientes en las que se encontró información sobre muertos y damnificados se encuentran en zonas de amenaza media a alta (Tabla 2.50). En el río Aburrá se reportaron seis lugares críticos donde se han producido inundaciones recurrentes (Tabla 2.52). El canal cerca de la Macarena es uno de los lugares con mayor cantidad de inundaciones registradas, así como Santa Cruz y Moravia. En estos cuatro sitios se presentan aportes de afluentes directos al río Aburrá (Santa Cruz, Moravia, La Rosa y San Isidro).

Tabla 2.52. Sitios críticos por inundación en el río Aburrá

LUGAR	AÑO	FRECUENCIA/AÑO
La Macarena	1982	2
	1988	2
	1992	1
	1993	2
	1996	1
SUBTOTAL = 8		
Santacruz	1988	1
	1991	1
	1993	1
	1995	1
	1996	1
	2002	1
SUBTOTAL = 6		
Moravia	1988	1
	1989	1
SUBTOTAL = 2		
La Rosa	1989	1
	1991	1
	1993	1
	1995	1
	1996	1
SUBTOTAL = 5		
San Isidro	2002	1
	1999	1
SUBTOTAL = 2		
Perpetuo Socorro	1982	1
	SUBTOTAL = 1	
TOTAL		24

■ **Correlación de zonas críticas de inundación con los resultados de la hidráulica**

Los resultados del modelamiento hidráulico para esta etapa de diagnóstico indican que para un periodo de retorno de 100 años, el canal del río Aburrá en el tramo modelado, tiene suficiencia hidráulica, por lo tanto no se identifican zonas de inundación en ninguna de las márgenes del río; así mismo, el viaducto del Metro de Medellín sobre el río Aburrá en proximidades a la Estación Ayurá tiene suficiencia hidráulica.

En los sitios en los que se han identificado como críticos según la ocurrencia de eventos de inundación a lo largo del río Aburrá y sus principales afluentes, se presenta el comportamiento hidráulico en la Tabla 2.53. Según los niveles reportados de acuerdo a la modelación, en el río no se presentan inundaciones.

Tabla 2.53. Correlación entre el comportamiento hidráulico para un $T_r = 100$ años en sitios críticos de inundación

LOCALIZACIÓN	VELOCIDAD (m/s)	ELEVACIÓN DEL AGUA (m)
Barrio Perpetuo Socorro	2.63	2.82
Plaza de Toros La Macarena	2.50	4.25
Barrio Moravia	2.03	4.32
Barrio Palermo	2.36	4.34
Barrio San Isidro	2.37	4.44
Barrio San La Rosa	2.24	3.84
Barrio Santa Cruz	1.02	3.94

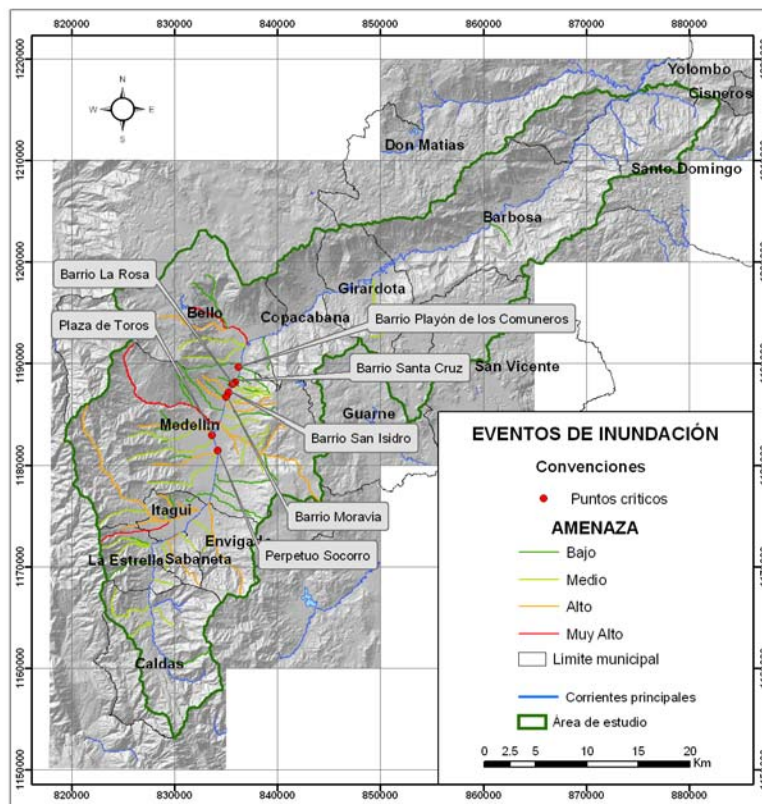


Figura 2.38. Zonas críticas por eventos de inundación: Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Sin embargo los resultados de la modelación hidráulica no reflejan los eventos de inundación que se han presentado en el río Aburrá en los últimos años, por lo tanto, se propone implementar una metodología basada en escenarios que incluyan eventos de precipitación factibles en la Cuenca, teniendo en cuenta los aportes puntuales de las quebradas más importantes y los caudales que aporta la central Tasajera al río en la zona Norte. La metodología de calibración y validación debe tener buena información, para lo cual se hace necesario contar con los registros de telemetría de EEPPM a lo largo del río.

Como complemento a estos resultados el estudio “Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones en el Valle de Aburrá”, realizado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y el Grupo de Sismología de Medellín posee información acerca de eventos históricos de inundación reportados en todo el Valle y la cual es importante tener en cuenta para la definición de las zonas de amenaza por inundación.

2.5.6 Problemáticas identificadas

A partir del análisis de la información de los estudios detallados revisados se definieron unas problemáticas comunes en las corrientes de aguas: repetidas inundaciones y desbordamientos. Las corrientes en el Valle de Aburrá, en la zona urbana, se encuentran con muchas modificaciones antrópicas, con cauces y zonas aledañas invadidos, lo que se evidencia en la base de datos Desinventar 6.2.8, donde se describen detalladamente las causas y los efectos de los desastres del valle relacionados con el recurso hídrico. En el procesamiento de los datos del Desinventar se catalogaron las corrientes considerando la amenaza a inundación por la frecuencia de eventos de este tipo (Tabla 2.50 y Figura 2.38).

■ Desarticulación de obras hidráulicas

Las obras hidráulicas realizadas en la gran mayoría de las corrientes responden a la solución de problemas puntuales y sus implicaciones no son tenidas en cuenta en obras ya existentes o en canales naturales adyacentes. La presencia de obras sin una articulación clara a nivel hidráulico con la corriente es cada vez más común en nuestro medio, tanto en la zona rural como en la urbana.

- Indicador: Porcentaje de Intervención sobre el cauce

■ Inadecuadas obras hidráulicas

En las corrientes principales del Valle se han encontrado sitios recurrentes con problemas de inundación, para lo cual es evidente la necesidad de obras hidráulicas bien diseñadas. Se definen como puntos críticos al punto o, línea o área que en el levantamiento de campo detallado fuera calificado de tal modo que requiriera acción inmediata.

- Indicador: Cantidad de Puntos críticos

■ **Mantenimiento y rehabilitación de cauces naturales y obras hidráulicas**

Los trabajos detallados han dado cuenta de la no existencia de un programa preventivo de mantenimiento y rehabilitación de las obras hidráulicas y solo se realizan acciones de mitigación. La existencia de obras con problemas debidos al taponamiento de las secciones por sedimentos, basuras, envejecimiento y fisuramiento de las obras se presenta cada vez con más frecuencia y representan un riesgo que puede ser prevenido.

- Indicador: Número de sitios con falta de mantenimiento y/o rehabilitación de obras hidráulicas

■ **Aumento de escorrentía**

La urbanización creciente hace que cada vez más, se genere una mayor escorrentía directa con poca infiltración. El incremento del área urbanizada genera un aumento en los caudales máximos que transitan por las canales. (Ver Diagnóstico, Capítulo 8).

- Indicador: Porcentaje del aumento de urbanizaciones en zonas antes no utilizadas

■ **Insuficiencia en la capacidad hidráulica**

La gran mayoría de las coberturas (box-culverts) fueron diseñadas con caudales hallados con unas condiciones de cobertura vegetal y usos del suelo muy diferentes a los actuales. Debido al incremento de la mancha urbana, la escorrentía ha aumentado y las estructuras hidráulicas se han vuelto insuficientes. Además, las autoridades ambientales que son las competentes de otorgar los permisos de intervención no tienen criterios claros para el dimensionamiento en función de la capacidad.

- Indicador: Número de sitios con insuficiencia hidráulica

2.6 CALIDAD DEL AGUA

Como parte del diagnóstico de una cuenca (Decreto 1729 de 2002), las autoridades ambientales tienen que establecer los criterios de calidad de agua que deben alcanzarse para garantizar la sostenibilidad del recurso; sin embargo, los mecanismos de recuperación y/o protección de las fuentes de la cuenca deben ser aplicados previo conocimiento de los procesos naturales y antrópicos que ejercen mayor presión sobre las mismas.

En este sentido se han realizado numerosos estudios en los que se evalúa el estado de la calidad del agua de las fuentes superficiales y subterráneas de la Cuenca del río Aburrá, tal como se especifica en el Decreto 3440 de 2004 (Artículo 6), siendo un primer paso en la definición de los criterios de calidad o metas a alcanzar. De igual forma, conforme a lo estipulado en el Artículo 24 del Decreto 1594 de 1984, se han realizado numerosos análisis de variables como: Demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), caudal (Q) y variables hidrobiológicas (Coliformes), las cuales son aquellas que como mínimo deben estudiarse para establecer los modelos de simulación de calidad de agua que permitan determinar la capacidad asimilativa de sustancias biodegradables y la capacidad de dilución de sustancias no biodegradables (Decreto 1594 - Artículo 23), así como la evaluación prospectiva de los proyectos de inversión

En este numeral, se consolidan los estudios realizados en la Cuenca del río Aburrá a través de Corantioquia, Cornare y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, entidades prestadoras del servicio de acueducto y alcantarillado, Universidades, entre otros, cuya información busca integrarse para realizar un diagnóstico que contemple, además de las condiciones específicas de cada uno de ellos, las variaciones que ha sufrido la calidad del agua de la Cuenca del río Aburrá.

2.6.1 Información disponible

Entre la información disponible se encuentra la de los censos de población descrita en el numeral 2.4 y que ha sido empleada en la estimación de aportes de aguas residuales en la Cuenca. Se cuenta, además, con la información histórica de mediciones de calidad de agua consolidada en diversos estudios adelantados en diferentes sectores de la Cuenca, y que permite inferir la evolución de la calidad del agua bajo las diversas estrategias de recuperación y control que se han adelantado hasta la fecha.

Por otro lado se presenta la información correspondiente a caracterización de vertimientos de aguas residuales en la Cuenca, abordados principalmente por el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) de EEPPM (2005), junto con la distribución de colectores, interceptores y demás obras instauradas en la Cuenca para la recuperación de la calidad de las fuentes hídricas de la misma.

■ **Censos poblacionales**

Como información de población se usó la reportada en la Tabla 2.8 que corresponde a los censos del DANE y al último censo poblacional realizado por el DANE (2005).

Además se muestra la separación demográfica por comunas y corregimientos en el municipio de Medellín, necesaria para estimar los aportes de aguas residuales colectadas actualmente por EEPPM mediante las redes de colectores e interceptores construidos en ambas márgenes del río Aburrá, tal como se describe a continuación.

Tabla 2.54. Población para las comunas y los corregimientos de Medellín año 2005

COMUNAS Y CORREGIMIENTOS	TOTAL (hab)	COMUNAS Y CORREGIMIENTOS	TOTAL (hab)
1 (Popular)	116,312	12 (La América)	95,839
2 (Santa Cruz)	89,943	13 (San Javier)	134,472
3 (Manrique)	147,270	14 (El Poblado)	94,704
4 (Aranjuez)	135,167	15 (Guayabal)	76,355
5 (Castilla)	140,418	16 (Belén)	159,390
6 (12 de Octubre)	192,656	Altavista	17,474
7 (Robledo)	159,935	Santa Elena	10,898
8 (Villa Hermosa)	104,450	Palmitas	7,663
9 (Buenos Aires)	124,996	San Antonio de Prado	59,119
10 (La Candelaria)	74,847	San Cristóbal	34,877
11 (Laureles–Estadio)	116,839		

Fuente: Alcaldía de Medellín, 2005.

■ **Estudios existentes**

Los estudios que por su escala de trabajo permiten ser definidos como aquellos más relevantes para realizar el diagnóstico del estado de la calidad del agua en la cuenca del río Aburrá son presentados a continuación. La información consolidada de dichos estudios permite evaluar la variabilidad espacial y temporal de la calidad de agua y definir los principales factores, naturales o antrópicos, que determinan el estado de las mismas, teniendo en cuenta que el tipo de información en cada estudio persigue objetivos que van desde seguimiento hasta definición de niveles de tratamiento.

En 1972, EEPPM, consciente de la proporción cada vez mayor que había tomado la contaminación de las corrientes en el Valle de Aburrá y ante la necesidad de adoptar normas para el uso del alcantarillado sanitario, para descargas domésticas e industriales a las corrientes de agua; y para determinar el grado de tratamiento de las aguas residuales, emprendió el estudio Estado de la Contaminación del río Medellín, llevado a cabo por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Este estudio realizó un diagnóstico de las condiciones de la contaminación del río, donde se cubrió una extensión de 94 km. Las estaciones elegidas y su ubicación a lo largo del río se presentan en la Tabla 2.55.

Tabla 2.55. Estaciones de muestreo del año 1972

ID	ESTACIONES	ABSCISA
E1	Primavera	Km 0
E2	Pte. Tablaza	Km 7.5
E3	Pte. Ancón de la Estrella	Km 12
E4	Pte. Envigado	Km 17
E5	Pte. Aguacatala	Km 20.5
E6	Pte. Guayaquil	Km 24
E7	Pte. San Juan	Km 25.5
E8	Pte. Agronomía	Km 27.2
E9	Pte. Calle 65	Km 27,7
E10	Pte. Acevedo	Km 33
E11	Pte. Machado	Km 37.5
E12	Pte Copacabana	Km 42.5
E13	Pte Hatillo	Km 60
E14	Pte Yarumito	Km 72
E15	Pe Pradera	Km 82
E16	Pte. La Clara (Porce)	Km 94

Fuente: Estado de la Contaminación del río Medellín, 1973.

Los parámetros escogidos para el estudio fueron: caudal, fitoplancton, zooplancton, temperatura, color, turbiedad, pH, alcalinidad, OD, DBO₅, DQO, sólidos, cloruros, nitrógenos, demanda de cloro, coliformes y tóxicos.

Con este estudio se obtuvieron datos sobre la variación de la calidad del río a lo largo de su recorrido, al igual que la determinación de la capacidad de autopurificación del mismo. También hicieron parte de los objetivos de este estudio, la ubicación de descargas, determinación de medidas para el control de la contaminación y la fijación de límites permisibles para las descargas industriales.

Nuevamente en el año 1981, EEPPM ejecutó en compañía de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín - el proyecto Calidad del Agua del río Medellín y sus Quebradas Afluentes como parte del plan de saneamiento adelantado por EEPPM. El proyecto consistió en tomar muestras del río Aburrá en 18 estaciones, tanto en período seco como período húmedo, y se muestrearon a la vez 22 quebradas afluentes. También fueron tomadas muestras en los interceptores de aguas negras. En la Tabla 2.56 se muestran las estaciones de medición definidas sobre el corredor del río Aburrá y las quebradas monitoreadas.

Tabla 2.56. Estaciones de muestreo del año 1981

ESTACIONES DE MEDICIÓN SOBRE EL RÍO ABURRÁ
Primavera
Puente Tablaza
Puente Ancón
Puente Envigado
Puente EAFIT
Puente Guayaquil
Puente San Juan
Puente Agronomía
Puente Calle 65
Estacion Tren (Caribe)
Puente Acevedo
Puente Machado
Puente Copacabana
Puente Girardota
Puente Hatillo
Puente Yarumito
Puente Pradera
Puente La Clara

QUEBRADAS MONITOREADAS	
La Salada	La Picacha
La Miel	La Hueso
La Valeria	La Iguaná
La Grande	Santa Elena
La Estrella	La Malpaso
La Doctora	El Bosque
Doña María	El Hato
La Ayurá	La García
La Altavista	Ovejas
Guayabala	Río Grande
	Santiago

Fuente: Calidad del Agua del río Medellín y sus Quebradas Afluentes, 1982.

El Instituto Mi Río (ya desaparecido) se fijó como meta en el año 1992 la recuperación de la Cuenca del río Aburrá e inició la tarea de investigar el estado fisicoquímico del río Aburrá, como también la calidad y cantidad de especies presentes en sus agua, por lo que realizó en el año 1997 el estudio titulado Aspecto Biológico y Fisicoquímico del Río Medellín, el cual contiene los resultados correspondientes a la evaluación del estado social, ecológico y ambiental del río Aburrá para el año de 1997.

En este estudio se correlacionaron los aspectos biológicos con los fisicoquímicos, lo que permitió elaborar por primera vez el mapa de calidad biológica para el río Aburrá, establecer el índice de calidad de agua, cuantificar la riqueza biológica, elaborar curvas de variables fisicoquímicas entre otros. En relación al componente biológico del río, se utilizó como metodología el estudio de macroinvertebrados como bioindicadores de la contaminación del río, los cuales estuvieron representados en su mayoría por insectos acuáticos, hirudíneos, caracoles, anélidos y nemátodos. Para el análisis estadístico de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos se aplicaron los índices de diversidad de Shannon & Weaver (1949), el índice de equidad de Pielou (1975), índice de dominancia de Simpson (1949), el índice de pérdida de taxones, y el índice BMWP' (Mi Río, 2001).

El análisis fisicoquímico de las condiciones del río tuvo en cuenta las variables: temperatura, turbiedad, pH, OD, conductividad, sólidos totales, DBO₅, nitrógeno total, nitratos, fósforo total, amonio y ortofosfatos.

Para la recolección de muestras se seleccionaron 10 de estaciones de muestreo presentadas en la Tabla 2.57.

Tabla 2.57. Estaciones de muestreo

ID	ESTACIONES	UBICACIÓN
E1	Alto de San Miguel	Km. 2, Municipio de Caldas
E2	Ancón Sur	Km. 22, Municipio de Sabaneta
E3	San Fernando	Km. 27, Municipio de Itagüí
E4	Universidad de Antioquia	Km. 36, Municipio de Medellín
E5	Puente de Acevedo	Km. 41, Municipio de Medellín
E6	Municipio de Copacabana	Km. 55, Sitio de Metromezclas
E7	Municipio de Girardota	Km. 58
E8	Hatillo	Km. 70, Municipio de Barbosa
E9	Popalito	Km. 83, Municipio de Barbosa
E10	Porce	Km. 100, Municipio de Santo Domingo

Fuente: Aspecto Biológico y Fisicoquímico del río Medellín, 1997.

De igual forma, en el año 2001 el Instituto Mi Río, en miras de seguir trabajando en la recuperación del río Aburrá, realizó la Segunda Evaluación Biológica y Fisicoquímica de este recurso hídrico, donde se hace un estudio del componente íctico del río, a fin de determinar algunas características del agua de acuerdo a las especies de peces encontradas.

En la evaluación biológica del río Aburrá fueron utilizados como indicadores de las condiciones ecológicas del río muestreos de macroinvertebrados, los cuales fueron de gran aplicación para medir el grado de contaminación. El procesamiento de la información biológica y la obtención de los resultados requirieron la aplicación de varios índices que permitieron conocer la importancia de los organismos, su grado de bioindicación y el estado del ecosistema, datos necesarios para elaborar el mapa de calidad biológica del río para este estudio.

Dentro del componente biológico, se calculó el índice de diversidad de Shannon & Weaver (1949), el índice de equidad de Pielou (1975), el índice de dominancia de Simpson (1949), el índice de pérdida de especies de Kothe (1962), el índice ETP y el índice BMWP' (Mi Río, 2001). En la evaluación fisicoquímica del río se calculó el índice de calidad ambiental (ICA), mediante parámetros ambientales como: pH, temperatura, OD, conductividad, DBO₅, DQO, sólidos totales, fósforo, sulfuros, turbiedad, nitrógeno, sulfatos. Este estudio tomó como referencia 10 estaciones de evaluación distribuidas a lo

largo de los 99 km de recorrido del río Aburrá, desde el Alto de San Miguel, hasta Porce. La localización de estas estaciones se presenta en la Tabla 2.57.

Por otro lado, se recopiló la información contenida en el estudio Diseño de la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua del río Aburrá - Fase I (Red Río - Fase I), que fue contratado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, mediante convenio con la Universidad de Antioquia, la Universidad Pontificia Bolivariana, la Universidad de Medellín y la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Para este diagnóstico se utilizaron los resultados del informe final de Diciembre de 2004. Además, se trabajó con la información de los parámetros fisicoquímicos obtenidos hasta el momento dentro del proyecto Red Río - Fase II (2006). Los muestreos fueron efectuados en las estaciones que aparecen referenciadas en la Tabla 2.58.

Con la información de los muestreos y los análisis fisicoquímicos y biológicos para el río Aburrá obtenidos de Red Río - Fase I (Área Metropolitana, 2005), se aplicaron los índices de calidad del agua $ICA_{RED\ RÍO}$ y $BMWP'$.

Tabla 2.58. Estaciones medición de aforo

ID	ESTACIÓN	NORTE	ESTE
E1	San Miguel	1,159,385.12	829,545.90
E2	Primavera	1,163,001.09	827,924.03
E3	Ancón Sur	1,172,315.00	827,933.44
E4	Doña María	1,175,497.03	832,441.95
E5	San Fernando	1,176,131.13	833,080.06
E6	Aguacatala	1,177,004.94	833,518.04
E7	Puente Guayaquil	1,181,360.13	834,196.17
E8	Aula Ambiental	1,184,760.98	834,615.08
E9	Acevedo	1,189,750.87	836,316.07
E10	La García	1,192,214.14	837,174.98
E11	Machado	1,192,592.00	838,411.02
E12	Metromezclas	1,196,497.15	843,793.02
E13	Girardota	1,197,484.95	847,934.01
E14	Parque de las Aguas	1,200,324.12	851,689.87
E15	Hatillo	1,201,017.98	854,412.08
E16	Papelsa	1,204,746.08	861,269.79
E17	Yarumito	1,208,163.04	867,050.79
E18	Pradera	1,212,823.99	869,862.06
E19	EADE	1,216,482.03	874,698.04
E20	Puente Gabino	1,217,245.16	875,060.03

Fuente: Red Río - Fase I, 2003.

Del año 2004, se tomaron los resultados consolidados en el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos de EEPPM (2005), presentado por dicha entidad como cumplimiento al Decreto 3100 de 2003 y la Resolución 1433 de 2004, y donde sólo se reportan como parámetros de control DBO₅ y OD en las estaciones presentadas en la Tabla 2.59. Estos son los dos parámetros objetos de seguimiento porque son los que más se afectan positivamente con los tratamientos secundarios definidos para las plantas de San Fernando y Norte (EEPPM, 2005).

Tabla 2.59. Estaciones sobre río Aburrá

ABSCISA (Km)	SITIO DE MUESTREO
0	La Salada
13.5	Ancón Sur
18.5	Metro Envigado
20.2	Metro Ayurá
23.3	Metro Poblado
25.7	Puente Guayaquil
28.1	Puente Colombia
29.4	Puente Barranquilla
34.7	Puente Acevedo
38.6	Puente Fontidueño - Machado
42.7	Puente Copacabana
57.1	Cantera Topco
63.2	El Hatillo
73.4	Puente Colkim
97.3	Puente Gabino

Fuente: PSMV, 2005.

Además de los resultados realizados sobre el cuerpo principal del río Aburrá, el PSMV reporta mediciones de variables de calidad de agua tomadas antes y después de la construcción de redes de colectores en las principales fuentes tributarias al río (en el período 2003 - 2005), como evidencias del efecto que este tipo de obras tiene sobre la recuperación de la calidad de las aguas superficiales de la cuenca.

2.6.2 Registros históricos

En el aparte anterior, se mencionaron los estudios de calidad de agua realizados hasta la fecha en la Cuenca del río Aburrá que por su escala de trabajo sirven en este estudio. En la Tabla 2.60 se condensan las estaciones de medición utilizadas a lo largo del río Aburrá en los diferentes estudios y se establecen los sitios base para este estudio de acuerdo con la disponibilidad de información. Además, se define la georeferenciación de las estaciones definitivas junto con su abscisado, de acuerdo con la red de drenaje

consolidada en Red Río fase I (2003). De esta manera se tienen un total de 16 estaciones de medición distribuidas que se usan para el análisis de la calidad en este estudio con su correspondiente código de identificación (Tabla 2.60).

En la Figura 2.39 se resaltan las subcuencas sobre las cuales se han realizado planes de muestreo como parte de proyectos encaminados al ordenamiento del recurso hídrico de cada una de ellas o proyectos de seguimiento y control como estrategias de recuperación de la calidad del agua de las fuentes superficiales de la Cuenca.

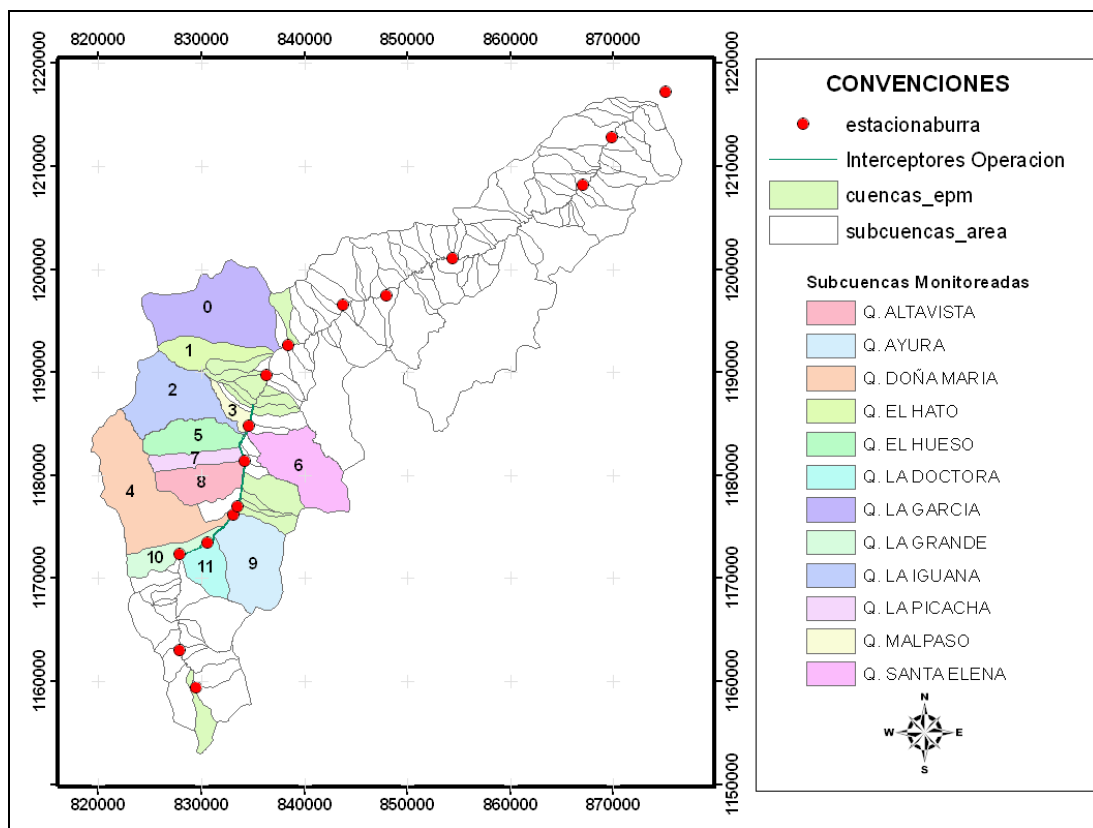


Figura 2.39. Estaciones de medición consolidadas a lo largo del río Aburrá y subcuencas monitoreadas en el período 1982 – 2005

Tabla 2.60. Consolidación de estaciones de muestreo definidas en diferentes estudios sobre el río Aburrá

EEPPM 1972	EEPPM 1981	Perfil Ambiental 1995	Mi Río 1997 - 2001	PSMV 2004	Red Río 2004 -2006	POMCA (Usadas -Análisis)	Este (m)	Norte (m)	Abscisa (Km)
		San Miguel	Alto de San Miguel		San Miguel	E1 San_Miguel	829,545.90	1,159,385.10	5.1
				La Salada					
Primavera	Primavera	Primavera			Primavera	E2 Primavera	827,924.00	1,163,001.10	10.1
Pte. Tablaza	Pte. Tablaza								
Pte. Ancón	Pte. Ancón	Ancón sur	Ancón Sur	Ancón Sur	Ancón Sur	E3 Ancon_Sur	827,933.40	1,172,315.00	21.8
Pte. Envigado	Pte. Evigado	Envigado (Sofasa)		Metro Envigado		E4 Envigado	830,569.20	1,173,407.30	25.0
					Doña María				
			San Fernando	Metro Ayurá	San Fernando	E5 San_Fernando	833,080.10	1,176,131.10	29.0
Pte. Aguacatala	Pte EAFIT	Aguacatala (FLA)			Aguacatala	E6 Aguacatala	833,518.00	1,177,004.90	30.1
				Metro Poblado					
Pte. Guayaquil	Pte Guyaquil			Puente Guayaquil	Puente Guayaquil	E7 Puente_Guayaquil	834,196.20	1,181,360.10	35.0
Pte. San Juan	Pte . San Juan								
				Puente Colombia					
Pte. Agronomía	Agronomía	Aula Ambiental (UdeA)	Universidad de Antioquia	Puente Barranquilla	Aula Ambiental	E8 Aula_Ambiental	834,615.10	1,184,761.00	39.0
Pte. Calle 65	Pte. Calle 65 Caribe								
Pte. Acevedo	Acevedo	Acevedo	Puente de Acevedo	Puente Acevedo	Acevedo	E9 Acevedo	836,316.10	1,189,750.90	45.2
					La García				
Pte. Machado	Machado			Puente Machado	Machado	E10 Machado	838,411.00	1,192,592.00	49.3
Pte Copacabana	Copacabana	Copacabana	Copacabana	Puente Copacabana	Metromezclas	E11 Copacabana	843,793.00	1,196,497.10	57.6
	Girardota	Girardota	Girardota		Girardota	E12 Girardota	847,934.00	1,197,485.00	62.9
					Parque de las Aguas				
				Cantera Topco					
Pte Hatillo	Hatillo	Hatillo	Hatillo	El Hatillo	Hatillo	E13 Hatillo	854,412.10	1,201,018.00	74.6
					Papelsa				
		Tamborcito (Barbosa)							
Pte Yarumito	Yarumito	Popalito	Popalito		Yarumito	E14 Yarumito	867,050.80	1,208,163.00	94.4
Pe Pradera	Pradera	Pradera			Pradera	E15 Pradera	869,862.10	1,212,824.00	101.3
					EADE				
				Puente Colkim					
Pte. La Clara	Puente La Clara	Porce	Porce	Puente Gabino	Puente Gabino	E16 Porce	875,060.00	1,217,245.20	110.3

Para cada una de las estaciones de muestreo definidas sobre el eje del río Aburrá se han recopilado registros de oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y demanda química de oxígeno (DQO) ya que son variables básicas en la definición de planes de muestreo, teniendo en cuenta además que las dos primeras hacen, y han hecho parte, del grupo de parámetros de control correspondiente al PSMV de EEPPM.

Junto con las tres variables mencionadas, el paquete de información se ha complementado con las variables especificadas en la Tabla 2.61, las cuales permiten la utilización de índices generales de calidad de agua, como se verá más adelante.

Tabla 2.61. Variables fisicoquímicas y biológicas

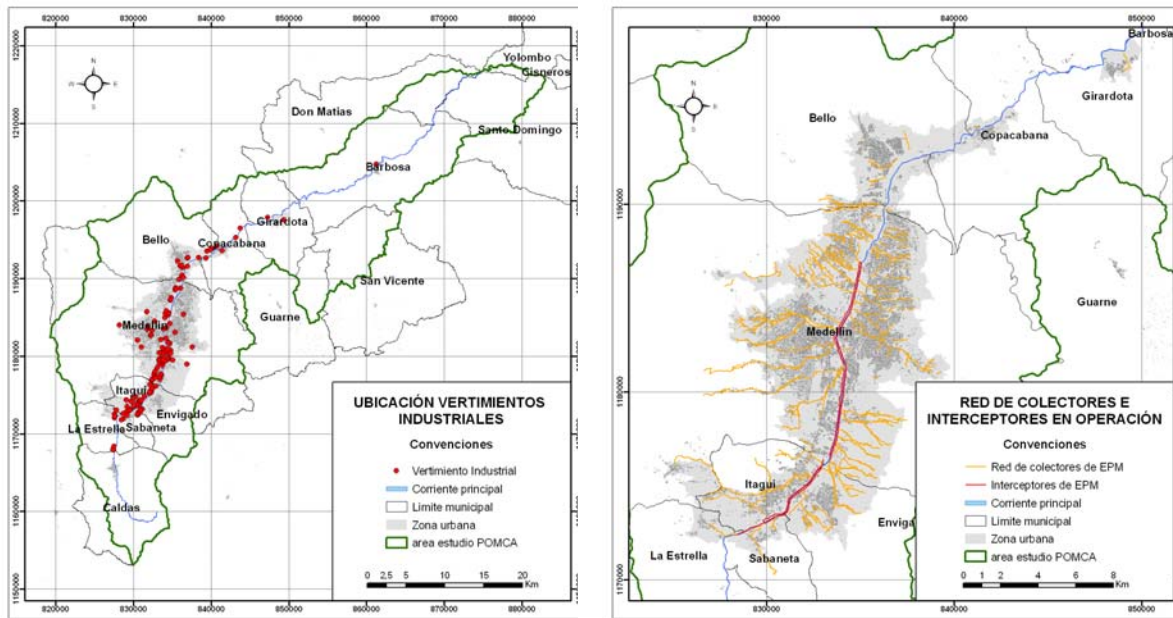
VARIABLES	UNIDADES
Demanda Química de Oxígeno	mg/l
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l
Nitrógeno Total	mg NTK/l
Nitritos	mg NO ₂ ⁻ /l
Nitratos	mg NO ₃ -N/l
Amonio	mg NH ₄ /l
Nitrógeno orgánico	mg NO/l
Fósforo Total	Mg P/l
Conductividad eléctrica	μS/cm
Sólidos Totales	mg/l
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l
Sólidos Totales Fijos	mg/l
Sólidos Totales Volátiles	mg/l
VARIABLES BIOLÓGICAS	
Macroinvertebrados acuáticos	Taxas - géneros identificados

Por su parte, para las subcuencas señaladas en la Figura 2.39 se han identificado como principales fuentes de información los trabajos realizados por EEPPM, primero en el año 1981, en donde fueron monitoreadas las subcuencas especificadas en la Tabla 2.56, y segundo en el año 2005 a través del PSMV. Cabe anotar que sólo las fuentes comunes a ambos estudios y sólo aquellas que tributan directamente al río Aburrá han sido tenidas en cuenta en la recopilación y posterior análisis de la información. Al igual que para las estaciones definidas sobre el río Aburrá, se recopilaron registros de OD, DBO₅ y DQO en cada una de dichas cuencas.

▪ **Vertimientos**

En la Figura 2.40a (mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: “1LB”, objeto: “AG_Vertimiento”) se muestra la distribución espacial de vertimientos domésticos e industriales más significativos de acuerdo con la clasificación realizada por EEPPM

(2005), cuyo efecto sobre las fuentes superficiales de la Cuenca se viene mitigando a través de obras de infraestructura adelantadas por dicha entidad desde el año 1967 en la cual se incluyen redes de colectores de aguas residuales en quebradas tributarias al río Aburrá, redes de interceptores paralelos a éste último y plantas de tratamiento ya construidas (Planta de tratamiento San Fernando) y proyectadas (Planta de tratamiento Norte). Así mismo Corantioquia, Cornare y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá con jurisdicción en la zona han implementado mecanismos financieros tales como tasas retributivas como acción complementaria a la inversión realizada por las entidades prestadoras del servicio de acueducto y alcantarillado.



(a) Distribución espacial de vertimientos (b) Distribución espacial de colectores e interceptores

Figura 2.40. (a) Distribución espacial de vertimientos domésticos e industriales. (b) Obras de infraestructura para recolección, transporte y disposición de aguas residuales

A continuación se presenta una descripción breve de cada uno de los colectores e interceptores que hacen parte del área de influencia del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, mostrados en la Figura 2.40b (mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: “1LB”, objeto: “AG_Colector_EPM y AG_Interceptor_EPM”), hasta octubre de 2006.

Caldas

cuenta con colectores diseñados pero aún no construidos paralelos a la margen izquierda del río Aburrá y de algunas quebradas afluentes como La Mandalay, La Rápida, La Corralita, La Valeria, El Pombal. Estos colectores funcionarían para toda el área urbana del municipio y algunos barrios del área rural como El Pinal, El Pevendero, La Corrala, La Corralita, Villa Capri, Bellavista, El Cano, entre otros. En las condiciones actuales, las aguas residuales del área urbana y rural son vertidas a las quebradas más cercanas que son afluentes directas del río Aburrá.

 La Estrella

se tienen proyectados varios colectores paralelos a la quebrada Grande en el área urbana y paralelos a las quebradas La Tablaza y Portugal, además de la continuación del colector principal paralelo al río Aburrá y que se uniría en los límites del municipio de la Estrella con Itagüí al colector que ya está construido y que desemboca en San Fernando. La única zona que posee colectores es la limítrofe con el municipio de Itagüí en el sector de Ferrería hasta Jardines Montesacro paralelo a la quebrada Aguas Negras.

 Sabaneta

En este municipio empieza el colector paralelo a la margen derecha del río Aburrá que desemboca en la planta San Fernando. Este colector baja inicialmente paralelo a la quebrada La Doctora y recoge la mayoría de las aguas residuales del municipio. El otro colector presente en el municipio construido es uno que descarga en el sector de Quintex al colector principal del río. Este colector se tiene presupuestado ampliarlo hacia aguas arriba de la quebrada La Escuela llegando al límite del área urbana.

 Itagüí

El sistema de colectores del municipio se recoge en un colector principal paralelo a la quebrada Doña María que vierte las aguas al interceptor principal de la margen izquierda del río Aburrá. Otro colector independiente de la quebrada Doña María es el que limita con el municipio de La Estrella y que desemboca sobre el interceptor principal paralelo a la calle 34. Se tiene planeado un colector paralelo a toda la avenida Pilsen para desembocar sobre el interceptor principal.

Envigado

El área urbana del municipio está prácticamente cubierta por los colectores que bajan paralelos a las principales quebradas de Envigado y que desembocan al interceptor Oriental paralelo al río Aburrá. En la parte alta de algunas quebradas se tienen los diseños de colectores que empalmarían con los actuales y entre ellos se tienen las quebradas La Mina, La Ayurá, La Sebastiana y La Honda. Por su parte la única quebrada que tiene hasta su parte alta colector actualmente construido es La Peña o La Heliadora. Todas las aguas residuales transportadas por los colectores del municipio están diseñados de tal forma que transporten los fluidos hacia la planta de tratamiento de San Fernando, incluso los colectores de las quebradas Zúñiga y Paulita que quedan en los límites entre Medellín y Envigado son desviados hacia los colectores de la quebrada La Ayurá.

 Medellín

Por el tamaño del municipio y por su densidad habitacional se divide en dos sectores.

Sector Oriental: esta zona comprende los barrios Orientales de la ciudad desde el sector de La Aguacatala hasta la comuna Nororiental (quebrada Seca o Cañada Negra). Desde La Aguacatala hasta la quebrada La Bermejala aledaña a los barrios Brasilia, Las Esmeraldas y Aranjuez, los colectores están construidos paralelos a las principales quebradas del sector y desembocan al interceptor Oriental del río Aburrá. Los colectores de los barrios faltantes (quebrada La Bermejala hasta la quebrada Seca) se encuentran diseñados al igual que los construidos, paralelos a las principales quebradas y además se tiene presupuestado que verterán sus aguas al interceptor Oriental. Este interceptor Oriental vierte sus aguas directamente al río Aburrá a la altura del barrio Acevedo.

Sector Occidental: esta zona está comprendida entre la quebrada La Llorona limítrofe con el municipio de Itagüí hasta la quebrada La Madera limítrofe con el municipio de Bello. En general todos los colectores de la zona están construidos paralelos a las principales quebradas que bañan los barrios del Occidente de la ciudad. Todos ellos descargan sus aguas en el interceptor Occidental paralelo al río Aburrá. Además se cuenta con colectores que van por las principales vías del sector como son los ubicados paralelamente a las calles 33, 30, 30A, 44, 50 y Avenida Bolivariana.

Se tiene presupuestado ampliar los colectores hacia su parte alta saliéndose del perímetro urbano de las quebradas La Gómez, La Moñonga, La Corcovada y La Cascada, pero principalmente se tiene en planes la construcción de dos colectores paralelos a las márgenes de la quebrada La Iguañá, que descargarían sus aguas en el interceptor

Occidental del río Aburrá. Este interceptor está construido hasta La Terminal de Transportes Norte de la ciudad donde descarga las aguas directamente sobre el río, lo que convierte el punto en estratégico para efectos de comparación de caudales. Este interceptor se tiene presupuestado continuarlo paralelo al río hasta la planta de tratamiento que estará ubicada en Bello.

Bello

El municipio en su parte Oriental no cuenta con colectores, mientras que en su parte Occidental solo tiene algunos pocos entre los que se encuentran los paralelos a las quebradas El Hato, La García y La Señorita. Debido a lo anterior, los aportes de caudal de aguas residuales no son considerables aún en cada una de las desembocaduras de las quebradas anteriormente mencionadas sobre el río por la dispersión en los puntos, posiblemente estos aportes de caudal de aguas residuales sean más importante en el sector de Niquía donde ya se unen todas las aguas residuales del municipio. El interceptor Occidental del río se encuentra en planes de construcción, el cual llegaría directamente a la planta de tratamiento de Bello.

Copacabana, Giradota y Barbosa

Estos tres municipios no tienen construidos ni diseñados colectores y/o interceptores. Todas sus aguas residuales son descargadas sobre las fuentes de agua corriente más cercanas, aunque el efecto de los vertimientos es insignificante debido a la dispersión de las descargas, además de generar una buena dilución de desechos orgánicos.

2.6.3 Metodología

■ Definición de puntos estratégicos

Con el fin de realizar una zonificación del área de estudio y facilitar así la evaluación de la magnitud de las descargas a lo largo del río, se tuvo en cuenta la distribución espacial de vertimientos en la región de estudio, la población que vierte sus aguas residuales, la ubicación y disposición de colectores e interceptores y las obras proyectadas para complementar los planes de saneamiento actuales. De esta manera se identificaron cinco puntos en los cuales confluyen descargas importantes al río. En la 0 se presentan las coordenadas de dichos puntos y en la Figura 2.41 (mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: "3FM", objeto: "Punto_estrategico_CA") la distribución espacial de los mismos.

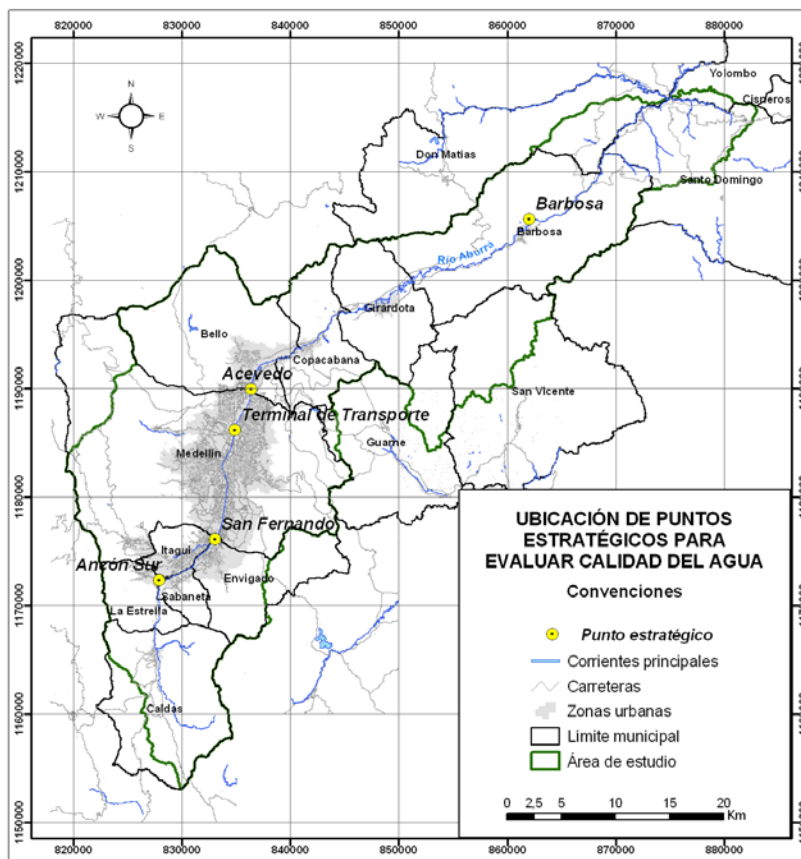


Figura 2.41. Localización espacial de puntos de estratégicos

Tabla 2.62. Localización espacial de puntos estratégicos

PUNTOS ESTRATÉGICOS	Este (m)	Norte (m)
Ancón Sur	828,677.2	1,172,459.3
Planta San Fernando	833,461.3	1,176,840.0
Terminal de Transportes	834,578.4	1,184,783.8
Acevedo	836,317.8	1,189,893.3
Barbosa	868,822.8	1,211,558.3

A continuación se describe cada uno de los puntos estratégicos de control de descarga de aguas residuales que se hacen sobre el río Aburrá.

□ Ancón sur

En este sector descargan sobre el río las poblaciones del municipio de Caldas y parte del municipio de La Estrella.

Planta San Fernando

Esta planta está localizada en el municipio de Itagüí en los límites con Medellín. Recibe las aguas residuales domésticas, industriales y comerciales de Itagüí, Envigado, Sabaneta, La Estrella y parte del corregimiento de San Antonio de Prado. Estas aguas llegan a través de las redes de alcantarillado, que descargan a los colectores paralelos a las quebradas, los cuales a su vez están conectados a los interceptores localizados en cada costado del río y finalmente son recogidas en esta planta.

 Terminal de Transportes

Sobre este sector descarga el interceptor Occidental paralelo al río, que se alimenta por las comunas de la zona Occidental de Medellín y los corregimientos de Altavista y San Cristóbal, excepto las comunas 5 y 6, las cuales descargan a quebradas aledañas adelante del punto estratégico y el corregimiento de Palmitas, el cual descarga sobre corrientes del municipio de Ebéjico las cuales no pertenecen a la cuenca del río Aburrá.

 Acevedo

En este punto descarga el interceptor Oriental que está alimentado por las comunas Orientales y el corregimiento de Santa Elena, todas pertenecientes al municipio de Medellín. Las comunas 1 y 2 (sector Oriental), y la 5 y 6 (sector Occidental) no descargan directamente al interceptor por no tener colectores aún construidos pero lo hacen sobre las quebradas cercanas que desembocan antes de Acevedo y después de La Terminal de Transportes del Norte.

 Barbosa

En este punto ya han descargado los municipios de Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa de forma indirecta.

2.6.4 Estimación de caudales de aguas residuales

En primer lugar se determinaron los caudales medios diarios distribuidos (consumos) en la Cuenca. Estos caudales fueron calculados para la población urbana total aferente a la zona del río Aburrá (sin tener en cuenta la descarga o no a colectores) y para la población que está conectada a la red de colectores en cada punto estratégico de descarga. En la Tabla 2.63 se presentan estas poblaciones, teniendo en cuenta que la población para el municipio de Medellín es la suma de la población de cada una de las comunas y corregimientos.

Tabla 2.63. Población urbana estimada para el 2005 que descarga al río Aburrá

PUNTO DE DESCARGA	TIPO DE DESCARGA	POBLACIÓN URBANA TOTAL (hab)	POBLACIÓN CONECTADA A LA RED DE COLECTORES (hab)
Ancón Sur	Directa al río	120,920	108,828
Planta San Fernando	Planta tratamiento	511,098	459,988
Terminal de Tte.	Colectores al río	795,181	789,945
Acevedo	Colectores al río	692,332	691,242
Barbosa	Directa al río	519,799	467,819
TOTAL		2,639,330	2,517,822

En la Tabla 2.64 se presentan los consumos de agua potable para la población (total y la correspondiente a la conectada a la red de colectores) de la cuenca, cuyo valor para la población total se estimó alrededor de 9.48 m³/s, usando la dotación bruta tal y como lo indica el RAS 2000, razón por la cual la estimación es mayor a la de la demanda de agua potable en la cuenca.

Tabla 2.64. Consumos estimados de agua potable en la zona urbana de la Cuenca

PUNTO DE DESCARGA	CAUDAL MEDIO DIARIO DE AGUAS RESIDUALES (m ³ /s)		
	CONSUMO POBLACIÓN TOTAL	CONSUMO POBLACIÓN CONECTADA A RED DE COLECTORES	ACUMULADO (m ³ /s)
Ancón Sur	0.43	0.39	0.43
Planta San Fernando	1.84	1.65	2.27
Terminal de Tte.	2.86	2.84	5.13
Acevedo	2.49	2.48	7.61
Barbosa	1.87	1.68	9.48
TOTAL	9.48	9.04	

En el cálculo del caudal medio diario aportado al alcantarillado proveniente del consumo de agua doméstico, se usó la siguiente expresión (RAS, 2000):

$$Q_{md} = \frac{Pd_{bruta}C}{86,400}$$

Donde: Q_{md} es el caudal medio diario de aguas residuales (l/s), P es la población (hab), d_{bruta} es la dotación bruta asignada (l/hab/día) y C es un coeficiente de retorno.

La dotación bruta obtenida para este estudio fue de 326.98 l/hab/día, estimada a partir de la expresión:

$$d_{bruta} = \frac{d_{neta}}{1 - \frac{Perdidas(\%)}{100}}$$

Donde se tomó un valor de dotación neta, d_{neta} , de 211 l/hab.día de acuerdo con lo presentado en el 2.4 y *Pérdidas (%)* correspondientes a las pérdidas técnicas igual al 35.47%.

El coeficiente de retorno, es la fracción de agua de uso doméstico servida (dotación neta) que se entrega como agua residual, en éste caso el valor usado fue 0,85, debido a que es el valor más alto que se puede considerar (RAS, 2000), así, se entiende que un 15% del caudal aportado queda almacenado en el suelo o se pierde en evapotranspiración y no retorna al río.

Del mismo modo que los consumos, los caudales de aguas residuales fueron calculados para la población urbana total y para la población que está conectada a la red de colectores en cada uno de los puntos estratégicos de descarga, haciendo además las siguientes consideraciones (Área Metropolitana et al., 2005):

- Las estaciones que se encuentran aguas arriba del municipio de Caldas son casi rurales, es decir, no hay aporte importante de aguas servidas de cuencas vecinas.
- El municipio de Caldas efectúa descargas directas al río, este caudal puede ser considerado a partir de la estación de medición Ancón Sur.
- Los municipios de Itagüí, Envigado, Sabaneta, La Estrella y el Sur de Medellín descargan puntualmente a la altura de la planta de tratamiento de San Fernando.
- Dos descargas puntuales se efectúa al interior del municipio de Medellín, la primera de ellas a la altura de la terminal de transportes del norte, en el barrio Caribe, y la segunda a la altura del puente Acevedo.
- Los municipios del norte del Valle de Aburrá, como son Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa, efectúan descargas distribuidas espacialmente.
- Ancón Sur: para calcular el aporte doméstico se consideró que no toda el área de los municipios queda sobre la Cuenca del río Aburrá. Por lo tanto, la mayor parte de la población se concentra en el área urbana, en este caso el 90% de la población aporta aguas residuales a la Cuenca.

- Planta San Fernando: se consideró que el 90% de la población está concentrada sobre los límites físicos de la Cuenca.
- Terminal de Transportes: en este punto se consideró que el 100% de la población de las comunas de Medellín aportan aguas residuales a la Cuenca, mientras que para los corregimientos de San Cristóbal y Altavista se trabajó con el 90%.
- Acevedo: se consideró que Santa Elena descarga en un 90% sobre la Cuenca del río Aburrá, mientras que todas las comunas de esta zona descargan en 100%.
- Barbosa: en este punto también se considerará que el 90% de la población aporta aguas residuales al río.

Los caudales medios diarios estimados para las aguas residuales de la población urbana en la Cuenca se presentan en la Tabla 2.65, donde el primer campo corresponde al total de la población y el segundo corresponde a la población modificada de acuerdo con las consideraciones antes mencionadas.

Tabla 2.65. Caudales medios diarios: aguas residuales domésticas para la población urbana

PUNTO DE DESCARGA	CAUDAL MEDIO DIARIO DE AGUAS RESIDUALES (m ³ /s)		
	DESCARGA POBLACIÓN URBANA TOTAL	DESCARGA POBLACIÓN CONECTADA A RED DE COLECTORES	ACUMULADO EN EL PUNTO
Ancón Sur	0.37	0.33	0.37
Planta San Fernando	1.56	1.40	1.93
Terminal de Tte.	2.43	2.41	4.36
Acevedo	2.11	2.11	6.47
Barbosa	1.59	1.43	8.06
TOTAL	8.06	7.7	

2.6.5 Estimación de caudales de aguas residuales industriales

El cálculo de las aguas residuales industriales se realizó mediante la agregación espacial de cada uno de los puntos de vertimientos industriales alrededor de los puntos estratégicos definidos anteriormente y ubicados dentro de la Cuenca del río Aburrá.

La Tabla 2.66 presenta los resultados totales de los caudales debidos a vertimientos industriales en cada uno de los puntos de control. Se encontró que los mayores aportes de caudal están asociados a la Planta San Fernando.

Tabla 2.66. Caudales de vertimientos industriales

PUNTO DE DESCARGA	CAUDAL (l/s)
Ancón Sur	13.26
Planta San Fernando	1,477.75
Terminal de Transportes	327.07
Acevedo	209.19
Barbosa	251.14
TOTAL	2,278.41

Los resultados de los caudales de aguas residuales totales (domésticos más industriales) en cada uno de los puntos estratégicos definidos se presentan en la Tabla 2.67.

Tabla 2.67. Caudales de aguas residuales totales

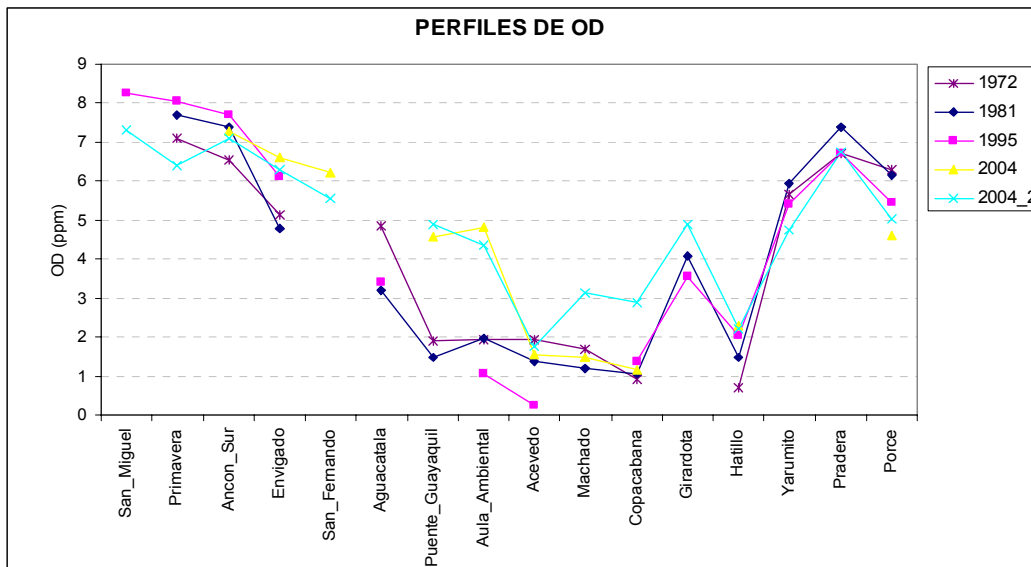
PUNTO DE DESCARGA	CAUDALES DOMÉSTICOS (l/s)	CAUDALES INDUSTRIALES (l/s)	TOTAL (l/s)
Ancón sur	370	13.26	383.26
Planta San Fernando	1,560	1,477.75	3,037.75
Terminal de Transportes	2,430	327.07	2,757.07
Acevedo	2,110	209.19	2,319.19
Barbosa	1,590	251.14	1,841.14
TOTAL	8,060	2278.41	10,338.41

■ **Análisis individual de variables de calidad de agua**

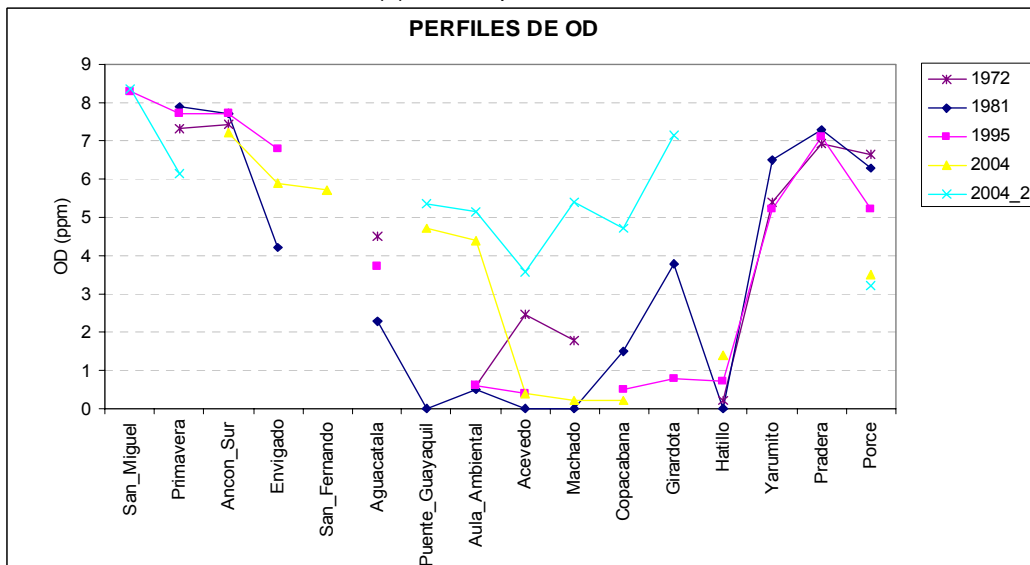
La primera estrategia de análisis empleada corresponde a la identificación de los cambios en la magnitud de las variables OD, DBO₅ y DQO como parte del grupo de variables más relevantes en los estudios recopilados. En primer lugar se muestra la evolución de los perfiles promedio de cada una de dichas variables a lo largo del río Aburrá para los años 1972, 1981, 1995 y 2004; y en segundo lugar se describen los cambios correspondientes en las subcuencas seleccionadas, entre los años 1981 y 2005.

□ **Corredor del río Aburrá**

En la Figura 2.42 a Figura 2.44 se muestran los valores medios de OD, DBO₅ y DQO en las estaciones de monitoreo definidas en la Tabla 2.60. Cabe anotar que no en todos los estudios recopilados, se tenía información de la totalidad de estaciones. Por otro lado, no sólo se presentan los perfiles promedios ya que estos valores pueden verse sesgados por eventos extremos de caudal que se presentaron durante algunos de los muestreos realizados, además de los errores en la recolección de datos, entre otros. Con el fin de corroborar el comportamiento medio se presentan los perfiles correspondientes al período Julio - Agosto para cada uno de los estudios recopilados.



(a) Perfiles promedio de OD



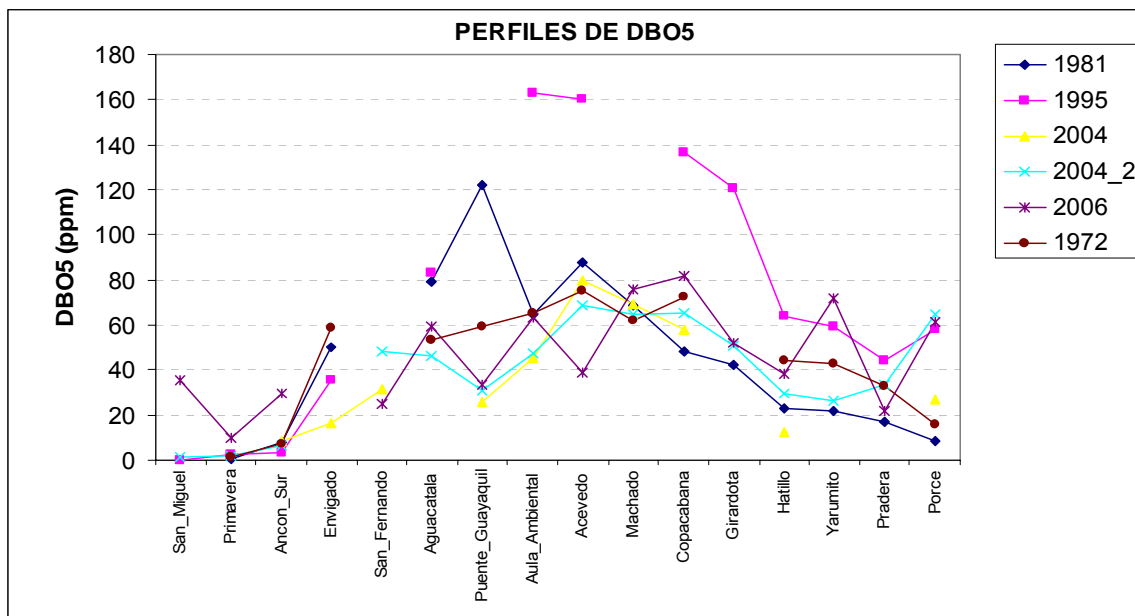
(b) Perfiles de OD para el período Julio – Agosto, para diferentes años

Figura 2.42. Cambios en los perfiles promedio de OD a lo largo del río Aburrá

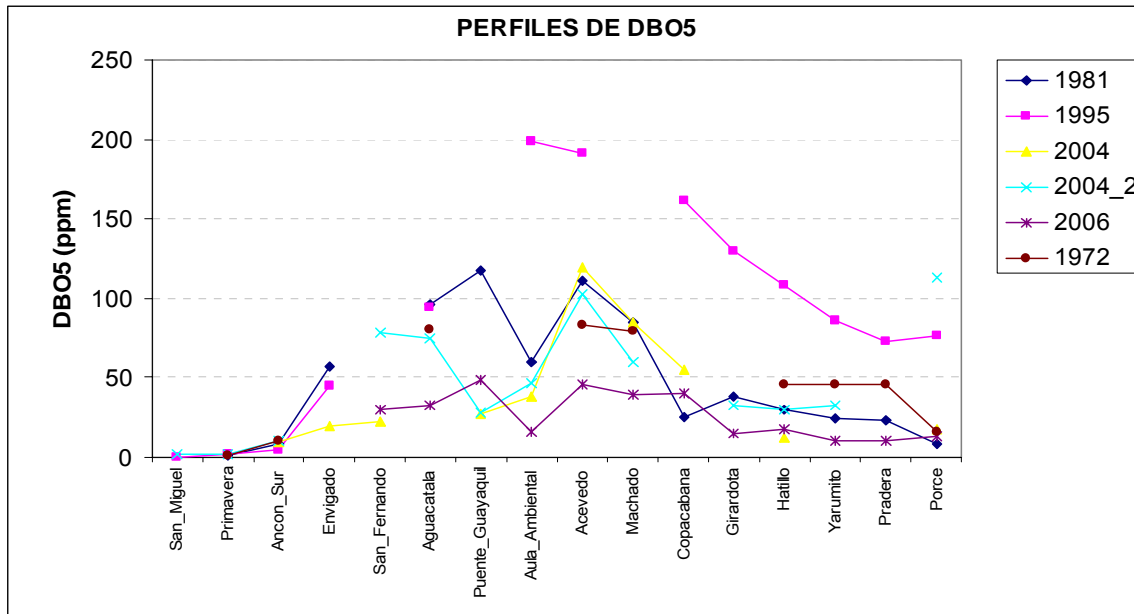
Los perfiles de oxígeno disuelto muestran diferencias significativas entre un primer grupo de valores correspondiente a los años 1972 – 1981 – 1995 y un segundo grupo correspondiente a las mediciones del año 2004. Tanto los valores promedio (Figura 2.42a) como los valores del mes de Agosto (Figura 2.42b) muestran un claro aumento del OD entre las estaciones San Fernando y Acevedo, para el segundo grupo. Aguas abajo de la estación Acevedo, se observa, en general, una disminución en las concentraciones de oxígeno excepto para la serie de datos 2004_2 lo cual puede deberse a tormentas, autodepuración del río dada la configuración del canal del río u operación de la central Tasajera. Aguas abajo de la estación Hatillo los perfiles de oxígeno no exhiben

diferencias importantes y reflejan la capacidad de auto depuración del río en dicho sector, teniendo en cuenta además de que no recibe aportes adicionales y significativos de aguas residuales.

Por su parte, la DBO₅ y la DQO muestran para el tramo San Fernando - Acevedo una ligera disminución entre los años 1972 y 2006 en los perfiles promedios presentados en las Figura 2.43a y Figura 2.44a. Sin embargo, los escenarios de muestreo del mes de Agosto (Figura 2.43b y Figura 2.44b) sí resaltan la disminución de dichas variables, donde se elevan las concentraciones debido a los vertimientos allí descargados. Vale la pena mencionar que en el año 1972 los perfiles de DBO₅ y DQO son comparables en tendencia y en orden de magnitud con los registrados en los años 2004 y 2006, lo cual puede asociarse con el bajo desarrollo demográfico e industrial de la época y por ende la baja productividad de aguas residuales.



(a) Perfiles promedio de DBO5

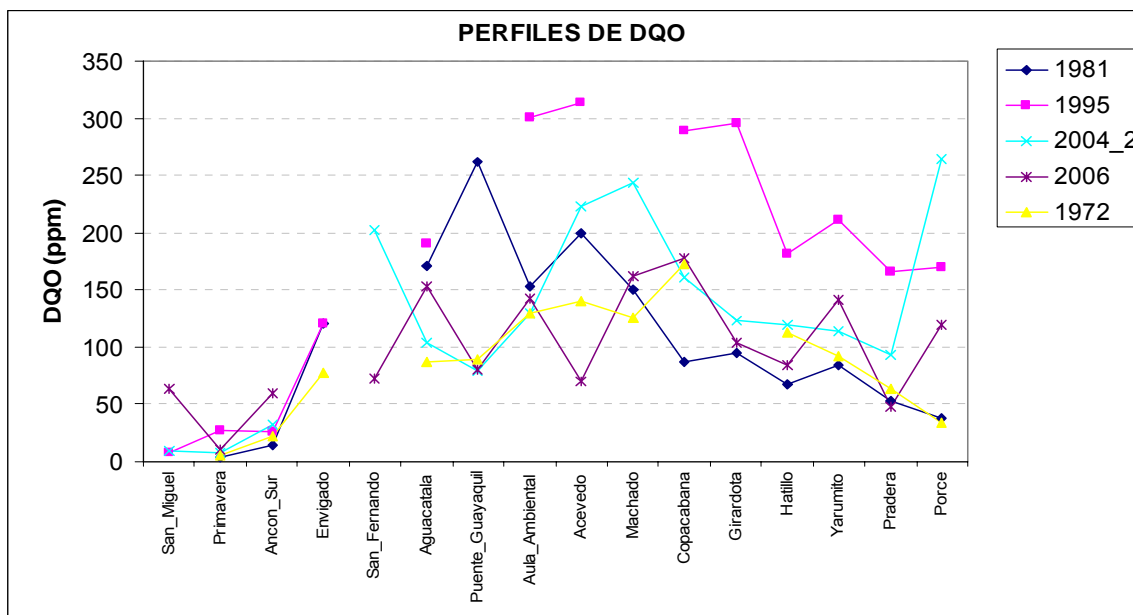


(b) Perfiles de DBO₅ para el período Julio – Agosto, para diferentes años

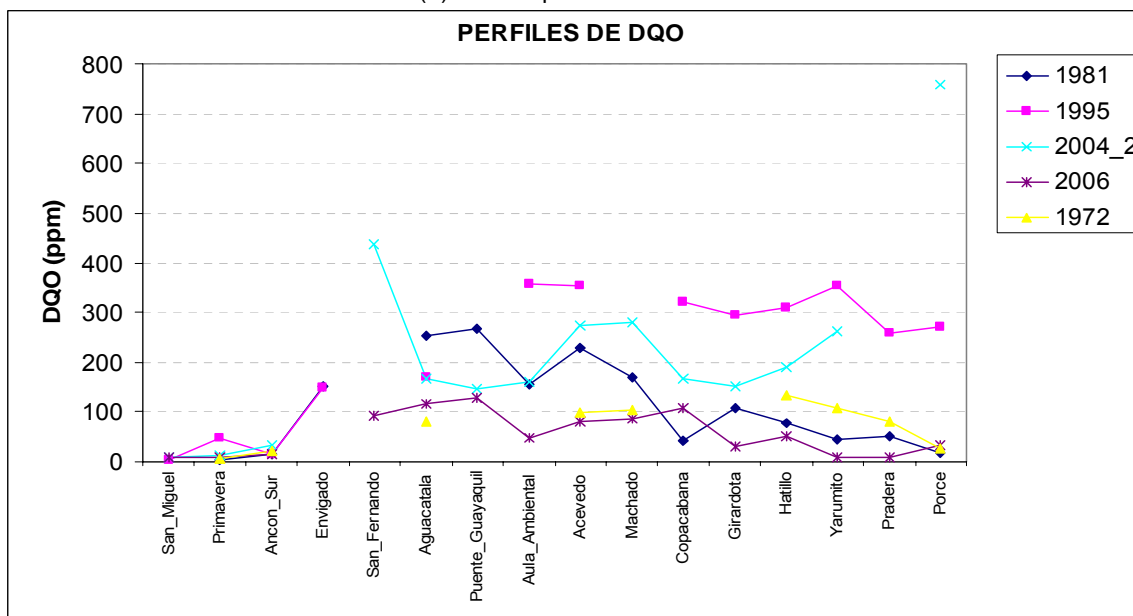
Figura 2.43. Cambios en los perfiles promedio de DBO₅ a lo largo del río Aburrá

☐ Quebradas afluentes

Los niveles de contaminación encontrados sobre el cauce principal del río Aburrá son una respuesta de los procesos físicos y antrópicos que se desarrollan en cada una de las subcuencas que contiene. Lo anterior hace del monitoreo del río Aburrá una estrategia indirecta para evaluar la dinámica de la contaminación de las subcuencas del valle del Aburrá. No obstante se analizaron las subcuencas monitoreadas por EEPMP sobre las cuales, de acuerdo con la información consolidada en los estudios base, puede evaluarse el cambio en la calidad de sus aguas empleando para ello monitoreos realizados en los años 1981 y 2005.



(a) Perfiles promedio de DQO



(b) Perfiles de DQO para el periodo Julio – Agosto, para diferentes años

Figura 2.44. Cambios en los perfiles promedio de DQO a lo largo del río Aburrá

En términos de los valores medios de DBO_5 y DQO, las quebradas La Doctora, Doña María, La Altavista, La Picacha, La Malpaso y el Hato reflejan cambios significativos en la calidad del agua de sus fuentes, teniendo en cuenta además que los valores medios estimados poseen menor error (ver Figura 2.46 y Figura 2.47) que los correspondientes a los valores medios de oxígeno disuelto (Figura 2.45). Sin embargo, se observa concordancia entre la disminución de niveles de materia orgánica y el aumento de OD.

Por otro lado, quebradas como La Iguaná, La García, La Grande, La Hueso y Santa Elena reflejan aún el efecto de aguas residuales no recolectadas en los sistemas de colectores. Como puede observarse en la Figura 2.45 las concentraciones promedio de oxígeno disuelto no explican adecuadamente los cambios de la calidad del agua ya que en algunos caso han aumentado (Santa Elena y La Hueso), a pesar de que el total de materia orgánica (expresado como DBO+DQO) claramente aumenta en el período de análisis. Los sólidos suspendidos guardan coherencia con los cambios observados en las demás variables, aunque es importante tener en cuenta que los procesos que inducen cambios en las concentraciones de esta variables incluyen escenarios de lluvias no controlables e incluso eventos antrópicos como explotación de material aluvial como el que se realiza en la quebrada la Hueso, lo cual explica en parte la alta variabilidad (barras de error) que se observa en la Figura 2.48 para dicha cuenca.

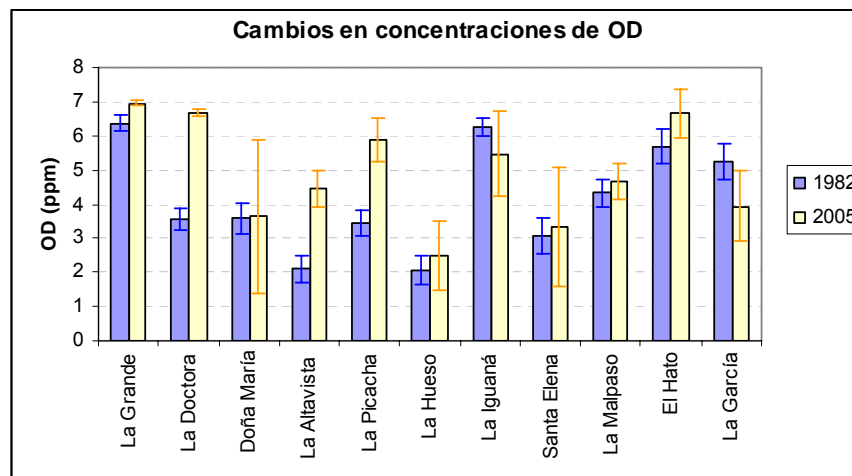


Figura 2.45. Concentraciones promedio de oxígeno disuelto evaluadas en los años 1982 y 2005

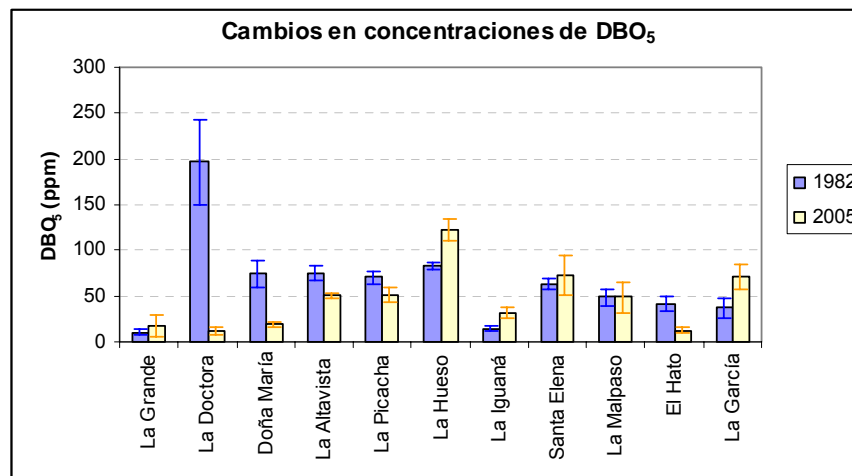


Figura 2.46. Concentraciones promedio de demanda bioquímica de oxígeno evaluadas en los años 1982 y 2005

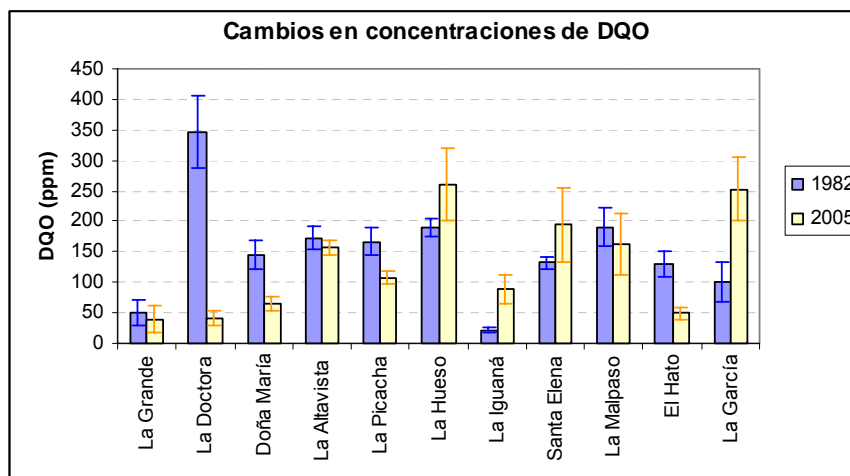


Figura 2.47. Concentraciones promedio de demanda química de oxígeno evaluadas en los años 1982 y 2005

En la Figura 2.39 se resalta el tramo San Fernando – Acevedo sobre el río Aburrá y las subcuencas analizadas en este numeral. Allí es fácil ver que los cambios favorables en las variables OD, DBO₅ y DQO de dicho tramo se asocian directamente con la mitigación de los niveles de contaminación de las subcuencas que sobre éste confluyen.

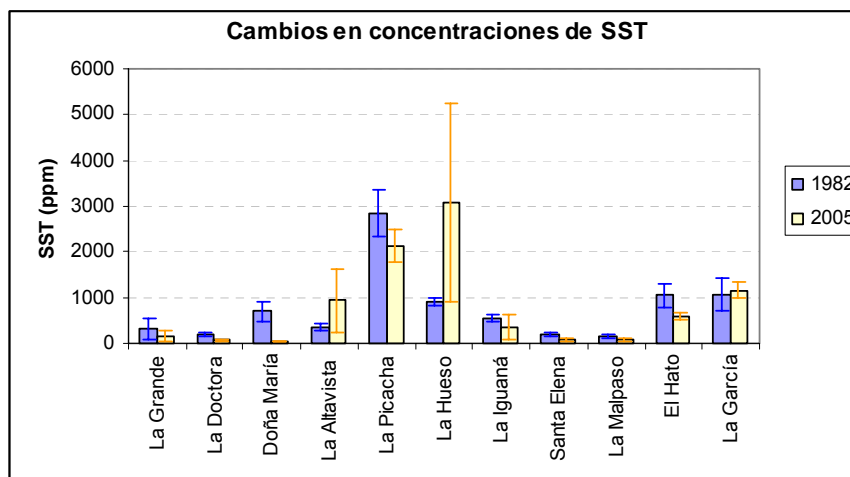


Figura 2.48. Concentraciones promedio de Sólidos suspendidos de oxígeno evaluadas en los años 1982 y 2005

■ **Análisis general de la calidad del agua**

Una segunda vía para cuantificar el estado actual de la calidad de las fuentes superficiales es mediante la implementación de índices de calidad (ICA) o índices de contaminación (ICO) que permiten evaluar el nivel de degradación de la fuente con un único valor que agrupa diferentes parámetros (Área Metropolitana et al., 2006). Éstos

difieren en términos de las variables consideradas, de la importancia sanitaria asignada a cada una de ellas de acuerdo al uso específico a que se destine el agua, de los objetivos de su aplicación y de la técnica de agregación. Los índices evaluados en éste estudio con el fin de conocer el estado general de la contaminación del río Aburrá fueron el índice fisicoquímico $ICA_{RED\ RÍO}$ (fase I) y el índice biológico BMWP’.

□ Índices fisicoquímicos

Un Índice de Calidad del Agua (ICA) indica el grado de contaminación del agua y está expresado como porcentaje del agua pura; así, agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a cero por ciento, en tanto que en el agua en excelentes condiciones el valor del índice será cercano a 100%.

En su desarrollo inicial, el ICA tuvo dos etapas: la primera consistió en crear una escala de calificación de acuerdo con los diferentes usos del agua. La segunda involucró el desarrollo de una escala de calificación para cada parámetro de tal forma que se estableciera una correlación entre los diferentes parámetros y su influencia en el grado de contaminación. Se han formulado modelos matemáticos para cada parámetro, los cuales convierten los datos físicos en correspondientes índices de calidad por parámetro (I_i). Debido a que ciertos parámetros son más significativos que otros en su influencia en la calidad del agua, se introducen pesos o factores de ponderación (W_i) según su orden de importancia respectivo. Finalmente, los índices por parámetro son promediados a fin de obtener el ICA de la muestra de agua (Comisión Nacional del Agua, 1999). En general el índice ICA se calcula mediante la siguiente expresión:

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i},$$

Donde, i identifica cada uno de los parámetros involucrados

Con el fin de evaluar la calidad del río Aburrá, se agruparon los parámetros de acuerdo con su naturaleza en cuatro factores:

- DQO y DBO_5
- Nitrógenos y fósforos
- Conductividad eléctrica

- Sólidos

Se seleccionaron factores de ponderación, de modo que el mayor factor de ponderación fue asignado a la variable de mayor influencia en todo el trayecto analizado del río. La suma de los factores de ponderación fue diez (10), siendo ésta, la máxima calificación del índice, e indicando la mejor calidad de agua en el cauce.

Finalmente el ICA en la cuenca corresponde a la sumatoria de los productos parciales de los valores de cada grupo de variables entre sí por su respectivo factor de ponderación. La ecuación utilizada fue:

$$ICA = A \times (DQO \times DBO_5) + B \times (\text{Nitrogénos} \times \text{Fosfóros}) + C \times (CE) + D \times (\text{Sólidos})$$

Los factores de ponderación fueron representados por las letras A, B, C y D, con valores de 3.4, 2.4, 2.4, 1.8 respectivamente.

A partir del cálculo del índice de calidad se establecieron cinco categorías para evaluar la calidad del agua (Tabla 2.68), donde la calidad excelente corresponde a una criticidad muy baja y la calidad muy mala responde a una criticidad muy alta, es decir, agua muy contaminada (Área Metropolitana et al., 2005)

Tabla 2.68. Categorías para el índice ICA en el río Aburrá. Fuente: Red Río Fase I

DENOMINACIÓN	ICA RED RIO	COLOR
Calidad excelente	8 - 10	Verde
Calidad buena	6 - 8	Verde vivo
Calidad media	4 - 6	Amarillo
Calidad mala	2 - 4	Naranja
Calidad muy mala	0 - 2	Rojo

Para la aplicación del índice de calidad ICA_{RED RÍO} se empleó la información correspondiente a los estudios de los años 1972, 1997, 2003 y 2006 ya que éstos permiten emplear las mismas variables en el mayor número de estaciones posible a lo largo del río Aburrá para evaluar la dinámica espacial y temporal de la calidad general. De acuerdo con la información disponible se emplearon las variables DBO₅ y DQO en el grupo de materia orgánica, Nitrógeno total en el grupo de nutrientes, conductividad eléctrica -CE- y sólidos suspendidos totales (SST). En la Tabla 2.69 se presentan los muestreos seleccionados de cada uno de los estudios y el total de estaciones de medición con la información necesaria para la agregación del índice ICA_{RED RÍO}.

Tabla 2.69. Información empleada en la agregación del índice ICA_{RED RÍO}

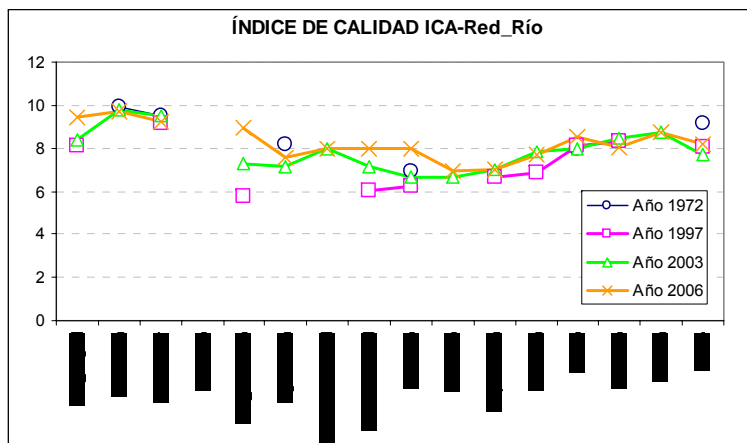
ESTUDIO	No. ESTACIONES	FECHA DE MUESTREOS
1972	6	Julio 31 Agosto 10 Agosto 30 Septiembre 03 Septiembre 06 Septiembre 14 Septiembre 20 Septiembre 30
1997	10	Julio 31
2003	14	Julio 14 Julio 27 Agosto 18 Agosto 29 Septiembre 08
2006	15	Mayo 30 Junio 27 Julio 17

En la Figura 2.49a se presenta el cambio del índice ICA_{RED RÍO} en el tiempo a lo largo de las diferentes estaciones consideradas en este estudio, y en las Figura 2.49b, c y d los aportes de los grupos DBOxDQO, NT y SST, respectivamente.

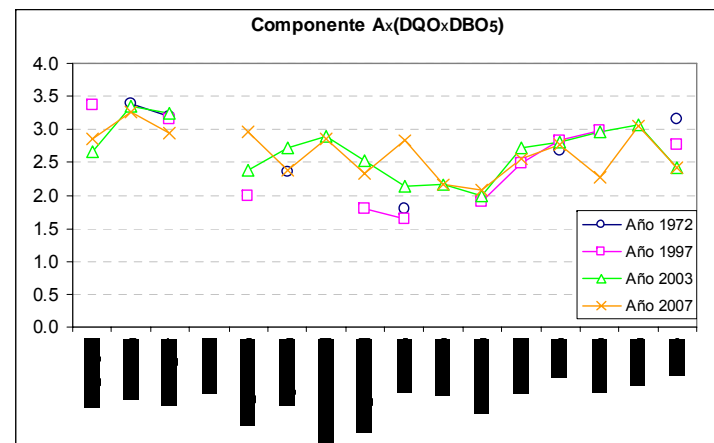
En la Figura 2.49 se puede observar que la calidad general del río Aburrá ha sufrido las mayores variaciones entre las estaciones E5 (San Fernando) y E9 (Acevedo), ya que es éste el sector donde se ha concentrado, hasta la fecha, el mayor número de obras de inversión de saneamiento. Las tendencias allí observadas son consistentes con los análisis realizados a partir de las observaciones individuales de OD, DBO₅ y DQO, y con la distribución de colectores e interceptores construidos en la Cuenca.

Cabe anotar, además, que la variabilidad del índice ICA_{RED RÍO} esta correlacionada con la variación que sufren la componente $A(DQO \times DBO)$ que corresponde a las cargas de materia orgánica controladas principalmente en los planes de inversión de saneamiento; por su parte, la variación de las restantes componentes es menos significativa en el período 1972 – 2006, ya que el tipo de procesos que representan variables como NT y SST pueden estar más controlados por eventos hidrológicos y cargas no puntuales de contaminación, que, en promedio, son menos variables que los efectos antrópicos que tienen lugar en la Cuenca.

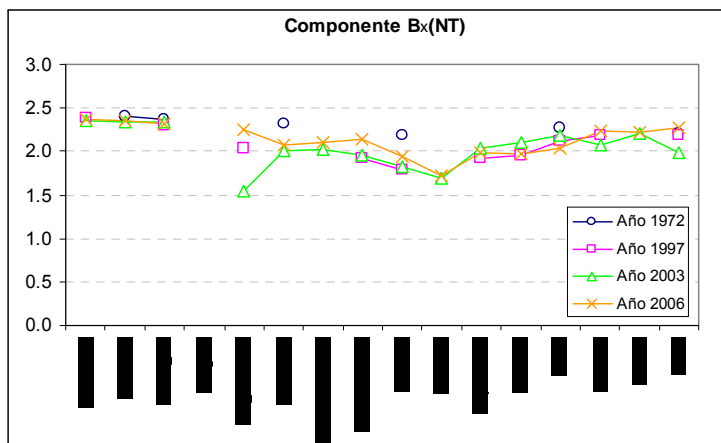
En la Figura 2.50 (mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: “2DG”, objeto: “AG_Calidad_ICA_1972”, “AG_Calidad_ICA_1997”, “AG_Calidad_ICA_2003”, “AG_Calidad_ICA_2006”) se muestra la variación espacial del índice ICA_{RED RÍO} para los años analizados, dispuestos en la GeoDataBase.



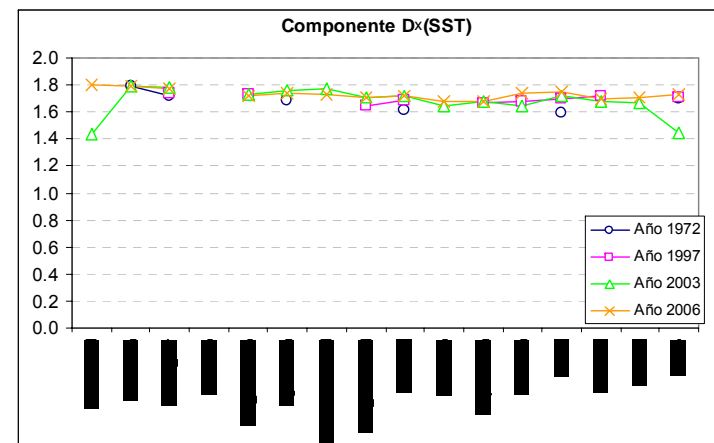
(a) Índice ICA_{RED RÍO}



(b) Aporte al índice ICA_{RED RÍO} por DBO₅ y DQO

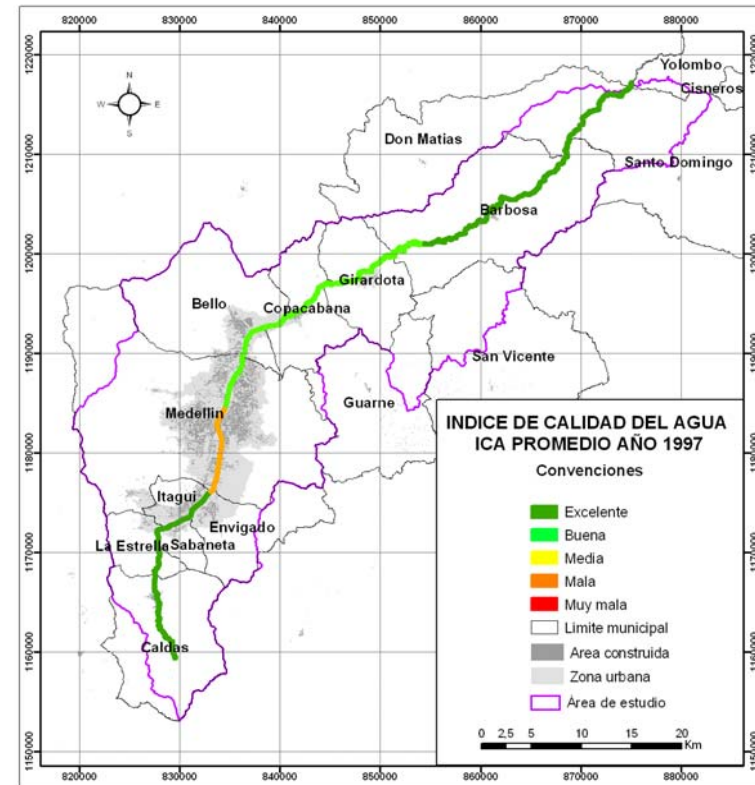
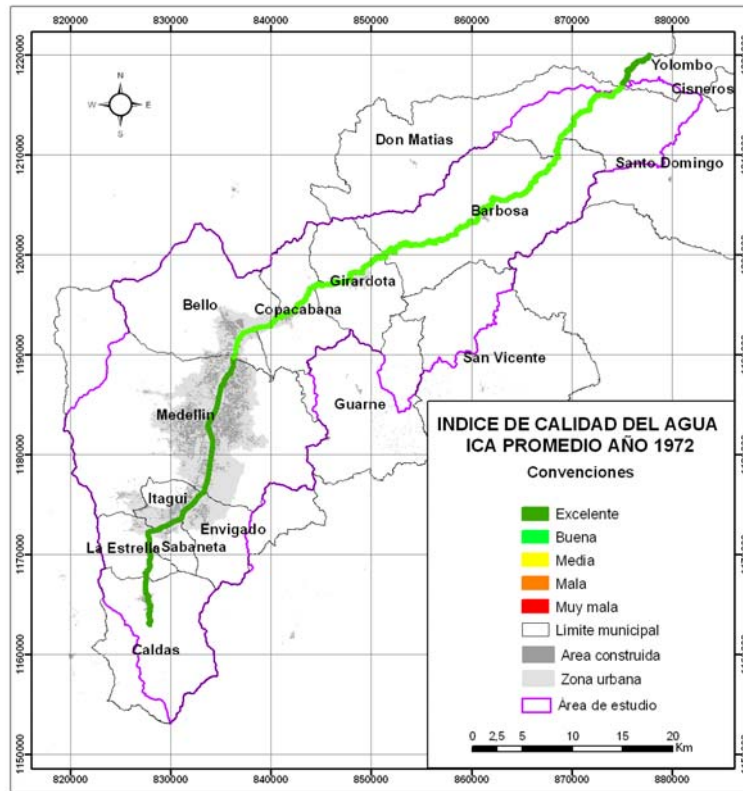


(c) Aporte al índice ICA_{RED RÍO} por nitrógeno total



(d) Aporte al índice ICA_{RED RÍO} por sólidos suspendidos totales

Figura 2.49. Variabilidad espacial del índice de Calidad ICA RED RÍO a lo largo del río Aburrá



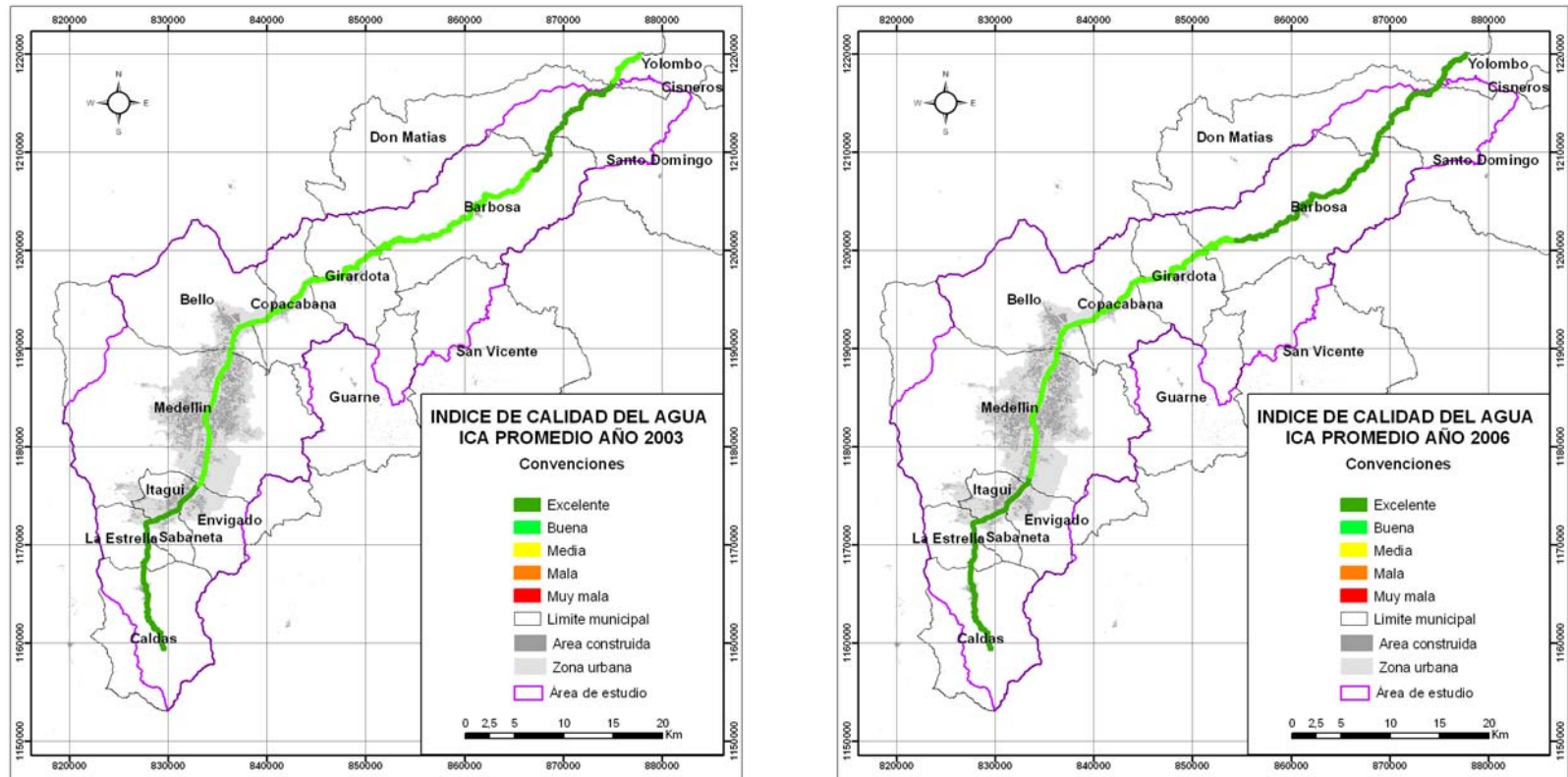


Figura 2.50. Mapas de la distribución espacial del índice ICA RED RÍO

□ Índices biológicos

Además de los métodos fisicoquímicos para determinar la calidad del agua, también existe una metodología mediante la cual el control biológico de los sistemas acuáticos permite evaluar las condiciones de un cuerpo de agua y de esta manera precisar la contaminación de éste. Los organismos acuáticos muestran una respuesta duradera a los episodios de contaminación intermitente, que no siempre se detectan mediante las pruebas fisicoquímicas, las cuales sólo hacen un muestreo de un volumen de agua pequeño en un tiempo dado. Como parámetro para medir la calidad media del agua en cierto tiempo, se pueden utilizar los organismos acuáticos, los cuales tienen la propiedad de acumular y magnificar los niveles bajos de sustancias químicas que mediante los métodos fisicoquímicos suele ser dispendioso.

En 1970 en Inglaterra fue establecido el BMWP, como un método simple de puntaje para todos los grupos de macroinvertebrados identificados hasta el nivel de familia y que requiere sólo datos cualitativos (presencia/ausencia), siendo este método una combinación del índice ecológico y de diversidad. Zamora y Alba (1996) hicieron una adaptación del BMWP inglés en España y lo denominaron BMWP'. En la Tabla 2.70 se muestran las diferentes clases de calidad de agua, los valores BMWP' asignados, el significado que tiene para cada una de ellas y el color con que se representan. Los criterios de valoración cualitativa y de representación cartográfica de este índice fueron modificados con el fin de hacerlo comparables con los valores del índice ICA.

Tabla 2.70. Categorías para el índice BMWP'

CLASE	CALIDAD	BMWP'	COLOR	SIGNIFICADO
I	Excelente	> 101	Verde	Aguas muy limpias, no contaminadas o no alteradas de modo sensible.
II	Buena	60 -100	Verde vivo	Son evidentes algunos efectos de contaminación.
III	Media	36 - 60	Amarillo	Aguas contaminadas
IV	Mala	16 - 35	Naranja	Aguas muy contaminadas
V	Muy mala	< 15	Rojo	Aguas fuertemente contaminadas

Fuente: Zamora y Alba, 1996

A cada familia de macroinvertebrados, se asigna un puntaje que va de 1 a 10 de acuerdo con su tolerancia a la contaminación orgánica, las familias más sensibles reciben una puntuación de 10; en cambio las más tolerantes a la contaminación reciben una puntuación de 1, la suma los puntajes de todas las familias en un sitio dado corresponde al valor del índice BMWP'. Los puntajes individuales para cada familia reflejan su tolerancia a la contaminación basado en el conocimiento de la distribución y la abundancia. Estos puntajes para cada familias de macroinvertebrados según el BMWP' se presentan en la Tabla 2.71.

Tabla 2.71. Puntajes para familias de macroinvertebrados

FAMILIA	PUNTAJE	FAMILIA	PUNTAJE	FAMILIA	PUNTAJE
Siphonuridae	10	Libellulidae	8	Hydrophilidae	5
Heptageniidae	10	Psychomyiidae	8	Clambudae	5
Leptophlebiidae	10	Philopotamidae	8	Helodidae	5
Ephemereidae	10	Caenidae	7	Dryopidea	5
Potamanthidae	10	Nemouridae	7	Elminthidae	5
Ephemeridae	10	Rhyacophilidae	7	Chrysomelidae	5
Taeniopterygidae	10	Polycentropodidae	7	Curculionidae	5
Leuctridae	10	Limnephilidae	7	Hydropsychidae	5
Capniidae	10	Neritidae	6	Tipulidae	5
Perlodidae	10	Viviparidad	6	Simuliidae	5
Perlidae	10	Ancylidae	6	Planariidae	5
Chloroperlidae	10	Hydroptilidae	6	Dendrocoelidae	5
Aphelocheiridae	10	Unionidae	6	Baetidae	4
Phryganeidae	10	Corophiidae	6	Sialidae	4
Molannidae	10	Gammaridae	6	Piscicolidae	4
Beraeidae	10	Platycnemididae	6	Valvatidae	3
Odontoceridae	10	Coenagriidae	6	Hydrobiidae	3
Leptoceridae	10	Mesoveliidae	5	Lymnaeidae	3
Goeridae	10	Hydrometridae	5	Physidae	3
Lepidostomatidae	10	Gerridae	5	Planorbidae	3
Brachycentridae	10	Nepidae	5	Sphaeriidae	3
Sericostomatidae	10	Naucoridae	5	Glossiphoniidae	3
Astacidae	8	Notonectidae	5	Hirudidae	3
Lestidae	8	Pleidae	5	Erpobdellidae	3
Agriidae	8	Corixidae	5	Asellidae	3
Gomphidae	8	Haliplidae	5	Chironomidae	2
Cordulegasteridae	8	Hygrobiidae	5	Oligochaeta	1
Aeshnidae	8	Dytiscidae	5		
Corduliidae	8	Gyrinidae	5		

Fuente: Zamora y Alba, 1996.

Para la estimación del índice BMWP' se emplearon los datos correspondientes a los muestreos biológicos realizados en los años 1972, 1997, 2001 y 2003. En la Tabla 2.72 se muestran los resultados obtenidos, donde se observa que, al igual que en los análisis fisicoquímicos presentados a través del ICA_{RED RÍO}, la disponibilidad de información no es la misma en los diferentes estudios recopilados. Sin embargo, las tendencias del índice, mostradas en la Tabla 2.65, resaltan claramente las óptimas condiciones de calidad de agua que prevalecen en la parte alta de la cuenca, entre las estaciones E1 (San Miguel) y E2 (Primavera), debidas a la baja intervención antrópica que se presenta en dicho sector. Por otro lado, cabe destacar las mejorías en la calidad del agua que, a la luz del índice BMWP, se presentan aguas abajo de la estación E5 (San Fernando) para el año 2003 respecto a las condiciones encontradas en los años anteriores (1972, 1997 y 2001).

Tabla 2.72. Índice BMWP estimado para diferentes años a lo largo del río Aburrá

ESTACIÓN		1972	1997	2001	2003
E1	San_Miguel		142	175	161
E2	Primavera	83			163
E3	Ancon_Sur		45	19	52
E4	Envigado	25			
E5	San_Fernando		6	4	22
E6	Aguacatala				36
E7	Puente_Guayaquil				21
E8	Aula_Ambiental		22	2	32
E9	Acevedo	3	12	2	25
E10	Machado	1			15
E11	Copacabana		3	6	21
E12	Girardota		7	8	16
E13	Hatillo		3	3	19
E14	Yarumito		7	12	31
E15	Pradera	17			24
E16	Porce	15	22	25	94

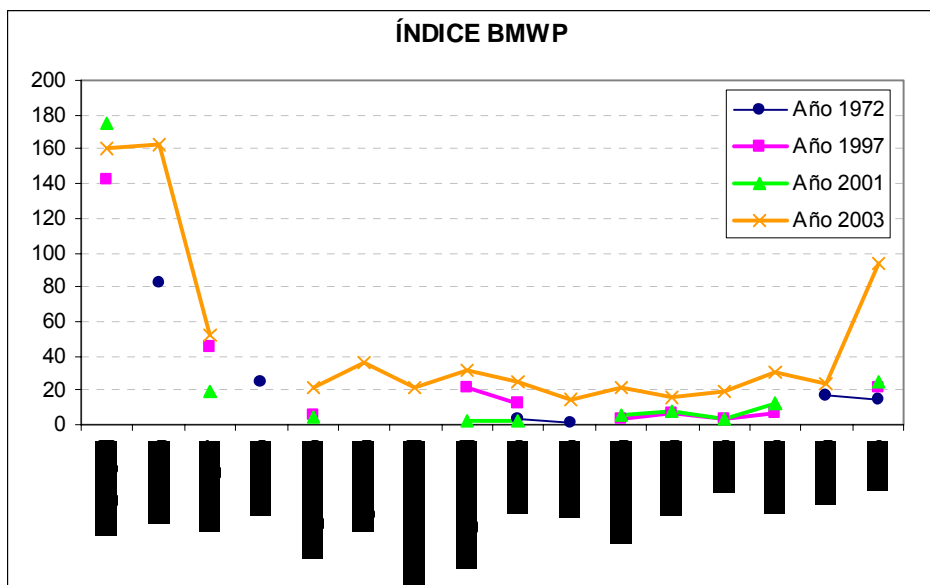


Figura 2.51. Variación espacial y temporal del índice BMWP'

Con la aplicación del índice BMWP', se hizo notorio como la calidad del agua del río Aburrá con el paso del tiempo ha mejorado, a excepción de las condiciones presentes en el año 2001 respecto al año 1997, donde en general la curva de calidad del agua para este último se encuentra por encima de la curva del año 2001. Este caso se puede

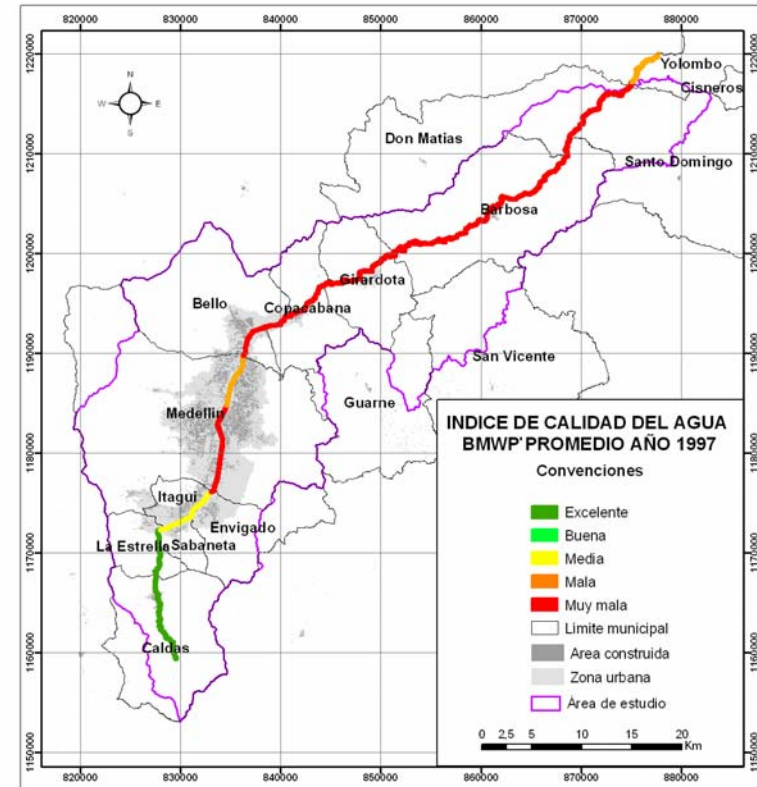
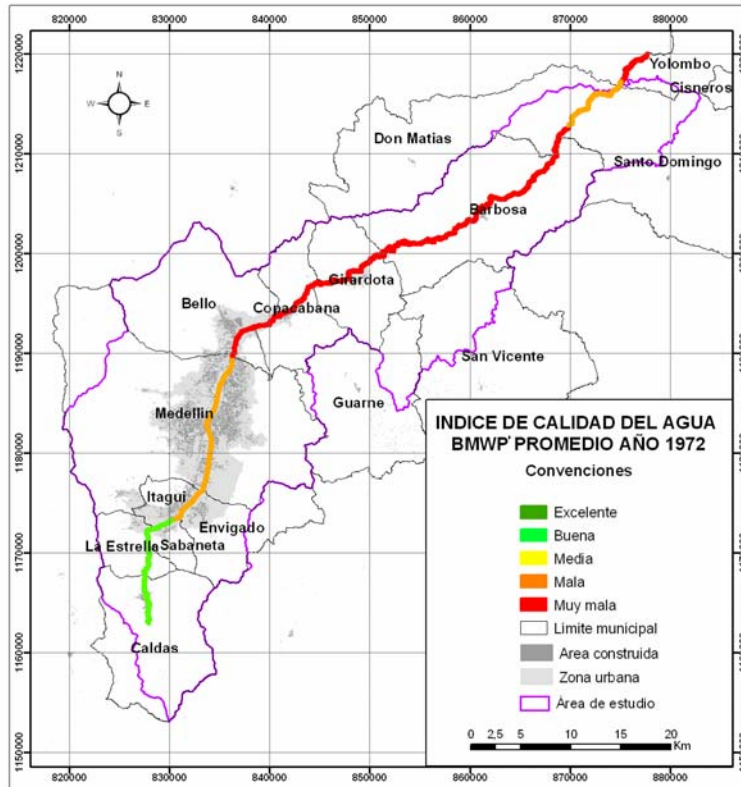
apreciar en las estaciones Ancón Sur, San Fernando y Puente Acevedo, situación que se asocia a un aumento en el tiempo de las descargas de agua residuales domésticas, industriales y/o combinadas, cuyos vertimientos se realizan a través de los interceptores del sistema de alcantarillado y que se localizan paralelos al río Aburrá, a esto se suman las descargas aguas abajo de la estación San Fernando (ubicada en planta de tratamiento que lleva su mismo nombre).

En la Figura 2.52 (mapa disponible en la base de datos espacial: agrupación: “2DG”, objeto: “AG_Calidad_BMWP_1972”, AG_Calidad_BMW_1997”, “AG_Calidad_BMW_2003”, “AG_Calidad_IBMW_2006”) se muestra la variación espacial del índice BMWP para los años analizados, dispuestos en la GeoDataBase.

2.6.6 Análisis de resultados y discusión

De acuerdo a los estudios más representativos en el tema de calidad de aguas, se llevó a cabo el diagnóstico de la misma en algunas de las fuentes de agua superficial en la cuenca del río Aburrá. En primera instancia, es importante resaltar que pese a que la mayor parte de los trabajos recopilados tenían los mismos propósitos (caracterización, seguimiento, control, diseño, entre otros), el tipo y cantidad de información, así como la definición estratégica de los correspondientes puntos de medición, difieren en gran medida por lo cual no es posible evaluar con completa claridad la dinámica espacial y temporal. Lo anterior resalta la importancia de la instauración de una red base de monitoreo ambiental como la implementada en Red Río Fase I (2005), sobre la cual deben fundamentarse los posteriores estudios que las autoridades y entidades ambientales realicen sobre el corredor del río Aburrá.

En la Figura 2.53 se traen a colación los indicadores ($ICA_{RED\ RÍO}$ y $BMWP'$) utilizados para describir los niveles de contaminación sobre el río Aburrá, junto con las categorías de clasificación correspondientes a cada uno de ellos. Ambos índices muestran una recuperación de la calidad general del río, en el periodo 1972 – 2006, principalmente entre las estaciones E5 (Pte. Aguacatala) y E10 (Pte. Acevedo), aunque el $BMWP'$ también refleja mejoras en la totalidad del tramo E5 (Pte. Aguacatala) – E16 (Pte. La Clara - Porce); sin embargo, se resalta la forma en que difiere la calificación cualitativa en las categorías *Excelente*, *Buena*, *Media*, *Mala* y *Muy Mala* correspondiente a cada índice. Aunque desde el punto de vista de las tendencias ambos índices poseen coherencia, las diferencias antes mencionadas, nuevamente resaltan la necesidad de definir un único indicador en el que cualquier plan de muestreo se consolide en los mismos términos.



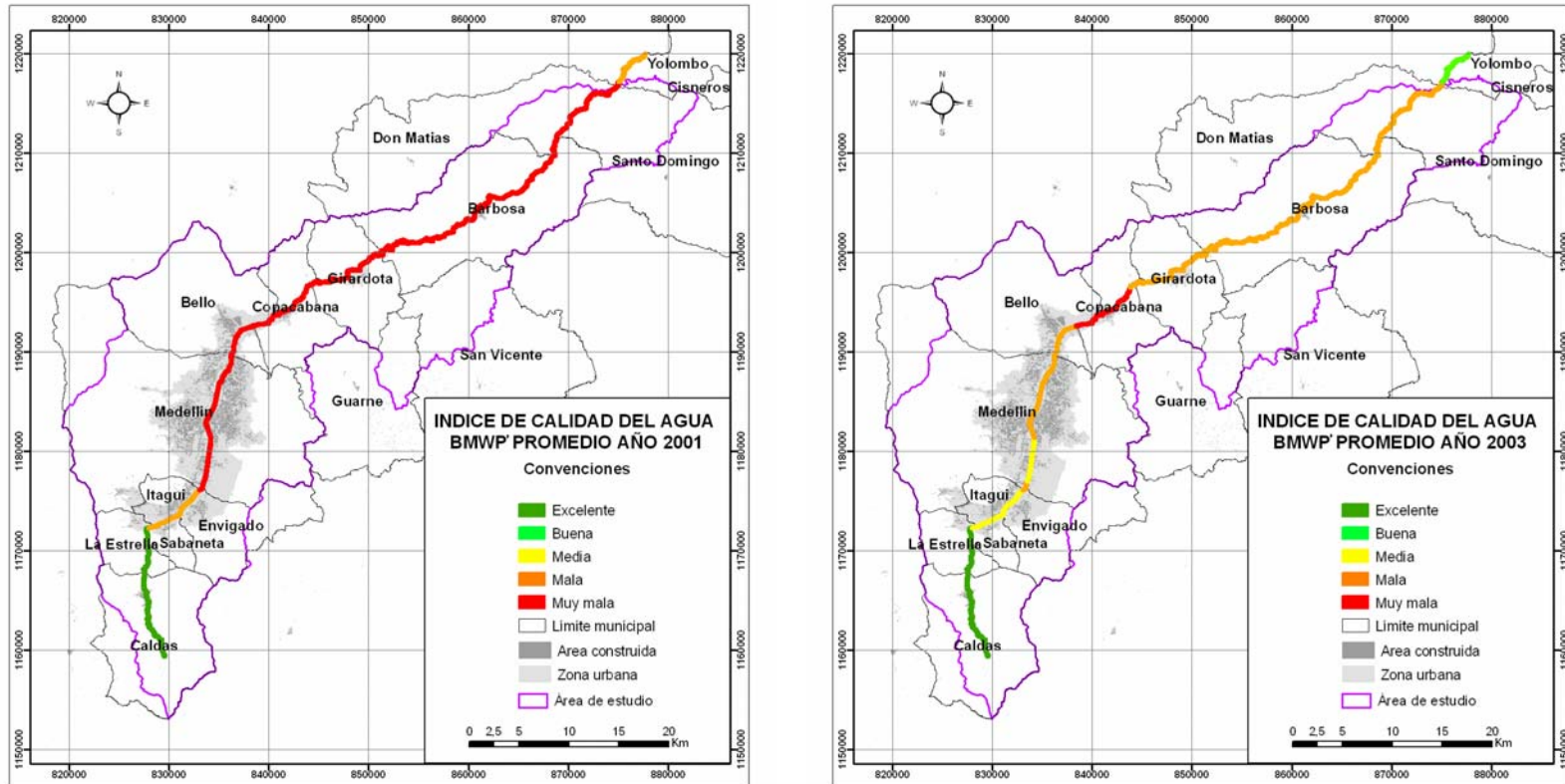
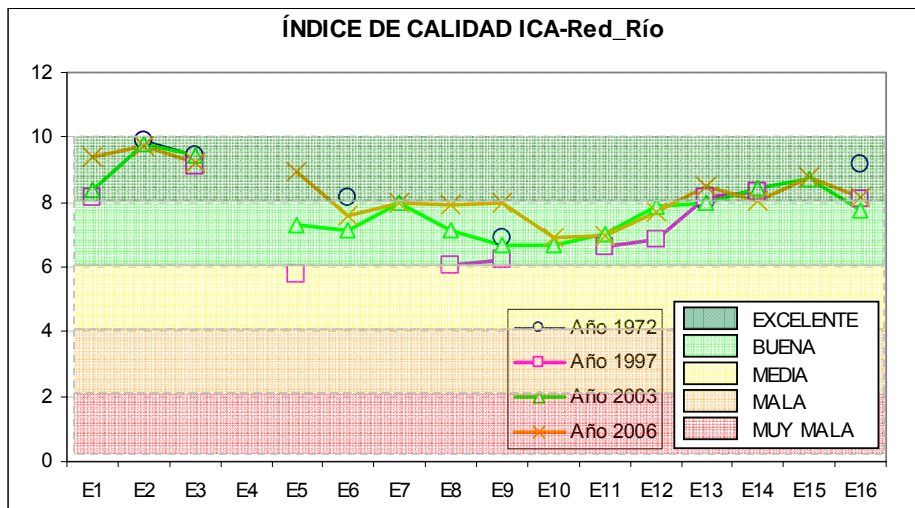
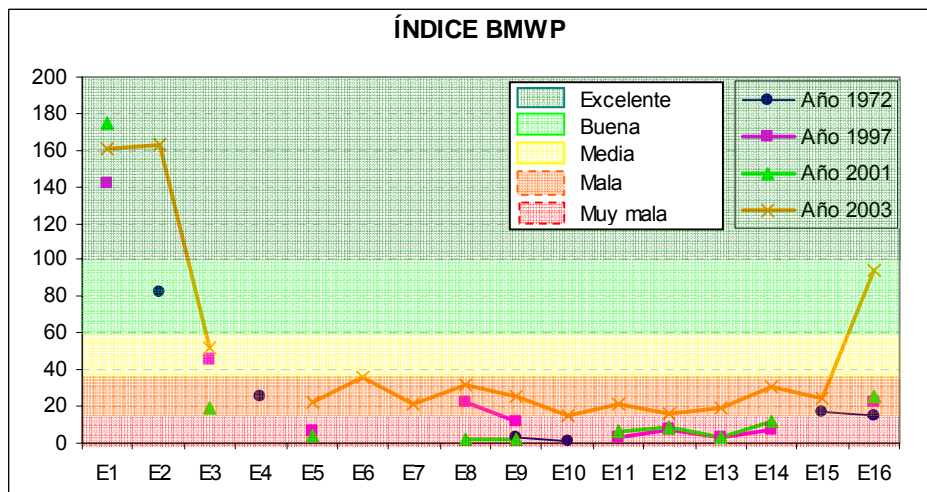


Figura 2.52. Mapas de la distribución espacial del índice BMWP'



(a) Indicador fisicoquímico ICA_{RED RÍO}



(b) Indicador biológico BMWP

Figura 2.53. Indicadores de la calidad general del agua del río Aburrá y su correspondiente calificación

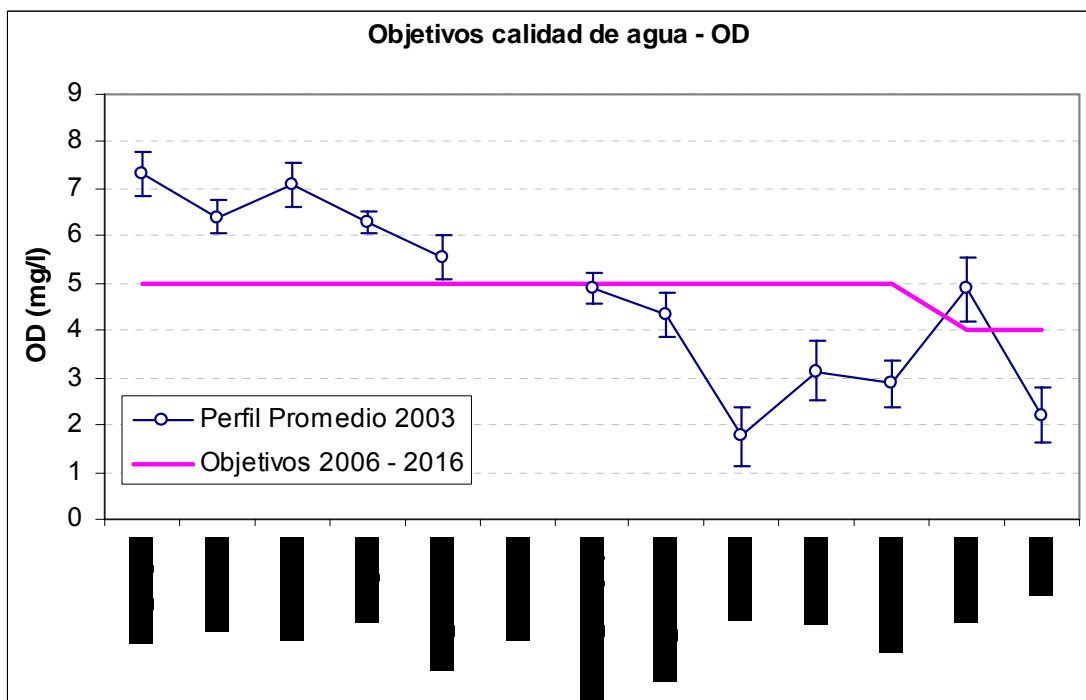
Por otro lado, se resalta el hecho de que la variabilidad del índice ICA_{RED RÍO} es prácticamente explicada por la variabilidad del contenido de materia orgánica del río, en términos de las variables DQO y DBO₅. No quiere decir esto que variables que mostraron baja variabilidad como el nitrógeno total y los sólidos suspendidos totales no deban monitorearse, ya que ellos explican otros tipos de contaminación ligados principalmente a fuentes difusas o no puntuales. Esto muestra de manera preliminar que las acciones realizadas a través de los planes de inversión en la cuenca en materia de calidad de aguas han permitido mejorarla en términos del contenido de materia orgánica inducido principalmente por vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales, lo cual se refleja en la calidad representada por el ICA_{RED RÍO} y BMWP’.

De acuerdo con lo anterior, las variables DBO₅ y DQO son fundamentales en trabajos futuros en la cuenca, teniendo en cuenta además que la primera hace parte del grupo de variables definidas en los objetivos de calidad de agua estipulados por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2006), junto con oxígeno disuelto, olores y grasas y aceites. En la Tabla 2.73 se muestran los objetivos para cada una de dichas variables definidos a partir de la línea base construida por red río Fase I (2005), y en la Figura 2.54 los perfiles promedio correspondientes al año 2003 comparado con los umbrales de concentración definidos en la Tabla 2.73.

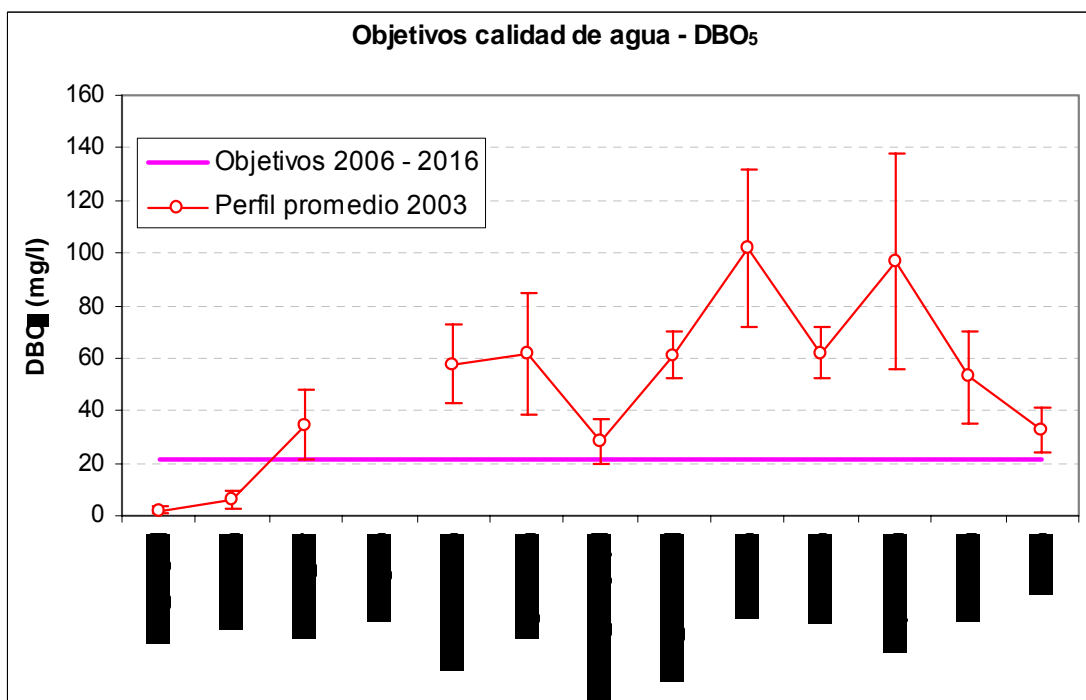
Puede observarse que los mayores esfuerzos en términos de DBO deben concentrarse entre las estaciones E8 (Aula Ambiental) y E12 (Girardota) donde actualmente se concentran los caudales de aguas residuales recolectados por las redes de colectores e interceptores de EEPPM. La construcción de la planta norte de tratamiento de aguas residuales y la terminación de las obras de recolección, transporte y disposición de aguas servidas, constituyen las estrategias prospectivas de acuerdo con el PSMV.

Tabla 2.73. Objetivos de calidad de agua definidos por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá para el periodo 2006 - 2016

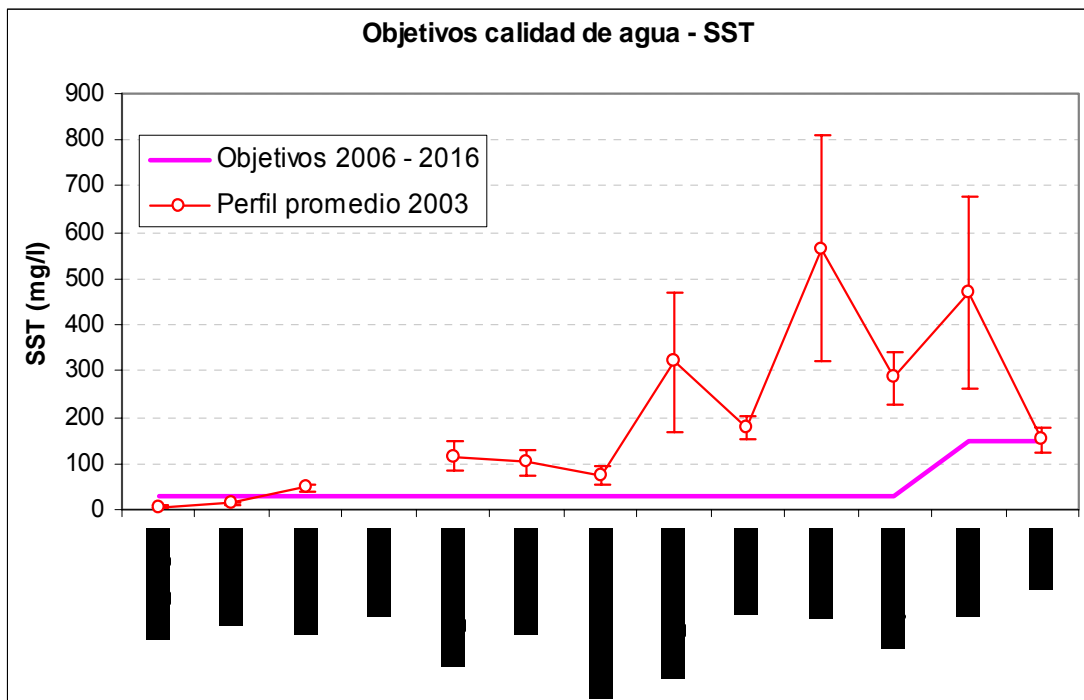
TRAMO	USOS PREDOMINANTES PRIORIZADOS	OBJETIVOS DE CALIDAD		
		Criterio	Unidad	Periodo 2006 – 2016 (10 años)
				Largo plazo (10 años)
Tramo 2 Primavera – PTAR Bello	Estético Asimilación Industrial restringido	Oxígeno Disuelto - OD	mg/L	5,0
		Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO ₅	mg/L	≤21
		Olores ofensivos	(H ₂ S) olor a huevo podrido	Ausente
		Grasas y Aceites	mg/L	≤0,15
		Sólidos visibles (flotantes y sedimentables)	Material perceptible a los sentidos	Ausente
		Sólidos Suspendidos Totales - SST	mg/L	≤30
Tramo 3 PTAR Norte – Estación PAPELSA	Transporte aguas residuales Estético Asimilación Industrial restringido	Oxígeno Disuelto - OD	mg/L	4,0
		Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO ₅	mg/L	≤21
		Olores ofensivos	(H ₂ S) olor a huevo podrido	Ausente
		Grasas y Aceites	mg/L	≤0,15
		Sólidos visibles (flotantes y sedimentables)	Material perceptible a los sentidos	Ausente
		Sólidos Suspendidos Totales - SST	mg/L	≤149



(a) Oxígeno Disuelto



(b) Demanda Bioquímica de Oxígeno



(c) Sólidos suspendidos totales

Figura 2.54. Objetivos para las variables OD, DBO y SST vs. Línea base consolidada en Fase I

En la Figura 2.54 se observa la importancia que tiene la adecuada definición de un indicador de calidad del agua, ya que a pesar de que índices como $ICA_{RED\ RÍO}$ sugiere niveles “Buenos” en algunos sectores -lo cual puede ser acertado bajo una mirada global-, las variables que desde el punto legislativo se han adoptado como indicadores sugieren niveles que aún distan de las condiciones necesarias de acuerdo con los usos prospectivos del agua del río Aburrá (ver Tabla 2.73).

2.6.7 Selección del índice para análisis de la evolución de la calidad del agua del río Aburrá

Los índices utilizados para la calidad del agua del río Aburrá en este componente del POMCA fueron: $ICA_{RED\ RÍO}$ y el BMWP. Sin embargo, para realizar un análisis de cómo la calidad del agua ha variado en el tiempo en diferentes tramos del río, se seleccionó un índice, que de acuerdo a las condiciones en que se realizaron las campañas de muestreo en los años 1972, 1997, 2001, 2003 y 2006, que presentará cierto grado de confiabilidad para poder realizar los análisis del comportamiento de la misma.

Como las campañas de muestreo en su totalidad no se realizaron con el fin de hacer un monitoreo de la calidad del agua, y por ende no presentan igual periodicidad en el tiempo

en que se efectuaron, e igualmente el río Aburrá ha presentado cambios en su estado natural, se decidió tener en cuenta las siguientes consideraciones para poder seleccionar el índice que sirva para el análisis de la variación de la calidad del agua:

- Que el índice no tuviera una alta susceptibilidad ante el requerimiento de que las fechas de muestreo en los diferentes años de campaña fueran las mismas.
- Que tuviera una baja sensibilidad ante factores de carácter hidráulico que han modificado en el tiempo el comportamiento del río.
- Que no requiera de forma rigurosa una igualdad en los métodos de toma de muestras en todas las campañas de muestreo
- Que los valores que maneje el índice no sean altamente variables frente al régimen hidrológico de la corriente.

De acuerdo con las anteriores consideraciones los resultados que se obtuvieron con los diferentes índices fueron las siguientes:

- El índice ICA presenta ciertas desventajas para pretender ser utilizado en un análisis de la evolución de la calidad del agua del río Aburrá. Este refleja una situación puntual, tanto en el espacio como en el tiempo, y por lo tanto sólo nos enseña la situación del río en el momento del muestreo.

De acuerdo con esto, es necesario para su utilización en un estudio de evolución de la calidad del agua, que las tomas puntuales realizadas en diferentes campañas de muestreo sean iguales espacial y temporalmente, de manera que permitan ser comparables y detectar cambios representativos en la calidad del agua del río en diferentes tramos del mismo.

Con relación a la sensibilidad del índice frente a cambios en las características hidráulicas del río, debe tenerse en cuenta que las variables fisicoquímicas que considera el ICA, son muy vulnerable a las variaciones o intervenciones de carácter antrópico, tal como la construcción de resaltos, la canalización del río, u otras obras hidráulicas, ya que las mismas proporcionan variaciones notorias en cuanto al caudal en los sitios de localización de estas obras, y por ende un cambio en el caudal origina una diversificación en las características fisicoquímicas del río, tal como un aumento puntual del oxígeno disuelto, cambios en la DBO, DQO, variaciones en la concentración de nitritos o nitratos, entre otras.

En cuanto al régimen hidrológico presente en el momento de la toma de las muestras, se debe tener en cuenta que este también juega un papel importante en cuanto a las variaciones del caudal, y por consiguiente en las condiciones fisicoquímicas del río en ese momento. Por lo cual, los efectos de la precipitación sobre el caudal de la corriente, pudieron modificar los resultados del índice si las muestras fueron tomadas en épocas de invierno o inmediatamente después de un evento de lluvia.

En la medición de variables fisicoquímicas para calcular este índice, se requiere una igualdad en los métodos de toma de muestras en cada una de las campañas de muestreo, de lo cual no se tiene certeza, ya que no se conocen para los años 1972, 1997 y 2001 cuales fueron los métodos utilizados en la toma de muestras y en la medición de las variables fisicoquímicas. De acuerdo con lo anterior, es claro que el índice ICA no permite tener una noción cercanamente real de como la calidad del agua del río Aburrá ha variado en el tiempo.

- El índice BMWP' de acuerdo a las consideraciones expuestas anteriormente, presenta más ventajas con relación al índice ICA para ser utilizado en un análisis de evolución de calidad del agua.

Este índice, al trabajar con macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua, presenta resultados reales del estado del cuerpo hídrico en el lugar del muestreo, ya que estos organismos vivos se adaptan a determinadas condiciones ambientales, y si existen variaciones en el tiempo de la composición y estructura de las comunidades de estos organismos, esto puede interpretarse como signos evidentes de cambios en las condiciones ambientales del agua.

Por lo anterior, este índice no presenta una alta exigencia en una igualdad temporal en la toma de muestras, más si en la localización de las mismas, de manera que puedan identificar o no, variaciones de las comunidades de macroinvertebrados en un mismo punto, y de esta forma, se pueda asociar a un cambio en la calidad del agua.

Con relación a la toma de muestras y su utilidad en el análisis de la evolución de la calidad del agua, se tiene que los macroinvertebrados son razonablemente sedentarios, su vida es larga en comparación con la de otros organismos, de modo que sirven para estudiar cambios durante largos períodos. El grupo es tan heterogéneo que una sola técnica de muestreo recoge muchas especies distintas, así que es posible que algunos de ellos respondan a un determinado cambio de las condiciones ambientales (Rosemberg y Resh, 1993).

Además de lo anterior, el índice BMWP' presenta la ventaja que mientras los análisis físico-químicos reflejan una situación puntual, tanto en el espacio como en el tiempo, este índice refleja las condiciones existentes tiempo atrás antes de la toma de las muestras.

Aunque los macroinvertebrados logran ser susceptibles a las variaciones en las características hidráulicas de una corriente, en relación a su capacidad de permanecer en tramos donde la corriente es muy fuerte, los organismos que se encuentran en tramos con estas características además de tolerar esta condición, son capaces ante todo de evidenciar el estado de contaminación del agua en el punto de muestreo, ya que la existencia de especies determinadas de macroinvertebrados esta sujeta a su capacidad de tolerar o no ciertos grados de contaminación.

Con relación a los métodos para la toma de muestras, este índice no requiere métodos dispendiosos y exigentes en la recolección de especies de macroinvertebrados.

Acorde con las ventajas que presenta este índice, se consideró que para este caso, el mismo era el más apropiado para observar la variación de la calidad del agua en el tiempo y en el espacio.

2.6.8 Problemáticas identificadas

La calidad del río Aburrá representa el proceso de contaminación de toda su cuenca. Del análisis general hecho de las quebradas afluentes al río Aburrá se concluye que el monitoreo del río es una estrategia indirecta de evaluación de la evolución de la calidad en las cuencas tributarias. Los resultados presentados en la Figura 2.45, Figura 2.46, Figura 2.47 y Figura 2.48 muestran variaciones en las concentraciones de contaminantes, lo cual se relaciona con los vertimientos directos que en estas cuencas se hacen.

Algunos de los mayores aportes de vertimientos directos de aguas residuales domésticas provienen de los asentamientos ilegales de las zonas urbanas, los cuales por las características del suelo en que viven no cuentan con servicios públicos; Algunas empresas lo hacen de manera ilegal o se identifican vertimientos de aguas residuales mezcladas con aguas lluvias (conexiones erradas). La mayoría de los asentamientos rurales, dado que no cuentan con servicio de alcantarillado, vierten sus aguas directamente a las corrientes sin ningún tipo de tratamiento.

- **Alto vertimiento de aguas residuales.**

La creciente urbanización produce mayores cargas de agua residual, lo cual ha incrementado los vertimientos, los cuales en algunos casos no son tratados, además

algunas industrias no controlan la calidad de sus efluentes o los sistemas de tratamiento no son suficientes, tanto los individuales como los de la empresa prestadora de servicios.

Indicador: Porcentaje de vertimientos ilegales

■ **Tratamiento inadecuado en los vertimientos industriales**

Cada vez es más común la existencia de pequeñas empresa que aun no poseen procesos de producción limpia, lo cual incide en el aumento de desechos en las corrientes, los cuales en la gran mayoría de los casos, no son tratados, además grandes empresas con insuficientes tratamientos

Indicador: Total de los vertimientos industriales tratados con respecto al total de los vertimientos levantados

■ **Mala calidad del agua**

El aumento de vertimientos domésticos no tratados, la existencia de puntos de descargas industriales y de los colectores aún no tratados, han deteriorado la calidad el agua, aumentando la brecha para alcanzar los niveles deseados. Aunque se han hecho grandes obras para el tratamiento de las aguas, el problema sigue siendo mayor que las soluciones implementadas.

Indicador: Índices de calidad

2.7 CONCLUSIONES

En cuanto a la información de precipitación se puede afirmar que la densidad de estaciones que existe sobre el Valle es buena pero no suficiente para realizar estudios detallados de la variabilidad de la misma.

Las estaciones de caudal son muy pocas, su distribución no es continua en el corredor fluvial del río y su existencia es nula en afluentes de gran importancia, lo que impide analizar y realizar estimativos confiables de caudales máximos y mínimos. Dado que los cálculos son muy aproximados respecto a estos caudales se recomienda que los valores de los mismos sean afectados por un factor de seguridad haciendo mayores los máximos y mas pequeños los mínimos.

Teniendo en cuenta los comentarios anteriores es clara la necesidad de mejorar la instrumentación a nivel de estaciones climatológicas y de caudal, las cuales son pocas en

relación con el área de la Cuenca. Una mayor densidad de estaciones y con mejor resolución permitirá realizar cálculos mas aproximados de caudales máximos y mínimos y de la climatología del valle.

En el cálculo del índice de escasez de agua superficial se usó la metodología de la Resolución 0865 de 2004 del IDEAM por lo que no se consideró la variabilidad espacial de la oferta hídrica y de la demanda de agua, lo cual es fundamental para medir la disponibilidad del recurso superficial.

Se encontraron los mayores índices de escasez a nivel rural en la zona central de la Cuenca, cerca al casco urbano del municipio de Medellín, lo que evidencia la alta presión sobre el recurso, en cuencas tales como: Quebrada Doña María (Sector perteneciente a Medellín), La Iguana y Santa Elena. De otro lado las cuencas La Jabalcona, Doña María (Sector perteneciente a Itagüí), Piedras Blancas y Altavista, presentan un índice de escasez Medio Alto, dado que se encuentra ubicadas en zonas con densidades de población altas. Adicionalmente, las Quebradas La García, La Ayurá, El Salado, Ovejas, La Hueso, La Picacha, La Presidenta, La Doctora presentan una situación de presión importante, ya que el índice de escasez en estas cuencas es valorado como Medio. En las zonas sur y norte la cuenca, los índices de escasez presentaron valores Mínimos y No Significativos, lo cual refleja la poca densidad poblacional rural en estas áreas.

Con respecto al abastecimiento actual y futuro de agua en la cuenca es importante resaltar el aumento de la presión por el recurso (según los resultados del índice de escasez rural) hacia el centro del Valle, lo cual es un punto de partida para pensar en la reglamentación de dichas cuencas con el fin de controlar la sobre-explotación del recurso hasta su agotamiento.

La información que actualmente suministran los expedientes de concesiones y vertimientos registrados en las entidades ambientales no es adecuada, debido a un sinnúmero de factores, entre los que cabe resaltar que buena parte de la información: No presenta georeferenciación, no tienen el estado actual del expediente, no presentan el caudal de vertimiento y/o captación, no tienen la resolución de la entidad y no se aclara si el usuario construyó o no la estructura de captación recomendada por la entidad.

Los datos sobre concesiones de agua con los que cuentan las autoridades ambientales no se encuentran actualizados, presentan poca concordancia con la situación real. Durante el desarrollo de planes de ordenamiento de cuencas a cargo del Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Facultad de Minas, Universidad Nacional (casos específicos Quebradas Doña María, La Aguacatala y La Iguaná), en los cuales se encontró una correlación del 10% entre las captaciones reales y los datos oficiales de las entidades ambientales.

En cuanto a la proyección de la población del Valle de Aburrá, se hizo el cálculo de las personas que habitan la Cuenca para los municipios de Don Matías, Guarne, San Vicente, Santo Domingo y Yolombó, considerando la densidad poblacional rural de los mismos, dado que solo una porción de sus territorios está contenida en la Cuenca. En cuanto a este aspecto cabe notar que los municipios de San Vicente y Santo Domingo presentan una tasa de crecimiento negativa, a diferencia del resto de los municipios que integran la cuenca del río Aburrá.

Se puede observar que en general las proyecciones evaluadas con diferentes metodologías presentan valores similares, siendo Dinámica Poblacional el método con los mayores valores, siendo de esta manera el más adecuado. Por esta razón, y teniendo en cuenta que Dinámica Poblacional relaciona las variables más representativas de la Cuenca (además el horizonte de planificación es de mediano plazo) se considera que este método puede representar en buena medida la proyección de la población.

La metodología de Dinámica Poblacional tiene requerimientos de información detallada y actualizada, por lo tanto no es conveniente emplearla en estimaciones de demanda de largo plazo (mayor a 9 años), debido a la variación en los cambios en las tasas de natalidad y mortalidad, cambios en los flujos de población al interior de la Cuenca que están sujetos a situaciones de orden público, decisiones políticas de orden nacional y local y al comportamiento mismo de la economía. En proyecciones de más de 9 años se recomienda el uso del modelo propuesto por la Universidad Nacional.

El abastecimiento del sistema de acueducto del Valle de Aburrá se realiza, en general, a partir de la importación de agua de cuencas externas a la del río Aburrá, de las cuales aproximadamente el 83% del caudal tratado es externo. Las fuentes de las cuales se abastece el sistema para prestar el servicio de acueducto corresponden a los embalses de Río Grande, La Fe y Piedras Blancas.

Es clara la dependencia hídrica que tienen los habitantes de la Cuenca del río Aburrá de otras cuencas para satisfacer sus necesidades de agua potable. De ahí, que se sugiere que en estudios futuros, se incluyan las cuencas que aportan el agua, de modo que se pueda realizar una planificación, de uso y protección, desde el punto de vista urbano-regional.

La capacidad instalada de tratamiento de agua de EEPPM es de 17.25 m³/s, lo cual garantizará el caudal demandado al año 2025 con un escenario tendencial. El agua que se trata en 10 plantas de tratamiento de las cuales 6 funcionan con agua propia de la Cuenca (0.72 m³/s), 2 con una mezcla de agua propia e importada (1.33 m³/s) y 2 con agua importada (15.2 m³/s).

De acuerdo a los registros históricos de acueducto de EEPPM, la dotación media residencial en el Valle de Aburrá es de 211 l/s, la cual históricamente ha venido disminuyendo, lo que evidencia una mayor conciencia en el uso del agua.

Del inventario de acueductos comunitarios se encontró que estos cuentan aproximadamente con unos 36,000 suscriptores, con un caudal otorgado total de 0.76 m³/s para un total de 289 acueductos. El trabajo realizado evidencia además: que no se cuenta con información que permita plantear una detallada propuesta de gestión sobre el servicio comunitario de acueducto en la Cuenca, la importancia de estas instituciones comunitarias y su significativa participación en el servicio de acueducto del sector periurbano y rural y la alta variabilidad entre las características de unos y otros. Todas estas son una invitación a ampliar y mejorar la base de datos resultado de este trabajo.

De otro lado respecto a estos acueductos se tiene que el aporte de las comunidades locales a la prestación del servicio de acueducto es muy significativo, la calidad del servicio es muy variable, pero no solo depende de la administración de los sistemas sino de las condiciones ambientales en las cuencas abastecedoras.

El módulo de disponibilidad desarrollado en HidroSIG Java es una herramienta preliminar para la toma de decisiones al interior de las entidades ambientales, aunque debe tenerse en cuenta que los cálculos que allí se realizan no consideran la calidad del recurso, condición que puede limitar el uso del agua.

Respecto a la hidráulica se tiene que los perfiles de flujo muestran que las obras de canalización del río Medellín tienen suficiencia hidráulica para un caudal de periodo de retorno de 100 años. Aun así a partir de la información de del software DesInventar 6.2.8, en el río Aburrá se identificaron seis lugares críticos donde se han presentado frecuentes inundaciones: La Macarena, Santa Cruz, Moravia, La Rosa y San Isidro. En todos ellos hay aporte de afluentes directos al río Aburrá. Se resalta nuevamente que el modelo hidráulico del río Aburrá no es consistente con esta realidad.

Los niveles de la superficie libre en ningún momento desbordan el canal, y las velocidades asociadas en algunas secciones son cercanas a 5.5 m/s, lo que indicaría que el flujo podría arrastrar material de alta competencia, capaz de impactar sobre las estructuras de protección y mitigación existentes, provocando inestabilidad e inminente falla.

Con el fin de obtener resultados más confiables del tránsito hidráulico es conveniente realizar un levantamiento topográfico del río Aburrá a detalle, con secciones transversales por lo menos cada 100 metros y con secciones de detalle en sitios críticos. Cabe notar que este trabajo fue un primer acercamiento a la modelación hidráulica del río Aburrá y

que los resultados deben valorarse teniendo en cuenta todas las dificultades que se presentaron en la ejecución del mismo, tales como: La falta de información, la carencia de un levantamiento topográfico de detalle y la incertidumbre en los coeficientes de rugosidad, entre otras.

La caracterización y ubicación de las descargas de aguas residuales industriales en el Valle de Aburrá aún es preliminar, teniendo en cuenta la aparición de vertimientos debido a microempresa y famiempresas, de esta manera, los datos no representan lo que acontece a lo largo del río. Se debe mantener un control más estricto de estas descargas por parte de las entidades ambientales, con mediciones fisicoquímicas y de caudal más periódico.

De acuerdo a los resultados se sugiere que se haga un seguimiento más riguroso por medio de control, vigilancia y seguimiento de los vertimientos de aguas residuales. Es necesario implementar medidas más drásticas para evitar que las industrias continúen disponiendo del río como la solución para sus desechos líquidos.

Se hace necesario la puesta en marcha y la operación de una red de monitoreo de calidad de aguas, con la cual se mantenga registro en todo momento del estado del cuerpo de agua, la cual es una herramienta muy importante en el control y seguimiento de los vertimientos.

Se sugiere la utilización del índice de calidad BMWP' para el estudio y seguimiento, tanto espacial como temporal, de la calidad del agua en el río Aburrá.

2.8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ACCION SOCIAL PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA. Información de inmigraciones por municipio [en línea]. <<http://www.accionsocial.gov.co>> [citado en el 2006]

ALCALDÍA DE MEDELLÍN. Municipios y corregimientos de Medellín [en línea]. <<http://www.medellin.gov.co>> [citado en el 2006].

AGUAS Y AGUAS DE PEREIRA – UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Oferta y Demanda Hídrica en la Subregión No.1 del Departamento de Risaralda con los municipios de Cartago y La Virginia. Medellín, 2004.

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ - COMPAÑÍA COLOMBIANA DE CONSULTORES S.A. Estudios y Diseños para la Canalización del río Medellín entre Copacabana y Girardota. Medellín, 1998. 10 tomos.

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ, UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA Y UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN. Diseño y Puesta en Marcha de la Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Medellín en Jurisdicción del Área Metropolitana, Fase I (Red Río Fase I). Medellín, 2005.

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ – SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE – Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA). Formulación del Plan de Manejo de las Microcuencas de las quebradas La Rosa y La Bermejala. Medellín, 2005.

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ. Propuesta de meta global de reducción de carga contaminante y metas asociadas, expresada como carga total contaminante vertida por fuentes presentes y futuras - Quinquenio 2006-2011. Subdirección Ambiental. Medellín, 2006.

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ – SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE – Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA). Formulación del Plan de Manejo de la microcuenca de la quebrada La Presidenta. Medellín, 2006

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ – UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Estudio para la Reglamentación del Aprovechamiento y Uso de las Aguas de la Quebrada Doña María. Medellín, 2006.

BARCO, O. J. CUARTAS, A. Estimación de la evaporación en Colombia. Trabajo dirigido de grado (Ingeniería Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. Medellín, 1998. 136 p.

CANO GALLEGO, RODRIGO. “Estudios y diseños para la canalización del Río Medellín en los municipios de Copacabana y Girardota”. Medellín, 2004.

CHÁVEZ, B., y JARAMILLO, A. Regionalización de la temperatura del aire en Colombia. Cenicafé. En: Revista Avances en Recursos Hidráulicos. No. 6 (Sep, 1996); p. ISSN 0121-5707.

CHOW, V.T. MAIDMENT, D.R. MAYS, L.W. Hidrología Aplicada. Bogotá: Ed McGraw – Hill, 1996. 583 p.

CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ley 99 de 22 de diciembre de 1993 por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente. Santafé de Bogotá, 1993.

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA - DANE. Primeros hallazgos del censo [en línea]. < <http://www.dane.gov.co> > [citado en el 2006]

DIRECCIÓN SECCIONAL DE SALUD DE ANTIOQUIA. Estadísticas [en línea] < <http://www.dssa.gov.co> > [citado en el 2006]

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN - EEPPM. Estado de la contaminación del río Medellín. Medellín, 1972

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN - EEPPM. Calidad del agua del río Medellín y sus quebradas afluentes. Medellín, 1981

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN - EEPPM. Monografía del Río Medellín. En: Revista Empresas Públicas de Medellín. Vol. 3 No. 3 - 4. (Jul, 1981); p. 211.

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN – EEPPM / Revista Hidrometeorológica. Volumen 1, No 1 (2005). Medellín: EEP, 2005. 150 p. ISSN: 1900 – 7248.

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN - EEPPM. Plan de saneamiento y manejo de vertimientos. Gerencia de aguas. Subgerencia de aguas residuales. Medellín, 2005

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E.S.P - Área Normalización y Soporte Aguas. Proyección de agua no contabilizada en el sistema de acueducto. Medellín, 2007.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Metodología de cálculo del Índice de Escasez. Santafé de Bogotá, 2004.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM. CATALOGO DE ESTACIONES. [en línea] <
<http://intranet.ideam.gov.co/Redes/Catalogoe.htm>> [citado en el 2006]

INSTITUTO MI RÍO. Aspecto Biológico y Físicoquímico del Río Medellín. Medellín, 1997

INSTITUTO MI RÍO. Aspecto Biológico y Físicoquímico del Río Medellín. Segunda Etapa. Medellín, 2001

INSTITUTO MI RIO; Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia - CORANTIOQUIA; Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Formulación de los Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas - PIOM : diseño de la metodología : convenio 053 de 2001. Medellín, 2003

NATIONAL SCIENCE FOUNDATION – NSF. Water Index Quality. [en línea] <
http://www.nsf.org/consumer/just_for_kids/wqi.asp> [citado en el 2006]

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS 2000. Santafé de Bogotá, 2000.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 155 del 22 de Enero de 2004. Santafé de Bogotá, 2004.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución número 0865 (Julio de 2004). Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones. Santafé de Bogotá, 2004.

PERSONERÍA DE MEDELLÍN. Población Desplazada 2000-2006. [en línea] <
<http://www.personeríamedellín.gov.co>> [citado en junio de 2006]

PLANEA, Página oficial. [en línea] <<http://www.planea.org.co/>>. [citado en junio de 2006]

PULGARIN, Adriana. Curvas de regulación para embalses de aprovechamiento hidráulico. Tesis de Grado (Ingeniería Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín, 1997.

RAMIREZ, J. Estado de la contaminación del río Medellín. Universidad Nacional de Colombia - Empresas Públicas Municipales de Medellín. Medellín, 1973. 165 p.

REPÚBLICA DE COLOMBIA, MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO, DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, RAS. Título B. Bogotá, 2000.

RESTREPO, J.C. Modelo de despacho óptimo del sistema de acueducto de las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. Tesis de Maestría (Magíster en Recursos Hidráulicos). Universidad Nacional de Colombia. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Medellín, 2001.

RIVERA, H. G., DOMÍNGUEZ, E., MARÍN, R. y VANEGAS. R. Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Bogotá, 2004.

ROSENBERG, D. M. y RESH, V.H. Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates. Chapman and Hall, N.Y., 1993. 488 p.

SMART, G. Measurement and analysis of alluvial bed roughness. En: Journal of Hydraulic Research. No 3 (2004); p. ISSN 0022 – 1683.

UNIVERSIDAD DEL VALLE - RED DE ESTUDIOS SOCIALES DE PREVENCIÓN DE DESASTRES EN AMÉRICA LATINA. Base de datos DESINVENTAR 6.8.2. [en línea] <<http://www.desinventar.org/desinventar.html>> [citado en octubre de 2006]

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN – UPME - COLCIENCIAS. Atlas hidrológico de Colombia. Unidad de planeación minero Energética- Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Postgrado de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Medellín, 2000. 200 p.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN – CORANTIOQUIA - INSTITUTO DEL AGUA. Estudio de la Oferta y Demanda Hídrica de la Cuenca de la Quebrada La Aguacatala. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas. Medellín, 2004.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN – CENTRO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ANTIOQUIA, CTA. Balances hidrológicos y atlas digital de Antioquia. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas. Medellín, 2001.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN. Manual de Usuario de HidroSIG - versión 3.0 Beta. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín, 2003. 109p.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN. Detección de Puntos Anormales Extremos (outliers) en Series Hidrológicas. Medellín, Colombia: Dirección de Investigaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (DIME). Medellín, 2003.

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE – UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Actualización de la red hídrica en la zona centro oriental del municipio de Medellín microcuenca de la quebrada Santa Elena. Medellín, 2004.

U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS - Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System, User Manual. U.S. 2002a.

U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS - Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual. U.S., 2002b.

U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS - Hydrologic Engineering Center. HEC-GeoRAS An Extension for Support of HEC-RAS using ArcGIS, User Manual. U.S., 2005.

ZAMORA, C. y J. ALBA–TERCEDOR. Bioassessment of organically polluted Spanish rivers, using a biotic index and multivariate methods. J. N. Am. Benthol. Soc. 1996.

ZHANG, X., FRIEDL; M. A., SCHAAF, C. B. The footprint of urban climates on vegetation phenology. Geophysical Research Letters, 2004. Vol. 31, L12209.

TABLA DE CONTENIDO

A2.	ANEXOS SUBSISTEMA ABIÓTICO – RECURSO AGUA	1
A2.1	REVISIÓN CRÍTICA DE MODELOS HIDROLÓGICOS URBANOS	1
A2.1.1	Introducción	1
A2.1.2	Desarrollo de los modelos	1
A2.1.3	Modelos hidrológicos distribuidos	2
A2.1.4	Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool)	4
A2.1.5	Modelo SWMM (Storm Water Management Model)	6
A2.1.6	Modelo MOUSE	10
A2.1.7	Modelo TURIA (basado en la aplicación en el río Turia, España)	13
A2.1.8	Modelo SHETRAN	16
A2.1.9	Modelo ILLUDAS (Illinois Urban Drainage Area Simulator)	19
A2.1.10	Modelo STORM	21
A2.1.11	Modelo HIDRAS	23
A2.1.12	Modelo HEC-1	26
A2.1.13	Modelo HEC HMS	27
A2.1.14	Modelo LAG	31
A2.1.15	Modelo CLARK	32
A2.1.16	Modelo MUSKINGUM	33
A2.1.17	Modelo PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System)	35
A2.1.18	Modelo WMS	36
A2.1.19	Modelo GWLF (Generalized Watershed Loading Function)	37
A2.1.20	Modelo SLAMM (The Source Loading and Management Model)	38
A2.1.21	DR3M (Distributed Routing Rainfall-Runoff Model)	39
A2.1.22	CONCLUSIONES	40
A2.1.23	Referencias Bibliográficas	42
A2.2	ANÁLISIS DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA	45
A2.2.1	Estaciones hidrometeorológicas	45
A2.2.2	Pruebas de homogeneidad	45

A2.3 ANÁLISIS DEL CAMPO DE LLUVIA EN LA CUENCA DEL RÍO ABURRÁ	50
A2.3.1 Caracterización a escala anual	50
A2.3.2 Caracterización a escala diaria	61
A2.3.3 Conclusiones	64
A2.3.4 Referencias Bibliográficas	66
A2.4 MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA LA PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN	67
A2.4.1 Método aritmético	67
A2.4.2 Método geométrico	68
A2.4.3 Método de la variación logarítmica	68
A2.4.4 Método propuesto por la Universidad Nacional de Colombia	69
A2.4.5 Método de la curva de crecimiento	70
A2.4.6 Método de la tasa decreciente	71
A2.4.7 Referencias Bibliográficas	72
A2.5 ACUEDUCTOS COMUNITARIOS EN LA CUENCA DEL RÍO ABURRÁ	73
A2.5.1 Introducción	73
A2.5.2 Descripción del trabajo	74
A2.5.3 Relaciones entre planificación hídrica y ordenamiento territorial	75
A2.5.4 Aspectos legales	75
A2.5.5 Oferta hídrica y desequilibrios regionales	76
A2.5.6 Usos del suelo requeridos para la conservación del recurso hídrico	77
A2.5.7 Acueductos comunitarios y sus implicaciones para su desarrollo local	78
A2.5.8 Conflictos entre uso del suelo y uso del agua en la Cuenca	79
A2.5.9 Problemas institucionales	80
A2.5.10 Ley 142 de 1994. ¿Amenaza u oportunidad para los sistemas comunitarios?	83
A2.5.11 Consideraciones sobre la pertinencia del uso del agua que se produce dentro de la Cuenca	84
A2.5.12 Recomendaciones	85
A2.5.13 Propuesta	86
A2.5.14 Base de datos	87
A2.5.15 Referencias Bibliográficas	88
A2.6 MODULO DE DISPONIBILIDAD	90
A2.6.1 Concepción módulo de disponibilidad hídrica	90
A2.6.2 Manual de modulo de disponibilidad	94

LISTA DE FIGURAS

Figura A2.1.	Metodología de control de entrada de la interfase SWAT-ArcGIS	7
Figura A2.2.	Esquema de la calibración del modelo MOUSE.....	12
Figura A2.3.	Idealización de la cuenca como un plano inclinado.....	16
Figura A2.4.	Componentes del Modelo SHETRAN.....	17
Figura A2.5.	Formato de datos iniciales del modelo ILLUDAS	20
Figura A2.6.	Retraso temporal del modelo LAG	31
Figura A2.7.	Almacenamiento con prisma Modelo MUSKINGUM	34
Figura A2.8.	Mapa Ciclo anual de la lluvia en la cuenca del río Aburrá	51
Figura A2.9.	Ciclo Anual discretizado por años de eventos ENSO (El Niño-Oscilación del Sur) .	54
Figura A2.10.	Serie anual de precipitación en la Estación Miguel de Aguinaga_2701047	56
Figura A2.11.	Número de días con precipitación para cada serie en la cuenca del río Aburrá....	59
Figura A2.12.	Series de cuantiles de las estaciones Caldas y San Antonio correspondientes a la zona sur de la cuenca del río Aburrá	60
Figura A2.13.	Series de cuantiles de las estaciones Villa hermosa y Aeropuerto correspondientes a la zona centro de la cuenca del río Aburrá.....	60
Figura A2.14.	Series de cuantiles de las estaciones Barbosa y Girardota correspondientes a la zona norte de la cuenca del río Aburrá	60
Figura A2.15.	Ciclo diario de las estaciones de precipitación en la cuenca del río Aburrá	63
Figura A2.16.	Ciclo anual de la precipitación a partir de datos horarios	64
Figura A2.17.	Ingreso de mapas al modelo	92
Figura A2.18.	Interfaz para el ingreso de las captaciones.....	92
Figura A2.19.	Interfaz para el ingreso de vertimientos	93
Figura A2.20.	Mapa de resultados.....	93
Figura A2.21.	Ingreso al módulo	94
Figura A2.22.	Interfaz Principal	95
Figura A2.23.	Ingreso de Captaciones	96
Figura A2.24.	Interfaz para el ingreso de Vertimientos	96
Figura A2.25.	Interfaz para la configuración del sistema.....	97
Figura A2.26.	Mapa de Resultados	98

LISTA DE TABLAS

Tabla A2.1.	Parámetros más sensibles que afectan los valores del modelo SWAT	6
Tabla A2.2.	Tipos de datos que maneja el modelo ILLUDAS	21
Tabla A2.3.	Pruebas utilizadas para el análisis de homogeneidad	46
Tabla A2.4.	Convenciones.....	46
Tabla A2.5.	Pruebas de homogeneidad a nivel mensual de las estaciones de precipitación.....	47
Tabla A2.6.	Pruebas de homogeneidad a nivel anual de las estaciones de precipitación	48
Tabla A2.7.	Pruebas de homogeneidad a nivel mensual de las estaciones de caudal	49
Tabla A2.8.	Pruebas de homogeneidad a nivel anual de las estaciones de precipitación	49
Tabla A2.9.	Media y desviación típica (mm) de las precipitaciones medias mensuales de la cuenca del río Aburrá para los años El Niño, La Niña y No ENSO. Los años hidrológicos de consideraron de junio (0) a Mayo (+1).....	54
Tabla A2.10.	Cambio en la media.....	56
Tabla A2.11.	Cambio en la varianza	56
Tabla A2.12.	Tendencia en la media.....	57
Tabla A2.13.	Estaciones seleccionadas para la caracterización del ciclo diurno.....	61

A2. ANEXOS SUBSISTEMA ABIÓTICO – RECURSO AGUA

A2.1 REVISIÓN CRÍTICA DE MODELOS HIDROLÓGICOS URBANOS

A2.1.1 Introducción

Debido a las limitaciones en las técnicas de medición de fenómenos del mundo real, modelos de simulación de diferentes tipos proveen medios de extrapolación cuantitativa o predicción, que permiten simular estados de un sistema hidrológico real cuando no hay datos disponibles en el espacio o en el tiempo y conocer el impacto de futuros cambios hidrológicos, ayudando de este modo a los tomadores de decisión ambiental.

Un modelo hidrológico es una representación simplificada del sistema real cuyo objetivo es estudiar la operación del sistema y predecir su salida. Sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas con las salidas, las cuales pueden expresarse como función del tiempo. Estos modelos abarcan una gran diversidad de problemas y funcionalidades tales como modelado de ríos y cuencas, calidad de aguas, predicción de crecidas, riesgos hidrológicos, etc.

En este documento se sintetizan algunos de los modelos hidrológicos aplicables a escenarios urbanos, donde se analiza su viabilidad de aplicación en la Cuenca del río Aburrá donde las características espacial y de disponibilidad de la información hacen amigable o no la aplicación de algunos de ellos. Se describen las ecuaciones que involucran y la metodología y los alcances espacial y temporal de los datos a medir.

A2.1.2 Desarrollo de los modelos

Los modelos pueden clasificarse en empíricos, conceptuales y una combinación de ambos. Los modelos empíricos no toman en consideración los conceptos hidrológicos por lo que se limitan a ajustar ecuaciones matemáticas sin relación al sistema físico. Los modelos conceptuales se elaboran sobre la base de los conceptos hidrológicos para simular el comportamiento de una cuenca. Éstos últimos tienen generalmente dos

componentes: el primero, es un módulo de precipitación - escorrentía, que transforma los eventos de lluvia en escorrentía tomando en cuenta el balance de agua entre los distintos componentes hidrológicos como la interceptación, flujo superficial y subsuperficial e infiltración; y segundo, un módulo que modela el flujo en canales, quebradas, ríos, y demás cuerpos de agua.

Los modelos de lluvia – escorrentía pueden ser agregados o distribuidos, generalmente los modelos agregados no toman en consideración la variabilidad espacial de la lluvia, ni las variables de estado, ni los parámetros del modelo. Para cuencas pequeñas este tipo de modelo es muy útil debido a su estructura simple y al hecho de que es fácil actualizar sus parámetros y variables de estado. Los modelos distribuidos pueden estar divididos en subcuencas o en función de un conjunto de cuadrículas. La ventaja de estos modelos radica en que toman en cuenta la variabilidad espacial de las características físicas y la precipitación dentro de la cuenca. Por otro lado, es mucho más complejo actualizar los parámetros y variables de estado en estos modelos.

A2.1.3 Modelos hidrológicos distribuidos

Gracias a una serie de desarrollos en diversas disciplinas, existen modelos que, aunque más complejos que los modelos ARMA, simulan las variables actuales desde el punto de vista físico. Los modelos ARMA tienen la ventaja que es muy fácil calcular intervalos de confianza para las predicciones. Dado un cierto nivel de probabilidad, como ser el 95%, se puede brindar el rango de variación esperado para el registro futuro del caudal. Además, los modelos ARMA son muy fáciles de calibrar y pueden ser rápidamente actualizados a medida que se dispone de nuevos datos observados.

En particular, un tipo de modelos que están disponibles para su uso son los modelos hidrológicos distribuidos. El gran desarrollo computacional, tanto en software como hardware, hacen posible la calibración y uso de modelos hidrológicos complejos.

En un modelo distribuido, la cuenca de drenaje se subdivide típicamente en elementos de área; cada elemento de área se clasifica en una o más clases, siendo el número de tipos de vegetación una opción que define el usuario (Collischonn, 2001; Collischonn y Tucci, 2001). La precipitación diaria en cada elemento de área es estimada por medio de la interpolación entre los registros pluviométricos disponibles en la cuenca, o fuera de ella. La calibración de dichos modelos puede hacerse con un criterio de ajuste de la forma de una función multi-objetivo, la cual es minimizada mediante el uso de un algoritmo “genético” (Sorooshian et al., 1993; Gupta et al., 1998; Boyle et al., 2000; Collischonn, 2001).

Los modelos distribuidos comprenden la precipitación, su magnitud, duración y variabilidad espacial. En el caso de cuencas con tiempos de concentración o respuesta largos, el uso de los datos observados de precipitación claramente resultará en pronósticos más acertados que aquellos de modelos estadísticos que no usan dicha información, en el supuesto que los modelos distribuidos hayan sido calibrados adecuadamente. Sin embargo, en cuencas con corto tiempo de concentración (en el orden de días) la estimación de la evolución temporal de la lluvia basada en pronósticos meteorológicos se vuelve crítica.

Los modelos distribuidos requieren la especificación de las condiciones de borde, las cuales son generalmente obtenidas mediante sensores remotos (tipo de vegetación y su condición actual) o por análisis in situ de las características físicas del suelo a diversas profundidades.

El uso de sistemas distribuidos surge de la necesidad de estimar el caudal inicial para diversos puntos de la red de drenaje. Se debe considerar las variaciones de la urbanización y las variaciones entre los diferentes escenarios de desarrollo urbano que se estiman para el futuro. Varios estudios han mostrado como las características de la precipitación dentro de una zona urbana varían considerablemente en distancias cortas (Silveira, 1997). La escasez, o aún ausencia de pluviómetros en una ciudad puede resultar, por tanto, en grandes errores en la tormenta de diseño y en consecuencia en todos los otros aspectos del diseño del sistema drenaje urbano. Estos errores afectan a la población, ya sea porque el sistema de drenaje de tormentas no funciona adecuadamente o porque está sobredimensionado, y a menudo por ambas razones a la vez. Allasia (2002) mostró como el costo de recolectar datos en una zona urbana no es esencialmente alto, es despreciable comparado con el costo que resulta del sobredimensionamiento o daño por falla del sistema a causa de una insuficiencia en la cantidad y calidad de las observaciones y/o medición.

Existen actualmente modelos hidrológicos que son usados para el análisis de sistemas de drenaje urbano y la calidad del agua. El desarrollo de este tipo de modelos es dinámico, lo que hace que continuamente aparezcan nuevas opciones y se actualicen versiones anteriores. El estado del arte y la revisión crítica pretende entender las características propias de las variables y el significado en el desarrollo de los modelos hidrológicos existentes con el fin de encontrar cuales de ellos pueden tener aplicabilidad para estudios de las cuencas urbanas que conforman la Cuenca del río Aburrá.

Se han seleccionado para la revisión crítica algunos modelos teniendo en cuenta fundamentalmente su disponibilidad, su facilidad de operación frente a situaciones prácticas y la amplia utilización en su empleo. Estos modelos se emplean en situaciones específicas para resolver preguntas sobre cómo funciona un sistema hídrico en

condiciones actuales, es decir, establecer las causas de los problemas que pueden existir, y de cómo se puede modificar el sistema actual para mejorar su operación. Esto significa estimar el efecto que generan las obras y acciones antrópicas sobre las variables hidrológicas que alteran la dinámica hídrica de un sistema urbano.

Existen diferentes tipos de modelos hidrológicos cuyas características difieren en el tipo de información, objetivo y tipo de resultado que se desea obtener. En general para el drenaje urbano existen dos tipos de modelos: 1) De operación temporal continua, es decir que representan de manera ininterrumpida períodos de tiempo relativamente largos, reproduciendo lo que ocurre durante las tormentas y entre ellas. Estos son relativamente complejos y requieren de una gran cantidad de información y se orientan al manejo de recursos. 2) Modelos orientados a los eventos de interés, tales como las tormentas o las crecidas. Reproducen condiciones parciales y requieren menos información, pero pueden ser más que suficientes para cortos períodos de tiempo.

Con base en las consideraciones sobre los diversos tipos de modelos y sus aplicaciones, se presenta en este documento una revisión de los modelos hidrológicos urbanos que estiman el comportamiento de las cuencas urbanizadas ante eventos extremos de lluvia, sus campos de aplicación analizando las características que debe tener la cuenca, su disponibilidad y uso en el medio en cuencas con la topología similar a las cuencas del Valle de Aburra.

A2.1.4 Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

El modelo SWAT es un programa de modelación hidrológica diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas. Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos a largo plazo en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes.

El SWAT es un modelo determinístico de simulación continua y de eventos diarios, que analiza los impactos a largo plazo, esto es, que considera períodos de simulación de 10, 15, 50 y 100 años. La cantidad de escorrentía es estimada aplicando la metodología del número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, con datos de lluvia diarios. Esta ecuación se fundamenta en que la escorrentía esta determinada por el suelo, la cobertura de suelo y la práctica de manejo que en este se realice. El agua que se infiltra puede tomar diversos caminos generando incrementar la humedad del suelo en la zona radical, moverse subsuperficialmente como flujo lateral hacia los canales de drenaje, recargar acuíferos poco profundos, donde el flujo también llegará hasta los canales de drenaje y recargar acuíferos profundos.

Está basado en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. Para el modelamiento, la cuenca hidrográfica se divide en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos. Adicionalmente el modelo trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU) obtenidas del cruce de los diferentes tipos de suelo con las coberturas existentes en la cuenca.

La hidrología del modelo se basa en el criterio de que el agua entra, sale y se almacena como lo describe la ecuación:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

Donde

SWt = Contenido de agua en el suelo durante un tiempo específico (mm).

t = Tiempo (en días)

R = Cantidad diaria de precipitación (mm)

Q = Cantidad diaria de escurrimiento (mm)

ET = Cantidad diaria de evapotranspiración (mm)

P = Cantidad diaria de flujo subterráneo (mm)

El modelo SWAT ofrece tres métodos para la estimación de la evapotranspiración potencial: Penman-Monteith, Hargreaves and Sammami y Priestley – Taylor. Las variables climáticas utilizadas por el modelo son la precipitación diaria, la temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Si la precipitación y la temperatura diaria están disponibles deben ser ingresadas directamente al modelo, sino, el generador de variables climáticas puede simular la temperatura y precipitación diaria.

El modelo está basado en principios físicos, es decir, en lugar de utilizar ecuaciones regresivas para describir la relación entre las variables de entrada y de salida, utiliza datos específicos acerca del clima, propiedades físicas del suelo, topografía, vegetación, y prácticas de manejo del suelo, que se consideran en la cuenca. En la Tabla A2.1 se muestran los parámetros más sensibles del modelo SWAT de acuerdo a su significado, grado de sensibilidad y parámetro de salida que modifica.

Tabla A2.1. Parámetros más sensibles que afectan los valores del modelo SWAT

PARÁMETRO MODIFICADO	SIGNIFICADO	GRADO SENSIBILIDAD	PARÁMETRO DE SALIDA QUE MODIFICA
CN ₂	Curva numérica en la subcuenca	Alto	Escorrentía superficial
			Escorrentía Subsuperficial
			Flujo Temporal
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible	Alto	Escorrentía superficial
ESCO	Factor compensación evaporación del suelo		
GW_REVAP	Coefficiente "revap" del agua subterránea	Medio	Flujo base
GWQMN	Profundidad umbral del agua en el acuífero		
USLE_P	Factor prácticas de labranza sobre el suelo		
SLSUBBSN	Longitud de la pendiente		
SLOPE	Pendiente de las URH	Alto	Producción sedimentos
USLE_C	Factor del manejo del cultivo		
CH_EROD	Erosionabilidad del cauce	Medio	Degradación y deposición en el cauce
CH_COV	Factor de cobertura del cauce		

Para la introducción de los datos y un adecuado procedimiento en el manejo del modelo, se consideran los requerimientos de la interfase ArcGIS, (ver Figura A2.1) para una cuenca en estudio, previamente procesada.

A2.1.5 Modelo SWMM (Storm Water Management Model)

El modelo SWMM fue el primer programa de simulación de redes de alcantarillado, desarrollado entre 1969 y 1971 por tres grupos, Metcalf and Hedí, Inc., la Universidad de Florida y el Water Resources Engineers, estableciéndose como el modelo más utilizado a escala mundial para el análisis hidrológico, hidráulico y de calidad de aguas en las redes de alcantarillado.

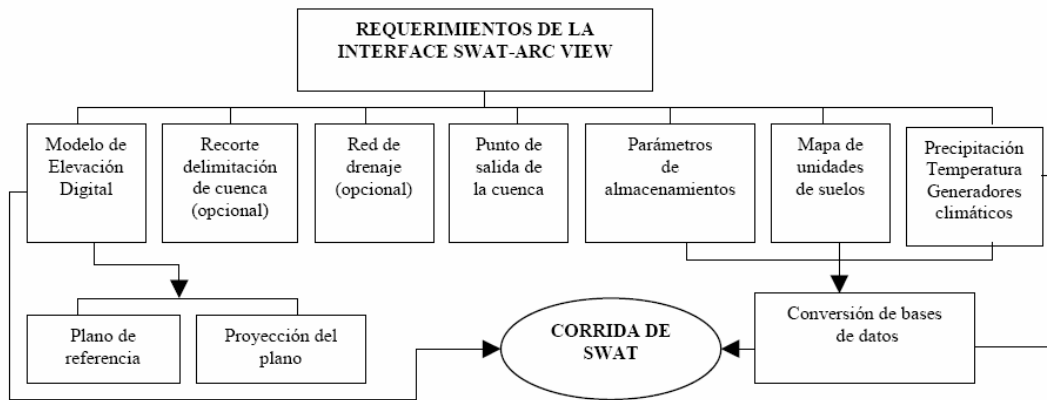


Figura A2.1. Metodología de control de entrada de la interfase SWAT-ArcGIS
 Fuente: Torres, et al., 2001.

El modelo funcionaba con lenguaje Fortran hasta el año 2004, fecha en la que se crea la versión 5 del mismo (Rossman, 2004), donde se ofrece una interfase gráfica que opera en Windows, con un entorno mucho más amigable que el anterior y manejado por la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos. Lo más importante, es que su distribución es gratuita y se puede descargar directamente desde la página: www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/index.htm. Su capacidad de cálculo y su libre acceso lo han convertido en el modelo más utilizado en todo el mundo para simular los procesos hidrológicos, hidráulicos y de calidad de aguas en el medio urbano.

Este modelo simula eventos reales de lluvia partiendo de los hietogramas y datos meteorológicos, así como la caracterización del sistema de conducciones y almacenamiento, generando resultados en términos de cantidad y calidad de agua. El modelo permite analizar el comportamiento del flujo de escorrentía a partir de los hietogramas de lluvias reales y de las características hidrológicas del sistema de drenaje, con el objeto de predecir el comportamiento cuantitativo en distintos puntos de la red. De este modo, la determinación de problemas de escorrentía urbana que se dan en los colectores y redes de alcantarillado y la estimación de la efectividad de los procesos de disminución de dichos problemas pueden ser bien representados por medio de este programa. Los procesos que simula son la generación de escorrentía superficial, es decir, la transformación de las lluvias en caudales de entrada a la red de drenaje, y una vez dentro de la red, también el transporte de dichos caudales a lo largo de la red hasta llegar al punto de salida de la cuenca. Se simulan, por tanto, dos escenarios: el de superficie y el de conducciones.

El modelo divide la subcuenca en un área permeable, otra impermeable con retención superficial y una última área impermeable sin retención, en función de los porcentajes de impermeabilidad y retención en cada zona introducida por el usuario. La escorrentía es

generada aproximando el funcionamiento de cada una de estas zonas a un depósito no lineal. La ecuación 1, es utilizada para calcular el caudal de salida de la red.

$$Q = \frac{W}{n} (h - d)^{5/3} I_o^{1/2}$$

Donde

Q, es el caudal de salida de la subcuenca

W, es el ancho de la subcuenca

n, es el coeficiente de rugosidad de Manning,

h, es la profundidad del agua

d, es la profundidad de retención superficial

I_o, es la pendiente de la cuenca.

El modelo SWMM admite los datos de la lluvia en diversos formatos; en función de la disponibilidad de los mismos, ya sea como intensidad, volumen o volumen acumulado. La forma habitual en el modelo es asignar los datos de lluvia a uno o varios pluviómetros, en función de la distribución espacial de la lluvia.

También se pueden hacer simulaciones para un intervalo de tiempo largo, de incluso años, por lo que es posible introducir datos sobre climatología que, en un análisis para un episodio de lluvia corto se desprecian habitualmente. En cuanto a la generación de contaminantes, el modelo posee una opción para definir todos los tipos que se quieran simular, tanto para los presentes en la lluvia, como los que se arrastrarán de la superficie con la lluvia y cargas puntuales de industrias. La opción de definir usos del suelo permite hacer un reparto espacial de los contaminantes en función de las actividades que se desarrollan en el entorno de la cuenca, por lo que el modelo tiene una gran capacidad para modelar la distribución espacial de contaminantes.

En la fase de transformación lluvia-escorrentía se simulan los fenómenos de generación de escorrentía para calcular los hidrogramas de entrada a la red. Para este alcance, la zona de estudio se debe dividir en subcuencas, que vierten los caudales a la red de alcantarillado. Para la generación de la escorrentía en cada subcuenca, el modelo conceptualiza la subcuenca en depósitos no lineales situados en un plano inclinado con

una forma rectangular, produciéndose cuando la precipitación supera el valor de retención inicial y la infiltración. Los parámetros principales para cada subcuenca son:

- Área total de la subcuenca
- Ancho de la subcuenca que permite ajustar el tiempo de concentración de la misma, ya que para un valor de área dado, un mayor ancho significará un menor recorrido del flujo y viceversa.
- Coeficiente de rugosidad que dependerá del tipo de superficie
- Retención inicial o cantidad de agua que queda retenida en superficie tanto por las pequeñas depresiones, como por la intercepción.
- Pendiente media de la subcuenca que indicará la rapidez con la que se mueve el agua hacia la entrada a la red.
- Infiltración que se puede escoger entre tres modelos de simulación de la infiltración, el método de Horton, el Green-Ampt o el del SCS. Los parámetros de cada método dependerán del tipo de suelo.

Cada subcuenca se divide en una zona permeable y otra impermeable, con el objetivo de poder reproducir con mayor fiabilidad los procesos hidrológicos implicados.

En la fase de transporte del flujo por la red de alcantarillado, el modelo puede utilizar tres tipos de solución a las ecuaciones de Saint-Venant, en función de la exactitud a la que se quiera llegar en la solución y a la complejidad del sistema. Si estamos hablando de una red de alcantarillado compleja, como son las de la mayoría de ciudades, el modelo se deberá ejecutar con el esquema de Onda Dinámica, que resuelve las ecuaciones de forma completa. Para simular el transporte a lo largo de la red, se hace una esquematización de la red en nodos y conductos, logrando incluir una serie de elementos singulares como orificios y vertederos. Las ecuaciones se resuelven de forma conjunta y secuencial para determinar el flujo en cada conducto y la profundidad en cada nodo para un intervalo de tiempo que especifica el usuario, utilizando un esquema de diferencias finitas explícito.

Para la calibración del sistema, el modelo ofrece la posibilidad de introducir archivos con medidas de campo que pueden compararse con los resultados en los gráficos de evolución temporal. El modelo permite introducir datos sobre:

- Escorrentía sobre la cuenca

- Arrastre de contaminantes
- Nivel de agua en un punto
- Caudal que entra por un punto
- Calidad del agua en un punto
- Caudal en un tramo o conducto

Se puede concluir que este modelo involucra parámetros que hacen parte de la dinámica de los eventos de lluvia como de respuesta. A la vez considera la geometría de la red de drenaje haciéndolo apto para la aplicación en cuencas urbanas. Su aplicación no tiene límites en variables físicas lo que garantiza adecuadas aplicaciones a varios tipos de cuencas.

A2.1.6 Modelo MOUSE

Este modelo fue creado por Danish Hydraulic Institute, 1988 significa la modelación para la red de drenaje de un sistema urbano y es apto únicamente para entornos urbanos. Ha sido utilizado en diversas cuencas urbanas de Australia tanto para diseño como para evaluación de tormentas. La parte hidrológica del modelo trata la simulación de escorrentía usando dos métodos: uno simple basado en el diagrama de área – tiempo y un método complejo que se basa en la ecuación de onda cinemática y ecuación de continuidad. La parte hidráulica del modelo simula el flujo en conductos cerrados o canales abiertos.

El modelo MOUSE es un sistema avanzado, potente y completo de modelamiento de escorrentía superficial, flujo en canales abiertos, flujo en tuberías, calidad del agua y transporte de sedimentos para sistemas de drenaje urbano y sistemas de colectores de agua de lluvia y sanitarios (DHI, 2002).

Igual que con el modelo SWMM, el modelo MOUSE admite la introducción de los datos de lluvia mediante series temporales de datos, asignadas espacialmente en función de su disponibilidad. Para simulaciones a largo plazo, dispone de un módulo llamado MOUSE Rainfall Dependent Infiltration que proporciona un soporte para modelar todos los componentes de la fase hidrológica diferenciando cuatro tipos diferentes de almacenamiento, nieve, superficie, zona subsuperficial y agua subterránea, teniendo en cuenta para ello la temperatura y la evapotranspiración de la zona.

Para simular la generación de contaminantes, utiliza el módulo MOUSE Surface Runoff Quality, que permite simular los procesos de acumulación y eliminación durante el primer lavado, su transporte en superficie y la acumulación y eliminación mediante lavado de contaminantes disueltos en depresiones y depósitos o cámaras de amortiguación.

El módulo MOUSE Surface Runoff incluye cuatro tipos de cálculo de la escorrentía superficial:

- Método tiempo-área
- Onda cinemática o embalse no lineal, que es el utilizado por el modelo SWMM
- Método del embalse lineal
- Método del Hidrograma Unitario

La selección de un método u otro dependerá de la disponibilidad de los datos. Ésta variedad permite escoger un modelo u otro dependiendo de los datos de las cuencas. Igual que en SWMM, los hidrogramas calculados se utilizan como entrada a la red de conductos.

La simulación del transporte de flujo a través de la red de alcantarillado se realiza con el módulo MOUSE Pipe Flow, que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant de varias formas y contemplando la resolución completa utilizando una solución numérica implícita en diferencias finitas. Para ello, se debe definir la estructura de la red, esto es, introducir los datos de los nodos, conducciones, aliviaderos, orificios, estructuras de almacenamiento, etc. La integración con un sistema de información geográfico SIG, se hace mediante MOUSE GM, basado en el software Arc View. Con éste módulo es posible acceder a múltiples aplicaciones propias de los SIG desde el mismo modelo, facilitando la tediosa introducción de datos.

El modelo MOUSE dispone de un módulo para incluir elementos de control en tiempo real, siendo capaz de incluir una completa información sobre las reglas de control de cada elemento, e incluso funciones de evaluación lógica del estado del sistema para ayudar en la toma de decisiones.

La simulación del transporte de contaminantes tiene un lugar destacado dentro del esquema de funcionamiento del modelo. Tiene tres módulos diferentes para simular los procesos relacionados con la calidad del agua.

Con el módulo Pipe Sediment Transport, es posible reproducir el movimiento de los sedimentos en la red de alcantarillado, permitiendo la predicción de las zonas en las que es previsible que se produzcan depósitos de sedimentos y contaminantes. El módulo Pipe Advection-Dispersion simula el transporte de sustancias disueltas y de sedimentos finos en suspensión en el flujo utilizando un esquema implícito de diferencias finitas. Con el módulo Pipe Water Quality, es posible describir los procesos de degradación de la materia orgánica, la variación de bacterias, el intercambio de oxígeno con la atmósfera y la demanda de oxígeno de los sedimentos erosionados que haya en los colectores.

Para la presentación de resultados, utiliza una herramienta específica llamada MIKE View, que permite un control total por parte del usuario para la realización de análisis hidrológicos e hidráulicos mediante presentaciones e interpretaciones de los resultados. Los resultados se pueden visualizar con gráficos, perfiles, series temporales, tablas, pudiendo trabajar con cualquiera de éstos. Se pueden realizar mapas de zonas inundables, importar archivos gráficos y exportar los resultados para analizarlos con otros programas como hojas de cálculo.

Para la calibración, el modelo dispone de una utilidad de calibración automática para efectos prácticos al modelador en la tarea de prueba error para ajustar el modelo. El algoritmo utilizado para la calibración automática es del algoritmo de evolución compleja de shuffled (SCE). La forma que tiene de trabajar el modelo MOUSE para calibrar el sistema se puede esquematizar de la siguiente manera (ver Figura A2.2).

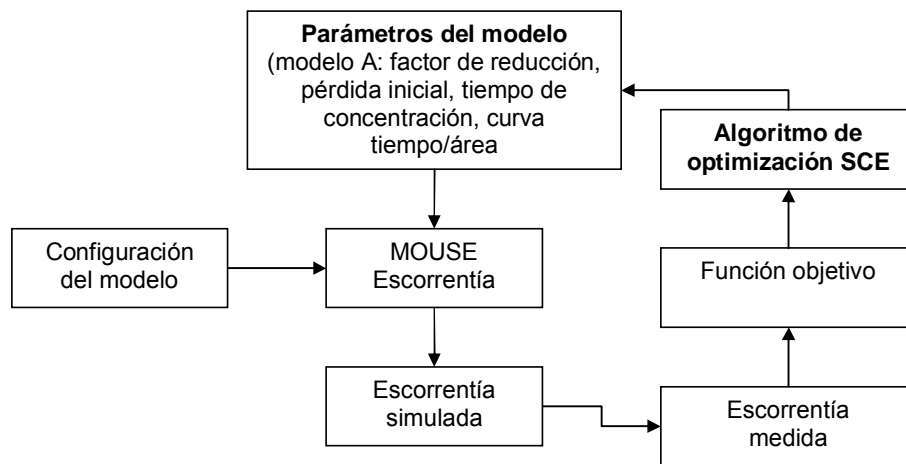


Figura A2.2. Esquema de la calibración del modelo MOUSE

Fuente: www.dhi-es.com, 2007.

El modelo MOUSE es un programa de modelación de sistemas de drenaje urbano potente y con mejores herramientas de diagnóstico que existen hoy en día con algunas ventajas con respecto al modelo SWMM, para que al momento de tomar una decisión sobre el modelo que se debe adoptar, el modelador tenga elementos suficientes para juzgar si es

necesario desembolsar el costo que requiere la licencia de MOUSE, o, si por el contrario, para simular el comportamiento del sistema es suficiente utilizar el modelo de difusión gratuita SWMM. Para entender las diferencias entre ambos modelos se hace un análisis comparativo de las ventajas y desventajas que tienen enfocándonos en las funciones similares que tienen ambos modelos.

Como característica inicial se analiza la comprobación de errores; el modelo MOUSE ofrece una herramienta de comprobación de los posibles errores que se deriven de la introducción de los datos de la red mientras que el SWMM no la ofrece.

Para la calibración del sistema, a diferencia de SWMM, el modelo MOUSE tiene una herramienta de autocalibración del sistema a partir de datos de medición reales, que ahorra mucho tiempo en la operación.

En sistemas de información SIG, se destaca el modelo MOUSE debido a que es la herramienta que comparativamente hace más rentable la utilización de MOUSE. El modelo ofrece una interfaz de comunicación directa con el SIG Arc View, que permite la importación y exportación de datos de la estructura de la red que puede ahorrar mucho tiempo en la configuración del sistema.

A la hora de decidir cual modelo utilizar, se deben exigir una serie de condiciones al modelo para que reproduzca lo más fielmente posible la realidad de un entorno urbano, según Dolz y Gómez (1994):

- Capacidad para incorporar todas las singularidades geométricas de la red.
- Capacidad para simular correctamente los diferentes fenómenos hidráulicos presentes en el movimiento no permanente del agua a lo largo de los colectores y los nudos.
- Capacidad para establecer un cómodo y ágil diálogo con el ordenador que permita introducir en el modelo las características de la red y las hipótesis de cálculo, así como una fácil interpretación de los resultados.

A2.1.7 Modelo TURIA (basado en la aplicación en el río Turia, España)

Este modelo esta estructurado de acuerdo al tipo de cuenca, esto es, si la cuenca es urbana o rural. El modelo acepta en primer lugar los datos en dos grupos. Uno corresponde al colector, que recibe los datos físicos del sistema y su desagregación en subcuencas. El segundo, corresponde a los datos del pluviograma cuya respuesta se desea obtener. Para cada pluviograma se descompone su totalidad en intervalos de 10

minutos que se toma como tiempo base para el estudio de la escorrentía en el terreno y en la red de colectores. Para un entorno urbano se consideran dos fases, un ramal principal y otro subramal. Puesto que en las cuencas urbanas el tiempo de concentración de un ramal es muy corto, se considera que el estado es estacionario. La infiltración se calcula mediante la ecuación de Horton:

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-at}$$

Donde

fo: Capacidad de infiltración inicial ó máxima (mm/min)

fb: Capacidad de infiltración básica ó mínima. (mm/min)

a: Constante de decaimiento.

t: Tiempo desde el inicio. (min)

El caudal afluente de un ramal se calcula:

$$Q_a = L_r \frac{1}{n} (D_t - D_0)^{3/2} I^{1/2}$$

Donde:

I: Infiltración en (mm/h)

L: Longitud del tramo (m)

n: Coeficiente de rugosidad

Es decir, mediante la formula de Manning con flujo uniforme e igual al caudal a desaguar. La profundidad restante se estima mediante la ecuación:

$$D_{t+At} = D_t - \frac{Q_a \Delta t}{A_r}$$

Siendo Qa el caudal del tramo en (m3/s), y Ar el área en [m2] de drenaje de un ramal tipo. Así se preserva la continuidad de la masa de agua. Las curvas características de infiltración se han tomado de Tholin y Keifer clasificando las subcuencas en tres tipos:

rural, suburbana y plenamente urbanizada. El valor de D0 [m] se ha tomando así mismo de Tholin y Feifer.

La escorrentía en un tramo típico se obtiene dado la profundidad en régimen permanente, calculando Y que satisface la ecuación:

$$Q - Q(\bar{Y}) = \frac{dS}{dT} = \frac{S(Y_i) - S(Y_0)}{\Delta t}$$

Y tomando $Y = (Y_0 + Y_1)/2$ es decir, el promedio de la profundidad inicial y profundidad final. Conocido Y0 se obtiene Y1 resolviendo numéricamente esta ecuación por el método de Newton-Raphson. Este se debe a que se considera como sección típica un ramal de sección circular al tratarse de una red de colectores. Y1 es el valor de Y0 utilizado en el siguiente intervalo de pluviograma. Q(Y) es el caudal desaguado a la red principal. Si se produce el llenado del ramal, se corrige el nivel retenido superficialmente a fin de preservar la continuidad en los ramales. El caudal afluente en (m3/s) a la red principal, se obtiene como:

$Q = Q(Y)A_s/A_i$ la relación del área de la subcuenca al área del tramo tipo.

En una subcuenca rural el flujo se desarrolla en lámina libre hasta la red principal. En este caso se asume la cuenca como un plano inclinado de pendiente constante y rugosidad dada. Aguas abajo se sitúa el cauce receptor. La idealización se refleja en la Figura A2.3 según la intensidad de la lluvia se alcanza un estado estacionario en el perfil, con mayor o menor rapidez.

El tiempo de equilibrio y el caudal evacuado por unidad de longitud transversal de plano inclinado, se calculan mediante las ecuaciones de onda cinemática como sugieren Overton y Meadows:

$$t_c = \left(\frac{an}{\sqrt{l}} \right)^{3/5} r^{-2/5} \quad q = (\Delta tr)^{5/3} \frac{\sqrt{l}}{n} \quad \text{Donde:}$$

r : distancia inclinada al tramo de interés en (m)

l: longitud transversal de plano inclinado (m)

a: longitud proyectada del plano inclinado (m)

n: coeficiente de rugosidad

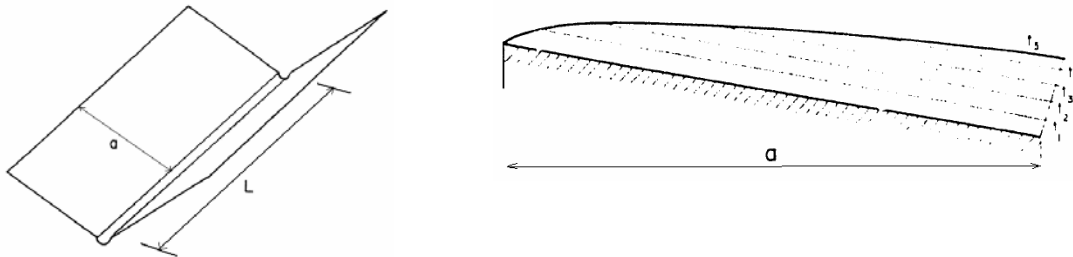


Figura A2.3. Idealización de la cuenca como un plano inclinado
Fuente: Marco, et al., 1983.

Si $t_c < \Delta t$ no se llega a alcanzar el equilibrio. El caudal en tal caso se calcula: $q = r a$

En ambos casos, se promedia el volumen de agua y se acumula para el intervalo del pluviograma siguiente.

El caudal respecto a la red principal, se calcula:

$$Q_{rp} = q (A_s/a)$$

Siendo “a” la longitud media del plano inclinado, [m] medida desde el cauce hasta la divisoria de aguas. De este modo el modelo puede integrar cuencas rurales y urbanas.

A2.1.8 Modelo SHETRAN

SHETRAN, es un modelo de base física espacialmente distribuido, que tiene como objetivo el proceso de medición, ya que utiliza leyes físicas universales. Es un sistema de modelación integrado superficial y subsuperficial, que incorpora los procesos hidrológicos del movimiento del agua (intercepción, evapotranspiración, escorrentía en canales, superficial y subsuperficial del agua) y transporte de sedimentos.

La distribución espacial de las propiedades de la cuenca, la incorporación de datos y la respuesta del sistema, se representa en una red de diferencias finitas. Los datos requeridos por este modelo comprenden:

- Datos meteorológicos (precipitación, temperatura, humedad, evaporación).
- Datos de validación de variables (caudales y registro de producción de sedimentos)
- Datos de las propiedades que caracterizan una cuenca en particular (suelos, vegetación, topografía y características de los sedimentos).

Estos datos pueden estar basados en medidas directas o ser estimados a partir de bibliografía; se pueden referir a condiciones actuales de las cuencas hidrográficas o a distintos escenarios.

El modelo SHETRAN, proporciona una descripción detallada en el tiempo y en el espacio de flujos y transportes en la cuenca permitiendo evaluar el efecto de la utilización de diferentes estrategias forestales y/o manejo de cuencas, de tal forma que se pueda simular diferentes escenarios antes de su implementación en terreno. Al mismo tiempo permite la predicción de impactos antes las potenciales inversiones de protección ambiental. La Figura A2.4 muestra las variables que involucra el modelo.

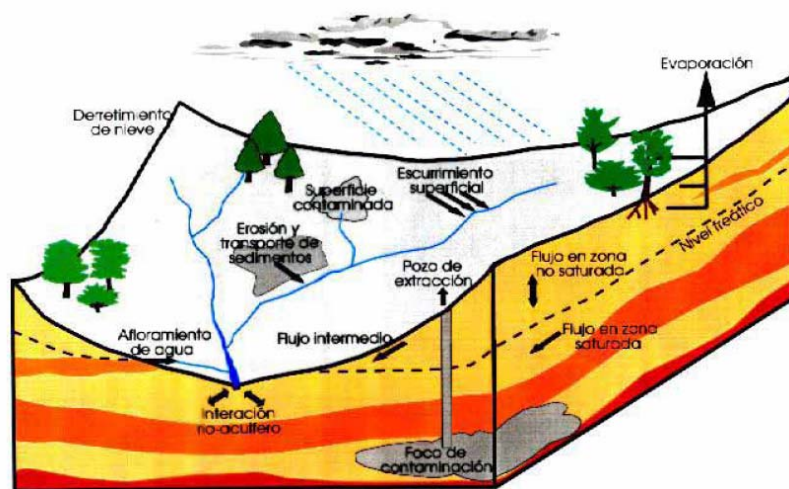


Figura A2.4. Componentes del Modelo SHETRAN
Fuente: Villareal, 2001.

■ **Componentes del modelo**

- Componentes base de la cuenca: se incorporan todos los parámetros de caracterización de la cuenca hidrográfica (altitud, vegetación y suelos).
- Componentes de Intercepción y Evapotranspiración: emplea la información meteorológica para simular la evapotranspiración total y la lluvia neta resultante de éste proceso. Para el cálculo de la intercepción, se utiliza el modelo modificado de Rutter. Mientras, para la evapotranspiración se utiliza la ecuación de Penman-Monteith.
- Esgurrimiento superficial (ES) y Esgurrimiento en canales (OCD): utiliza las ecuaciones de Saint-Venant.

- Componentes de la zona saturada (SDZ): para la determinación del volumen de agua se utiliza la ecuación de Boussinesq, que combina la Ley de Darcy y la ecuación de conservación de masas. Este módulo, calcula: Niveles de superficie freática para un acuífero singular no confinado. Volumen de flujo lateral en la zona saturada.
- Componentes de la zona no saturada (UZD): Determina la humedad del suelo. Utiliza la ecuación de Richards, (1931).

▪ **Datos de salida del modelo**

El modelo SHETRAN, entrega alrededor de 30 variables de salida las cuales se concentran la determinación del flujo de escorrentía:

- Lámina precipitada (mm/h)
- Evaporación potencial (mm/h)
- Evaporación real (mm/h)
- Evaporación desde la superficie del suelo (mm/h)
- Evaporación desde la intercepción almacenada (mm/h)
- Drenaje desde la intercepción almacenada (mm/h)
- Infiltración (mm/h)
- Tasa de intercambio de almacenamiento de la zona no saturada (mm/h)
- Profundidad del nivel freático bajo la superficie (m)
- Flujo de la zona saturada (m³/s)
- Escorrentía superficial (m³/s)
- Profundidad flujo superficial (m)
- Intercambio de flujo entre el canal y acuífero (m³/s)
- Tasa de Intercambio de flujo entre el canal y acuífero (m³/s)

- Intercambio de flujo entre la zona la zona no saturada y el canal (m^3/s)
- Contenido de agua de la zona no saturada (m^3)

El modelo tiene la ventaja de globalizar las variables que se dan en cualquier sistema hídrico de una cuenca. Se puede observar que considera detalladamente información física y climatológica dentro de los datos de entrada. Evalúa la respuesta de la cuenca también de forma detallada al involucrar la infiltración y el comportamiento del flujo en la zona saturada y no saturada.

Al tener un número elevado de variables a incorporar, hacen que este modelo SHETRAN tenga limitaciones de aplicación debido al nivel de información que requiere en la parte subterránea. Desde la perspectiva de aplicación de éste modelo a entornos como los de la Cuenca del río Aburrá se debe analizar detalladamente si existe la medición de algunas variables importantes. Sabemos que la información de niveles freáticos es casi nula y no hay registros de medición en campo.

A2.1.9 Modelo ILLUDAS (Illinois Urban Drainage Area Simulator)

El modelo ILLUDAS evolucionó a partir de un modelo desarrollado por la British Road Research Laboratory (Watkins 1962; Stall y Terstriep, 1972). Este modelo, emplea el método del área - tiempo para generar los hidrogramas desde áreas permeables e impermeables directamente conectadas a un sistema. Para las zonas permeables se emplea la ecuación de infiltración de Horton basado en una clasificación de suelos según SCS (Soil Conservation Service). Tiene características particulares que hacen del modelo uno de los de mayor aplicabilidad en entornos urbano, se destaca el hecho de incluir una subrutina para dimensionar conductos de insuficiente capacidad hidráulica y simplicidad de uso. Si bien los aspectos de calidad no son abordados, en las versiones típicas se le han incorporado para algunos usos (Noel y Terstriep, 1982)

Para aplicaciones con este modelo, inicialmente se divide la zona de estudio en subcuencas y luego se definen algunos parámetros para cada una de ellas como son el área impermeable conectada a la red, la cual debe ser delineada; y el área permeable o natural de la subcuenca. Posteriormente se estiman los tiempos del viaje de los puntos más lejanos tanto de la zona impermeable como de la permeable al sistema de drenaje. Finalmente, se caracteriza el tipo suelo de la subcuenca y las dimensiones de la red pluvial. La escorrentía en este modelo se divide en dos partes: la generada para el área impermeable y la generada en el área permeable.

El cálculo para el área impermeable inicia con los datos de lluvia. Los incrementos de tiempo de lluvia se aplican al área directamente conectada al sistema para obtener así la tasa de escorrentía. Después de que la tasa de escorrentía haya sido obtenida, se determina el tiempo de viaje requerido para cada incremento de escorrentía aguas abajo de la subcuenca. Con la ecuación de Manning se calcula la velocidad del flujo en los canales. Después, se estiman para varios puntos en la subcuenca. De esta manera, un gráfico de área -tiempo permite mostrar la cantidad de área pavimentada dentro de la subcuenca que contribuye pérdidas al sistema de desagüe en el instante siguiente del inicio de la lluvia. Después de construir la curva de área - tiempo, se calcula la hidrógrafa de escorrentía de la subcuenca.

El programa puede calcular la escorrentía, el caudal pico y la capacidad hidráulica del sistema de drenaje urbano y consta de cuatro grupos de parámetros como datos de entrada los cuales se muestran el formato de los datos del modelo (Figura A2.5).

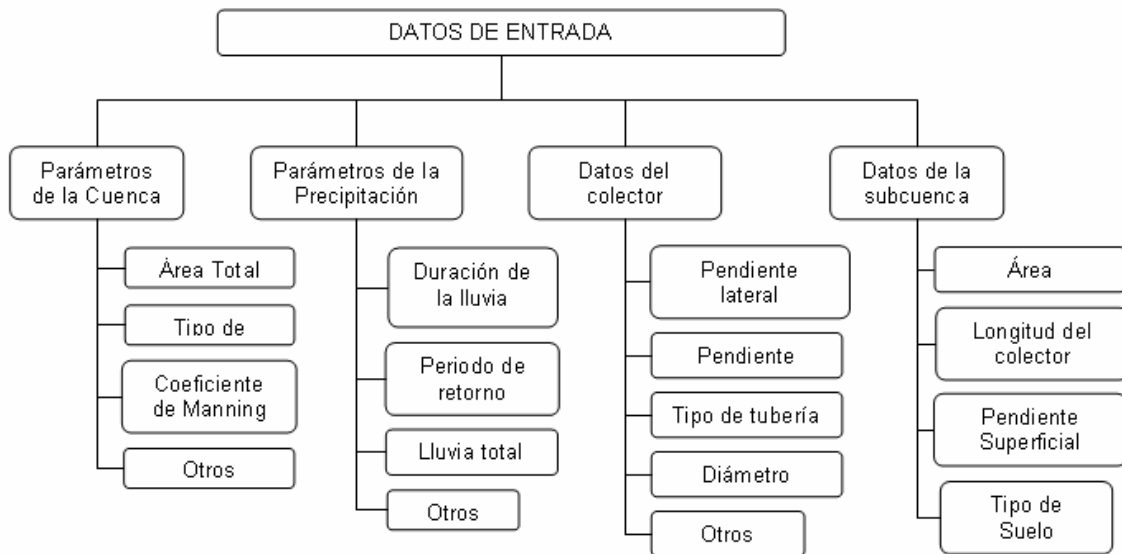


Figura A2.5. Formato de datos iniciales del modelo ILLUDAS
Fuente: Tae, 2004.

El modelo tiene la opción de involucrar los siguientes parámetros reportados en la Tabla A2.2. para los estudios de cuencas urbanas con características como las de la Cuenca del río Aburrá

Como se observa, los parámetros iniciales que involucra el modelo corresponden a datos básicos para cualquier estudio de cuencas y datos muy detallados de la red de colectores. Todas medidas en campo. Estudiando las características de estos parámetros con la disponibilidad de este tipo de información en las cuencas de nuestro entorno, podemos

concluir que el modelo ILLUDAS es aplicable para estudios de hidrología urbana en las cuencas urbanas de la Cuenca del río Aburrá.

Tabla A2.2. Tipos de datos que maneja el modelo ILLUDAS

PARÁMETROS BÁSICOS	DATOS DE LLUVIA	DATOS DEL COLECTOR	DATOS DE LAS SUBCUENCAS
<ul style="list-style-type: none"> - Área Total - Uso del suelo - Diámetro diseño - Coef. Manning - Pendiente media - Tipo urbanización 	<ul style="list-style-type: none"> - Lluvia - Lluvia en intervalo de tiempos. - Número Intervalos de lluvia. - Dt - Duración lluvia - Período retorno - Total Lluvia 	<ul style="list-style-type: none"> - Número tramos - Número secciones colectores - Tramo final - Tramos continuos - Coef. Manning - Diámetro - Altura colector - Ancho colector - Pendiente del colector - Tasa lluvia 	<ul style="list-style-type: none"> - Tramos colectores - Área subcuenca - Pendiente de Área impermeable - Área directa pavimentada. - Área pavimentada - Longitud colector - Pend. Zona natural - Zona natural de escorrentía.

A2.1.10 Modelo STORM

El modelo STORM, (que analiza el almacenamiento, tratamiento y modelo de la escorrentía) incorporó por primera vez el empleo de la simulación continua en hidrología urbana financiado por el Hydrologic Engineering Center (HEC); (Roesner et al., 1974). Una de sus primeras aplicaciones fue el desarrollo del plan maestro de la ciudad de San Francisco – California, EEUU, para la disminución de la contaminación del sistema colector combinado. El hecho de disponer del soporte por parte del HEC ayudó a que este programa fuera ampliamente usado para propósitos de planificación, especialmente para la evaluación y decisión entre sistemas con almacenamiento o tratamiento como elementos de control de la contaminación de sistemas unificados de aguas lluvias y servidas. El análisis estadístico de las series cronológicas de escurrimiento y de calidad resultante permite la optimización de los elementos de control. Si bien originalmente fue desarrollado para la evaluación de aspectos de calidad en sistemas combinados el modelo es igualmente útil para evaluar la efectividad de elementos de detención en la reducción de caudales máximos en cuencas de tamaño intermedio. Este modelo emplea coeficientes simples de escorrentía para generar escurrimientos horarios a partir de datos, también horarios de lluvias, y emplea fórmulas de lavado para la simulación de seis contaminantes preespecificados. Sin embargo se puede manipular para incorporar cargas contaminantes de otros elementos arbitrarios.

El modelo tiene aplicaciones para la modelación de cuencas urbanas. Es un modelo cuasi dinámico que emplea la ecuación del método racional para la simulación hidrológica.

El modelo estima el balance de humedad del suelo por la ecuación siguiente:

$$S_t = S_{t-1} - IN \times \Delta t + A \times EV \times \Delta t + B \times MP \times \Delta t$$

Para: ...

$$A = 0.7((SM - S_{t-1}) / SM)^v$$

$$B = ((SM - S_{t-1}) / SM)^p$$

Donde:

- S, es la capacidad del suelo para almacenamiento en pulgadas.
- IN, es la máxima infiltración (pulg/h).
- EV, es la tasa de evaporación (pulg/h).
- MP, es la máxima percolación del suelo (pulg/h).
- SM, es la máxima capacidad de humedad del suelo para el almacenamiento del agua (pulg).
- t, es el tiempo.
- Δt , representa el incremento de tiempo (1h).
- v, es un exponente de regulación de la evaporación.
- p, es el exponente de regulación de la percolación.

El modelo simula pérdidas, la erosión, y la carga de contaminante de cuencas urbanas, y la escorrentía del flujo a través de la red de drenaje para diferentes escalas espaciales y temporales. El modelo asume que los contaminantes acumulados entre los acontecimientos consecutivos de lluvia serán lavados durante otro acontecimiento de lluvia.

El modelo es capaz de calcular las cargas y la concentración de diversos contaminantes y la simulación de la carga de erosión superficial. Al tiempo tiene limitaciones en la poca flexibilidad de calibrar la hidrógrafa de campo y de que requiere de gran cantidad de datos para dar resultados óptimos.

El modelo requiere información de planeamiento urbano, lluvia, contaminantes, características urbanas de la cuenca y parámetros de la infiltración. Un detalle particular es que incorpora la interfase con sistemas de información Geográfica.

El modelo ILLUDAS es de uso libre con actualizaciones recientes pero su uso ha disminuido por la aplicación de otros modelos que incorporan con mayor detalle los análisis de contaminantes.

A2.1.11 Modelo HIDRAS

Este modelo hidrológico distribuido se caracteriza por la utilización de herramientas SIG al manejo de la información fisiográfica, a partir de un MDT y las cartas temáticas de edafología y uso del suelo. Como la mayoría de los modelos distribuidos, utiliza el criterio de direcciones preferenciales de flujo entre celdas y la acumulación de elementos para configurar la red o sistema de drenaje, con ayuda del programa de apoyo denominado Redras.

En principio, los modelos de tránsito distribuido de crecientes se utilizan para describir la transformación de lluvia a escorrentía, al producir el hidrograma a la salida de una cuenca, y luego tomar el resultado como información de entrada en el extremo aguas arriba de un cauce o sistema de cauces y transitarlo hacia aguas abajo. En este caso se ha planteado, para el tránsito distribuido unidimensional, una expresión integral propuesta por Diskin y Ding (1994) que se basa en la ecuación dinámica de convección-difusión. La solución integral no requiere una subdivisión de los cauces para transitar una avenida y está expresada como una función impulso-respuesta, esto es, que puede aplicarse directamente a un valor de entrada i para obtener el de salida q . La generación de la salida $q(t)$ a partir de una entrada $i(t)$, en el tiempo, se obtiene al aplicar la llamada integral de convolución discretizada, de manera similar al conocido hidrograma unitario (Mobayed, 2001). Todas las unidades basadas en el sistema internacional de unidades.

$$Q_j = \sum_{k=1}^j (I_k u_{j-k+1}) \Delta t$$

Q_j es una ordenada de la curva de salida asociada al tiempo $j \Delta t$; I_k la entrada en el tiempo $k \Delta t$. El valor de u se estima mediante la ecuación que sigue, para el instante $t = (j - k + 1) \Delta t$, la distancia L entre los puntos de entrada y salida, y para valores medios de los coeficientes de celeridad y difusión, C y D :

$$u(t) = \frac{L}{\sqrt{4\pi Dt^3}} \exp\left(\frac{-(L - Ct)^2}{4Dt}\right)$$

Se han obtenido gráficas adimensionales y expresiones que tipifican el comportamiento de C y D, en función de variables como el número de Froude, F. Para canales aguas abajo, la entrada de escurrimiento pluvial corresponde a los hidrogramas de salida generados en los tramos superiores (de hecho, si confluyen varios tramos, habrá que sumar sus aportes para definir tal entrada). Dichos canales producen su propia salida, resultado del tránsito de la avenida por medio de la ecuación Qj, más la generada por cuenca propia. Al final, la acumulación de hidrogramas, transportados de los tramos superiores a los inferiores, habrá de definir la variación de la escorrentía a través de toda la red. La discretización del área permite suponer que cada canal tiene sección y pendiente constante (lo que facilita la elección de sus parámetros).

Por otro lado se debe tomar en cuenta que, con el escalamiento fisiográfico, la tasa de precipitación en exceso no necesariamente equivale al caudal de escorrentía directa, debido básicamente al efecto de regulación del área tributaria. Una alternativa para incluir tal efecto consiste en usar funciones de convolución o tipo impulso-respuesta. (Mobayed, 2001); pero otra posibilidad es emplear formas de salida conocidas, como el hidrograma unitario triangular o el adimensional propuesto por el SCS (1972). Por sus características y facilidad de adecuación al caso de respuestas rápidas, como las del escurrimiento pluvial en zonas urbanas,

Aranda (2001) comprobó, en efecto, las bondades del algoritmo de Haan, no sólo por haber simulado razonablemente bien hidrogramas aforados sino por depender prácticamente de un solo parámetro de calibración. El algoritmo emplea la siguiente relación adimensional para generar avenidas de distintas formas como una función del tiempo de pico t_p , el gasto máximo q_p y un parámetro adimensional k:

$$\frac{q(t)}{q_p} = \left[\frac{t}{t_p} \exp\left(1 - \frac{t}{t_p}\right) \right]^k$$

La expresión define curvas adimensionales y su integración (área bajo la curva) multiplicada por $t_p \cdot q_p$, corresponde al volumen del hidrograma, esto es:

$$\nabla = q_p t_p \left(\frac{e}{K} \right)^k \Gamma(K)$$

Siendo e el número de Euler y $\Gamma(k)$ la llamada función gamma. Al escribir la ecuación en forma adimensional, Haan representó las variaciones del parámetro $(q_p t_p)$ con respecto al coeficiente k y determinó el siguiente ajuste:

$$K = 6.5 \left(\frac{q_p t_p}{\nabla} \right)^{1.92}$$

En el procedimiento propuesto, el volumen del hidrograma se iguala con la llamada precipitación en exceso y el tiempo pico, con base en una fórmula semiempírica conocida (como la propuesta por este mismo método). De esta manera, si k se toma como un parámetro general de calibración, el caudal pico del hidrograma incipiente se puede cuantificar con la ecuación de ajuste $q(t)$. Una vez que se tengan los hidrogramas incipientes por cada celda geomorfológica, se efectúa su tránsito y acumulación –según lo indique la topología de la red.

▪ El sistema Calrhid

La aplicación, denominada Calrhid, integra un conjunto de herramientas funcionales, desarrollada dentro del sistema operativo windows, que dan cuenta de la conformación de superficies tributarias inherentes a cualquier sistema de colectores de una zona urbana; el cálculo de caudales servidos y pluviales (a nivel microcuenca y conforme a la interconexión del propio conjunto de drenajes); y el diagnóstico hidráulico del funcionamiento de drenajes y colectores para el desalojo de la escorrentía pluvial.

Una vez que el usuario tenga el MDT (modelo digital del terreno) y los mapas temáticos que contienen el uso del suelo y los polígonos de Thiessen asociados con las estaciones climatológicas existentes –todos en formato Raster y coincidentes en resolución y coordenadas de un mismo origen – se ejecutan los procesos de ordenamiento y escalamiento en celdas geomorfológicas, antes descritos, para definir así las áreas tributarias que requieren los modelos hidrológicos.

Una vez que se ha cargado la información cartográfica digital junto con los datos del sistema de drenaje, y se han efectuado los procesos de marcado, ordenamiento y escalamiento, se pueden iniciar los estudios hidráulicos e hidrológicos. Sin duda, el cálculo de gastos pluviales constituye uno de los trabajos más complejos de la hidrología urbana, no sólo por la dificultad inherente a la caracterización de las áreas tributarias en

muchos casos incierta, pues la topografía de zonas relativamente planas dificulta notablemente su definición precisa sino también por la sensibilidad involucrada en los parámetros que ocupan los modelos de simulación.

Gracias al trabajo involucrado en los procesos de ordenamiento y escalamiento, esta tarea pasa a segundo término, pues la delimitación de áreas tributarias y la obtención de sus parámetros físicos se vuelven un procedimiento totalmente automatizado. Donde se centra la atención en asignar los datos generales para el modelo de lluvia-escorrentía, así como información climatológica y coeficientes de escurrimiento asociados a cada uso del suelo.

Este modelo requiere licencia y en su aplicación se integran herramientas funcionales en materia de diseño y manejo de sistemas de drenaje pluvial para entornos urbanos constituyendo un instrumento dinámico de diagnóstico que facilita adecuado para proyectistas, planificadores y tomadores de decisiones que requieren, en tiempo real llevar a cabo acciones en el manejo de cuencas.

A2.1.12 Modelo HEC-1

HEC-1. El modelo HEC-1 desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del Corps of Engineers está diseñado para simular el escurrimiento superficial de una cuenca como respuesta a la precipitación, representando la cuenca mediante un sistema hidrológico interconectado formado por componentes de subcuencas y cauces. Cada subcuenca entrega una respuesta que se agrega al sistema general. Los elementos que se simula son superficies de flujo y/o canales. El resultado del modelo es el cálculo de la escorrentía a la salida y en lugares preestablecidos.

La representación de cada componente requiere un conjunto de parámetros que especifiquen las características particulares de la misma y las relaciones matemáticas que describan el proceso físico lluvia - escorrentía, incluyendo los procesos meteorológicos, hidrológicos e hidráulicos y contemplando los subprocesos de la lluvia, transformación del exceso de lluvia en escorrentía superficial a la salida de cada subcuenca, adición de caudal base y circulación del hidrograma de salida.

El resultado del proceso modelado es la obtención de hidrogramas en los lugares deseados dentro de la cuenca.

Las capacidades disponibles en el HEC-1 comprende la estimación automática de los parámetros del hidrograma unitario, de interceptación e infiltración y de transporte, a partir de datos observados. Otra de las funciones del HEC 1 es la simulación de la escorrentía y

el caudal en una cuenca, representada como un conjunto interconectado de subcuencas, a partir de lluvias históricas, lluvias de diseño o utilizando una función que relacione la superficie de la cuenca con la lámina de precipitación. Esta es la función que caracteriza este modelo.

Los parámetros utilizados representan promedios espaciales y temporales, por lo tanto la adecuada representación de las subcuencas es determinante para modelar. Es un modelo válido para episodios aislados, que sólo considera la escorrentía directa superficial ya que no tiene en cuenta la redistribución del agua en el suelo en períodos no lluviosos ni la evapotranspiración. Otra de las limitaciones del HEC 1 es la consideración de la circulación de flujos por métodos hidrológicos de tramos de río, que simplifican las ecuaciones de Saint Venant, requeridas para cauces con pendientes muy planas.

El modelo HEC-2. También ha sido desarrollado por el U.S. Corps of Engineers para el cálculo hidráulico en condiciones permanentes, flujo gradualmente variado en cauces naturales y canales artificiales. Adopta las condiciones de flujo subcrítico y supercrítico. Se puede analizar el efecto de diferentes estructuras de control como puentes, alcantarillas, vertederos e incluso el caso de planicies de inundación sobre las márgenes de los cauces.

El procedimiento se basa en la solución de la ecuación de energía unidimensional considerando las pérdidas por fricción según la ecuación de Manning. Este modelo ha sido empleado para establecer superficies de inundación en el desarrollo de planes de gestión de zonas inundables, así como estudios de seguros.

A2.1.13 Modelo HEC HMS

HEC-HMS, es un modelo hidrológico desarrollado también por el Hydrologic Engineering Center (HEC), que tiene como objetivo principal representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de una determinada cuenca. Este modelo tiene la particularidad de integrar la evolución del sistema hidrológico en el tiempo. Para este propósito inicial, es necesaria una representación esquemática de la cuenca, que refleje la morfología y la red de drenaje.

En este sentido, el programa HEC-HMS incluye diferentes tipos de elementos básicos, cuya descripción y funcionalidad se indican a continuación.

Subcuenca: Este tipo de elemento se caracteriza porque no recibe ningún flujo entrante y da lugar a un único flujo saliente que genera la propia subcuenca a partir de los datos meteorológicos, una vez descontadas las pérdidas de agua, transformado el exceso de

precipitación en escorrentía superficial y añadido el flujo base. Este elemento se utiliza para representar cuencas vertientes de tamaño muy variado.

Tramo de cauce: Este elemento se caracteriza porque recibe uno o varios flujos entrantes y da lugar a un solo flujo saliente. Los flujos entrantes, que provienen de otros elementos de la cuenca, tales como subcuencas u otros tramos de cauce, se suman antes de abordar el cálculo del flujo saliente.

Embalse: Es un tipo de elemento que recibe uno o varios flujos entrantes, procedentes de otros elementos, y proporciona como resultado del cálculo un único flujo saliente.

Confluencia: Se caracteriza porque recibe uno o varios flujos entrantes y da lugar a un solo flujo saliente, con la particularidad de que el flujo saliente se obtiene directamente como suma de los flujos entrantes, considerando nula la variación del volumen almacenado en la misma. Permite representar la confluencia propiamente dicha de ríos o arroyos, aunque ello no es imprescindible, ya que los flujos entrantes pueden proceder también de subcuencas parciales.

Derivación: Este tipo de elemento se caracteriza porque da lugar a dos flujos salientes, principal y derivado, procedentes de uno o más flujos entrantes.

Fuente: Junto con la subcuenca, es una de las dos maneras de generar caudal en el modelo de cuenca. Se suele utilizar para representar condiciones de contorno en el extremo de aguas arriba, y el caudal considerado puede proceder del resultado del cálculo efectuado en otras cuencas.

Sumidero: Recibe uno o varios flujos entrantes y no da lugar a ningún flujo saliente. Este tipo de elemento puede ser utilizado para representar el punto más bajo de una cuenca endorreica o el punto de desagüe final de la cuenca en cuestión. La combinación de estos tipos de elementos, con las adecuadas conexiones entre ellos, constituye finalmente la representación esquemática de la cuenca total.

▪ Componentes de la modelación

Los componentes de este modelo son los siguientes:

- Evaporación y Evapotranspiración en HEC HMS

HEC-HMS contempla diferentes posibilidades, según el tipo de distribución espacial que se considere para la precipitación en el conjunto de la cuenca o subcuenca objeto de

análisis. Existen diferentes alternativas para determinar el valor de la precipitación media sobre el conjunto de la superficie, a partir de la información puntual registrada en una serie de pluviómetros como la media aritmética o ponderada, polígonos de Thiessen, método de las isoyetas.

Si se considera que la distribución espacial de la precipitación no es uniforme, las alternativas que contempla, la opción de utilizar un algoritmo que proporciona el valor de la precipitación en un punto, o en una zona de pequeña extensión, como media ponderada de los valores registrados en diferentes pluviómetros con coeficientes de ponderación que tienen en cuenta el inverso del cuadrado de la distancia al pluviómetro correspondiente.

Para el establecimiento de hietogramas de diseño en períodos cortos de tiempo, el programa HEC-HMS considera la posibilidad de utilizar un hietograma definido por el usuario, basado generalmente en análisis estadísticos llevados a cabo sobre registros históricos en pluviómetros o pluviógrafos representativos.

En cuanto a la evapotranspiración, cabe señalar que su conocimiento no es relevante cuando se trata de analizar la respuesta hidrológica de la cuenca frente a aguaceros de corta duración. En los casos de simulación continua, el programa HEC-HMS contempla la posibilidad de definir valores medios mensuales, determinados según los métodos habitualmente utilizados en Hidrología.

Volumen total disponible para escorrentía

El volumen total de agua disponible para escorrentía superficial es el resultado de descontar de la precipitación el agua interceptada por la vegetación, infiltrada en el suelo, almacenada en la superficie del mismo, evaporada desde diferentes superficies o transpirada a través de las plantas.

El programa HEC-HMS contempla diferentes alternativas a la hora de cuantificar estas pérdidas de agua: uno de ellos es el establecimiento de un umbral de precipitación, por debajo del cual no se produce escorrentía superficial, y una tasa constante de pérdidas por encima del citado umbral. Otra opción es el número de curva (CN), desarrollado por el U.S. Soil Conservation Service (SCS), teniendo en cuenta los usos del suelo, el tipo de suelo y el contenido de humedad previo al episodio lluvioso que se considera. Considera también el Método de Green y Ampt, que tiene en cuenta, entre otros, aspectos tales como la permeabilidad del suelo y el déficit inicial de humedad del mismo. Finalmente el Modelo SMA (Soil Moisture Accounting), que permite simular el movimiento del agua a través del suelo y del subsuelo, su interceptación y almacenamiento en diferentes zonas, y el escurrimiento superficial del exceso.

Desde el punto de vista de variación espacial de los valores de los parámetros implicados, los modelos se pueden clasificar en agregados o distribuidos. En el primero de los casos, como se mencionó al principio del presente, los parámetros mantienen un valor constante dentro de cada subcuenca, mientras que en el caso de modelos distribuidos lo habitual es que los valores de los parámetros varíen de un punto a otro, en el interior de cada subcuenca.

En relación con los modelos concretos aquí mencionados, es interesante señalar que el método de Green y Ampt es de tipo distribuido; el modelo SMA y el basado en el concepto de número de curva presentan sendas versiones de tipo agregado y distribuido; y el modelo basado en el establecimiento de un umbral de precipitación y una tasa constante de pérdidas es de tipo agregado.

Escorrentía superficial

El programa HEC-HMS contempla dos posibles alternativas, basadas en modelos de tipo empírico o conceptual, respectivamente. Entre los modelos de tipo empírico, basados todos ellos, en mayor o menor medida, en el concepto de hidrograma unitario, propuesto originalmente por Sherman en 1932, el programa permite seleccionar entre otros: el Hidrograma unitario definido por el usuario, el Hidrograma sintético de Snyder, el Hidrograma del Soil Conservation Service y el Hidrograma de Clark (original y modificado). Todos ellos aplicables, en principio, a tormentas de corta duración. Su formulación no impide que estos sean utilizados en casos de simulación continua, considerados como una sucesión de tormentas.

Como alternativa a los modelos anteriores, el programa HEC-HMS incluye un modelo conceptual, de tipo onda cinemática, en el que la cuenca o subcuenca está representada por un cauce muy ancho, alimentado en su origen por el exceso de precipitación. Los datos necesarios para su utilización, que deben ser extraídos de medidas reales, hacen referencia a la longitud, pendiente, rugosidad de la cuenca.

A su vez, el modelo incorpora un análisis para el flujo base, el cual tiene su origen en la precipitación registrada sobre la cuenca en períodos precedentes y que se han almacenado temporalmente en capas más o menos profundas, incluyendo el flujo subsuperficial asociado al período actual. El programa HEC-HMS considera para su modelación modelos son agregados, empíricos y aplicables como la curva de recesión exponencial y Depósitos lineales sucesivos.

□ Tránsito del hidrograma por el cauce

La agrupación de caudales de agua de diversa procedencia (superficial, etc.) en un punto de un cauce y su variación a lo largo del tiempo constituye un hidrograma. El discurrir de estos caudales hacia aguas abajo, a lo largo de un determinado tramo de cauce, da lugar a un nuevo hidrograma en el extremo de aguas abajo del mismo. El programa HEC-HMS permite escoger entre los siguientes modelos para representar la transformación que experimenta el hidrograma entre los puntos inicial y final de un tramo de cauce:

A2.1.14 Modelo LAG

Entre las diferentes posibilidades que contempla el programa HEC-HMS para representar el tránsito de hidrogramas a lo largo de tramos de cauce, la más simple es la constituida por el modelo LAG. En dicho modelo, el hidrograma correspondiente al extremo de aguas abajo de un determinado tramo de cauce es idéntico al registrado en el extremo de aguas arriba del mismo, con la única salvedad de que se produce con un cierto retraso temporal. La forma del hidrograma no experimenta variación, matemáticamente, se cumple que:

$$Q_t = I_{t-t_0}$$

siendo t_0 el denominado tiempo de retardo, que es el único parámetro que interviene en la definición del modelo y que debe ser establecido por el usuario. La Figura A2.6 muestra el tiempo de retardo que experimenta el hidrograma.

Este modelo, a pesar de su indudable simplicidad, no está exento de aplicación práctica. Así, resulta aplicable en aquellos casos en los que la longitud del tramo de cauce entre dos puntos de cálculo es muy pequeña.

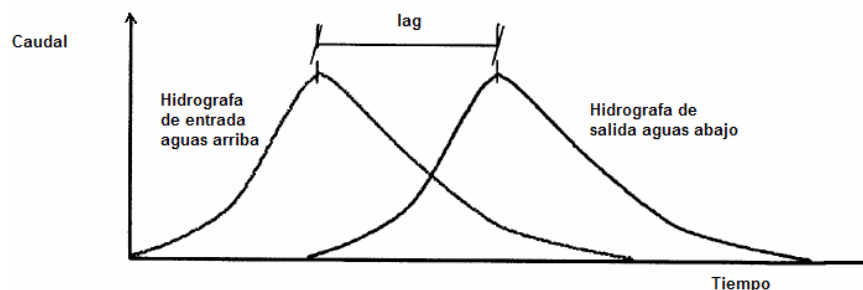


Figura A2.6. Retraso temporal del modelo LAG
 Fuente: Guía, Descripción y Características del HEC HMS, 2004.

A2.1.15 Modelo CLARK

El modelo de Clark considera que en el proceso de transformación del exceso de precipitación sobre una cuenca en hidrograma de escorrentía superficial en el punto de desagüe de la misma intervienen dos tipos de fenómenos:

- Una traslación o movimiento del exceso de agua desde el punto en que se origina hasta el punto de desagüe de la cuenca, a través de la red de drenaje de la misma.
- Una reducción del caudal punta del hidrograma, debido al almacenamiento transitorio del agua en el conjunto de la cuenca.

Este almacenamiento temporal, que tiene lugar, a corto plazo, en la superficie del terreno y en los cauces, juega un papel importante en la transformación del exceso de precipitación en escorrentía.

Siguiendo la notación habitual, el citado modelo parte de la ecuación de continuidad, expresada en la forma:

$$\frac{dS}{dt} = I_s - Q_t$$

dS/d_t : Variación en el tiempo del volumen de agua almacenada en el depósito lineal.

I_t : Caudal entrante en el instante t.

Q_t : Caudal saliente en el instante t.

Admitiendo la hipótesis de depósito lineal, el almacenamiento en el instante t (S_t) se relaciona con el caudal saliente en dicho instante mediante la expresión:

$$S_t = RQ_t$$

En la que R es un parámetro, de valor constante, que caracteriza al depósito y que, en último término, debe ser definido por el usuario.

El caudal medio desaguado durante el citado incremento de tiempo se define como:

$$Q_{im} = \frac{Q_{t-1} + Q_t}{2}$$

Además de este modelo de almacenamiento, de tipo agregado, el modelo de Clark tiene en cuenta el tiempo que tarda el agua en alcanzar el citado punto de desagüe de la cuenca. La versión del modelo de Clark implementada en el programa HEC-HMS utiliza para ello un histograma típico área-tiempo, definido en la forma siguiente:

$$\frac{A_t}{A} = 1,414 \left(\frac{t}{t_c} \right)^{1.5} \quad \text{si } t \leq \frac{t_c}{2}$$

$$\frac{A_t}{A} = 1 - 1,414 \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{1.5} \quad \text{si } t \geq \frac{t_c}{2}$$

Designando como A_t el área acumulada de la cuenca que contribuye al caudal desagüado en el instante t ; como A el área total de la cuenca; y como t_c el tiempo de concentración de la misma.

De lo expuesto anteriormente se deduce que los parámetros que intervienen en la definición del modelo de Clark son el tiempo de concentración (t_c) y el coeficiente de almacenamiento (R), cuyos valores deben ser definidos por el usuario. El coeficiente de almacenamiento, que se expresa en unidades de tiempo, siendo un índice del almacenamiento temporal de la precipitación excedente en el interior de la cuenca, que drena hacia el punto de desagüe de la misma.

A2.1.16 Modelo MUSKINGUM

El modelo pertenece a la categoría de los denominados hidrológicos, que resuelven el problema de tránsito de hidrogramas utilizando exclusivamente la ecuación de continuidad del flujo:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = I_t - Q_t$$

$\square S/dt$: Variación en el tiempo del volumen de agua almacenada en el depósito lineal.

I_t : Caudal entrante en el instante t .

Q_t : Caudal saliente en el instante t .

Este modelo representa el volumen de almacenamiento constituido por dos sumandos: uno de almacenamiento en prisma y otro en cuña. Durante la fase de crecimiento del hidrograma, el caudal de entrada es mayor que el caudal de salida, produciéndose un almacenamiento en forma de cuña positiva. Por el contrario, durante la fase de recesión, el caudal de salida es mayor que el de entrada, dando como resultado el desarrollo de una cuña negativa. Además, existe un almacenamiento en prisma a lo largo de la longitud del cauce como se muestra en la Figura A2.7.

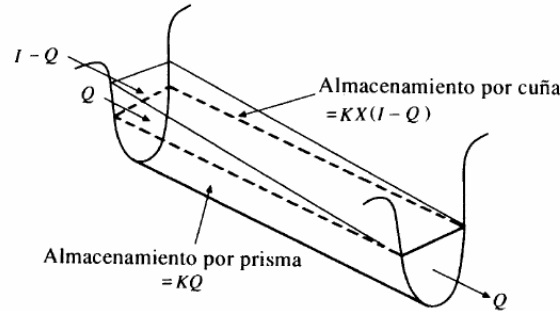


Figura A2.7. Almacenamiento con prisma Modelo MUSKINGUM
Fuente: Guía, Descripción y Características del HEC HMS, 2004.

Suponiendo que el área de la sección transversal del flujo es directamente proporcional al caudal circulante, el volumen de almacenamiento en prisma resulta igual a KQ , siendo K un coeficiente de proporcionalidad. En cuanto al volumen de almacenamiento en cuña, su valor es igual a $KX(I - Q)$, en donde X es un factor de ponderación ($0 \leq X \leq 0,5$). El almacenamiento total se puede poner, por lo tanto, en la forma:

$$S = KQ + KX(I - Q) = K(XI + (1-X)Q)$$

El parámetro K representa el tiempo de recorrido de un hidrograma o de una onda de crecida a lo largo del tramo de estudio, mientras que el valor de X depende de la forma del almacenamiento en cuña.

Combinando la última de las ecuaciones indicadas con la expresión clásica de la ecuación de continuidad, se llega finalmente a:

$$Q_{t+\Delta t} = C_1 I_{t+\Delta t} + C_2 I_t + C_3 Q_t$$

Donde:

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t}$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t}$$

$$C_3 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t}$$

Aplicando esta ecuación de manera recurrente, se puede obtener el hidrograma en el extremo de aguas abajo del tramo de estudio, en función del hidrograma en el extremo de aguas arriba (I en todos los instantes), del caudal de salida en instante inicial (Q en t = 0), y de los valores de los parámetros K y X.

Cabe señalar que todos ellos son de tipo agregado, y aplicables, en principio, a eventos de lluvia aislados de corta duración. En cuanto a sus fundamentos básicos, hay que indicar que el modelo de onda cinemática es de tipo conceptual, mientras que el modelo Lag, y Muskingum son de tipo empírico. El modelo de Muskingum-Cunge es de tipo quasi-conceptual, ya que en su formulación intervienen algunas variables que son susceptibles de ser determinadas a partir de mediciones geométricas

A2.1.17 Modelo PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System)

El PRMS es un modelo determinístico y distribuido desarrollado para evaluar impactos de varias combinaciones de la lluvia, el clima y uso del suelo para eventos extremos. La respuesta normal de la cuenca a eventos extremos de lluvia puede ser simulada al evaluar los regímenes de flujo, caudales pico, producción de sedimentos y recarga subterránea. Los parámetros de optimización y análisis de sensibilidad son considerados en este modelo para evaluar los efectos que generan los datos obtenidos.

Al igual que la mayoría de los modelos hidrológicos, la metodología interna de este modelo comprende la división de la cuenca en subcuencas estimando para cada una de ellas la pendiente media, la elevación del terreno, el tipo de suelo, el uso del suelo y la respectiva distribución espacial de la lluvia en la cuenca. Dos tipos de particiones son aplicables en el modelo, la primera divide la cuenca en unidades de respuesta homogéneas (URH) que se basa en las características propias de cada subcuenca; los balances hídricos y energía; estimados a escala diaria para cada unidad. La suma de las respuestas de cada URH, estimadas por unidad de área genera la respuesta diaria del sistema y el flujo para la cuenca. La segunda comprende la hidrógrafa ante un evento de lluvia.

Los datos iniciales que requiere el modelo para cálculos diarios de flujo son la precipitación diaria y el máximo valor de ésta, el promedio de la temperatura diaria y temperatura mínima diaria. Para el cálculo de la hidrógrafa de la tempestad y estimación de carga de sedimento se requieren datos sobre la precipitación de corta duración o eventos, y los datos de sedimento respectivamente. Los datos descriptivos y físicos de la topografía, el uso del suelo, la pendiente superficial y la vegetación son indispensables como datos iniciales para cada subcuenca en las que se dividió la cuenca general.

Como datos de respuesta, el modelo, estima el caudal diario para la cuenca general. Los resultados a nivel mensual y anual de la precipitación, la evaporación real, y de las afluencias y drenajes del agua y depósitos subterráneos son dados y acumulados por el programa.

Dentro de las limitaciones en comparación con otros modelos es que el modelo no tiene interfase completa con sistemas de información geográfica y no tiene dentro de sus funciones el análisis de la calidad del agua.

El modelo se puede obtener de la página <http://water.usgs.gov/software> como versión oficial de la U.S. Geological Survey.

Existen otros modelos hidrológicos de aplicación urbana que no cuentan con un análisis detallado de las ecuaciones que considera como los anteriores pero si contienen la aplicación, información requerida, ventajas y desventajas en su aplicación.

A2.1.18 Modelo WMS

El Watershed Modeling System (WMS) es un programa gráfico que integra todas las fases de la hidrología y de la hidráulica de una cuenca, entendiéndose como las fases del comportamiento que tiene el agua: lluvia, escorrentía, y evaporación. WMS incluye herramientas de gran alcance para modelar procesos tales como delineación automatizada de la cuenca, cálculos de parámetros geométricos, Número de Curva CN, lámina de precipitación, coeficientes de rugosidad, extracción de la sección transversal y datos del terreno entre otros. El programa WMS 8, se apoya de otros modelos como HEC-1 (HEC-HMS), TR-20, TR-55, método racional, y HSPF (Hydrological Simulation Program Fortran). Los soportes hidráulicos son los modelos HEC-RAS, incluyendo la interacción del agua subterránea que ahora se puede modelar con GSSHA. Todo el modelo comprende una metodología del procesamiento de los datos que hacen del análisis de la cuenca sea fácil para el usuario.

El diseño del programa permite al usuario seleccionar los módulos con que desea trabajar el programa. Los módulos adicionales de WMS pueden ser incorporados en cualquier momento. El software se ligará dinámicamente a estos módulos subsecuentes en el tiempo de pasada - automáticamente adición de capacidad que modela adición al software.

A2.1.19 Modelo GWLF (Generalized Watershed Loading Function)

Es un modelo desarrollado por la Universidad de Cornell para estimar la cantidad de flujo y sedimento que cargan las aguas urbanas y rurales en las cuencas. El modelo de GWLF proporciona la habilidad de simular pérdidas, carga de sedimento, y cargas de nutrientes, posee algoritmos para calcular las cargas sépticas de un sistema y tiene en cuenta datos de descarga aguas servidas y/o pluviales en un determinado punto. Es un modelo continuo de simulación, que utiliza períodos de tiempo a nivel diario para los cálculos.

Este modelo compara las cargas simuladas dentro de una cuenca alterada e intervenida contra cargas simuladas para cuencas de referencia que exhiben un entorno semejante, semejante en los usos del suelo, y tipo de vegetación.

Como función del modelo, simula la escorrentía y el sedimento usando la ecuación del número de curva (CN) y la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) combinado con los promedios de concentración de nutrientes basado en la información que se tenga del uso del suelo. Debido a la falta de detalle en las predicciones y de la corriente, el modelo da los resultados de las estimaciones de carga de sedimentos mensualmente así se tengan datos de campo de cargas a nivel diario.

Recientemente ha sido agregado al modelo una interfase de ArcView lo que permite analizar la cuenca con sistemas de información geográfica y por medio de los algoritmos que permiten simular el transporte de sedimento. Arc View organiza los archivos de entrada automáticamente el modelo GWLF y genera la red de corriente que liga diferentes subcuencas en la zona de estudio. El transporte de sedimentos es simulado usando tres tipos de tamaños de partículas (arena, limo y arcilla).

▪ **Datos de entrada**

- Clima: los datos diarios de la precipitación y la temperatura y áreas de fuente de pérdidas.
- Parámetros del Transporte: factor de pérdida de suelo, coeficiente de evapotranspiración, y proporción de entrega de sedimento.

- Parámetros Químicos: tasas urbanas de acumulación de concentraciones disueltas de nutrientes y concentraciones de flujo de sólido.
- Sistema Séptica: carga de nutrientes, sistema efluente, y población servida por sistemas sépticos.
- Puntos de descarga y concentración.
- **Características del modelo**
 - El modelo divide la cuenca en superficie, en la zona no saturada, y la zona saturada.
 - Los valores de parámetros de contaminante son basados en datos de un área particular del estudio

Como ventajas del modelo se destaca la comodidad que ofrece al modelador, ya que puede ser aplicado rápidamente para evaluar las cargas potenciales con algún reconocimiento de la variabilidad estacional.

Las desventajas del modelo se centran en las simplificaciones en el transporte simulación de calidad de agua. La simulación de flujos altos de nutrientes es débil debido a la constante concentración que utiliza y las direcciones de flujo son altamente simplificadas.

Con base en la descripción del modelo se puede concluir que tiene una aplicabilidad enfocada a los sitios donde el transporte de sedimentos es alto y cuyas cuencas tienen un uso del suelo agrícola. Para entornos urbanos tiene aplicación si se tiene datos de contaminantes y carga de sedimentos.

El modelo es de uso libre y se puede obtener la interfaz de Windows en el portal web: <http://www.vims.edu/bio/vimsida/basinsim.html> y la interfaz de ArcView incorporada en (<http://www.avgwf.psu.edu/>).

A2.1.20 Modelo SLAMM (The Source Loading and Management Model)

Este modelo fue desarrollado originalmente con el fin de entender mejor entre los contaminantes de escorrentía urbana y la calidad del agua. El modelo, ha tenido múltiples desarrollos desde la década del setenta hasta ahora, donde incluye una gran variedad de prácticas de control y se basa en observaciones reales tomadas de la cuenca y su entorno, con una dependencia mínima de procesos teóricos que no han sido documentados adecuadamente ni confirmados en campo. El modelo es utilizado en su

mayor parte como un instrumento de planificación, para entender mejor las fuentes de los contaminantes urbanos y su control.

El énfasis que ha tenido el modelo se asocia a estudios de tormentas de corta duración en modelos de calidad. Muchos modelos urbanos actualmente tienen énfasis en el estudio para grandes eventos de lluvia. Por contraste, los problemas de la calidad de lluvias son asociados en su mayor parte a eventos de corta duración y magnitud. Las suposiciones y simplificaciones que utilizan los modelos de diseño de redes de drenaje no son apropiadas para modelos de calidad de agua. El modelo por lo tanto incorpora herramientas de análisis para más estimar las fuentes de los contaminantes que se generan durante las tormentas y el análisis de calidad del agua.

El modelo es único en varios aspectos, uno de ellos es la habilidad de considerar varios tipos de tormenta (afectaciones a las fuentes de agua, el sistema de drenaje y las salidas del sistema para varios eventos de lluvia). Otro aspecto importante es la habilidad de describir exactamente un área de drenaje en suficiente detalle para investigaciones de calidad del agua sin el requerimiento de mucha información.

SLAMM es un modelo recientemente desarrollado por el USGS para la aplicación a los escenarios urbanos del estado de Wisconsin – Estados Unidos y la zona noreste del mismo. Su estructura es más sencilla que la del modelo SWMM y más sencillo de operar pero tiene menos opciones para representar las condiciones urbanas de la cuenca.

El programa es de uso libre y puede ser obtenido del portal web: <http://wi.water.USGS.Gov/slamm/>

A2.1.21 DR3M (Distributed Routing Rainfall-Runoff Model)

DR3M es un modelo hidrológico determinístico de la U.S. Geological Survey desarrollado para evaluar los impactos en las cuencas urbanizadas por los caudales picos de los eventos de lluvia extremos.

El modelo tiene capacidades de modelar el comportamiento del flujo en cuencas dominadas por drenajes fluviales de sección, natural, cuencas con hidrología alterada debido al almacenamiento excesivo y a los sistemas de transporte del flujo. A la par de modelar el comportamiento del flujo en cuencas antropizadas por la urbanización.

Como en la mayoría de los modelos evaluados en este texto, la información requerida por el modelo corresponde a datos de la lluvia, usos de suelo, pendiente del terreno, características de la urbanización y conducciones de flujo de la cuenca. Las

especificaciones de las conducciones de flujo pueden incluir detalles de los tubos, colectores y alcantarillas de la red de drenaje así como los canales naturales de la cuenca.

Este modelo puede obtenerse gratuitamente de la página web de la USGS: <http://water.usgs.gov/software/dr3m.html>

A2.1.22 CONCLUSIONES

El objetivo de este análisis se ha completado con el examen de algunos modelos hidrológicos considerando las habilidades y la aplicabilidad de estos en cuencas con características similares a las de la Cuenca del río Aburrá. La utilización de modelos matemáticos como los presentados permite la reproducción de un sistema físico urbano de redes de colectores permitiendo evaluar la capacidad de los mismos, la respuesta ante un cambio de físico, variación de parámetros, cambio en la pendiente, cambio de conexión entre diferentes colectores y cambios de las características de la cuenca como la infiltración y usos de suelo.

Debido a la importancia que en proyectos de desarrollo y planificación tiene la información meteorológica, es necesario ampliar la red y automatizar la recolección y transmisión de la información que se mide en las cuencas con el fin de optimizar la aplicación de cualquier modelo hidrológico. Se deben realizar estudios de tipo y uso de suelo a mayor detalle, caracterizar los eventos de lluvia, para definir las alternativas de manejo y conocer el estado actual del sistema. Se concluye entonces que la información y la calidad de la misma para cualquier cuenca son determinantes dentro de la aplicación de un modelo hidrológico.

Con base en estos argumentos se destacan algunos modelos evaluados en este texto. El modelo SHETRAN cobra importancia para ser aplicado para simular los impactos ambientales producto de cambios climáticos y de uso de suelo de una cuenca.

Cabe destacar la importancia que tienen los modelos hidrológicos, que permiten la integración de los elementos físicos característicos de las cuencas a los sistemas de información geográfica SIG. En este sentido el modelo HIDRAS con la aplicación, denominada calhid, que integra un conjunto de herramientas funcionales en materia de diseño y manejo computarizado de sistemas urbanos de drenaje pluvial y sanitario constituye una herramienta óptima para aplicaciones en áreas urbanas. De manera similar el desarrollo del modelo SWAT en interfase con un Sistema de Información Geográfica Arc View, lo hace una herramienta eficiente en operación, tiempo y, así como en la reducción de errores de ponderación en grandes cuencas.

El modelo HEC HMS es una herramienta capaz de simular eventos aislados o procesos continuos utiliza diferentes tipos de elementos para representar esquemáticamente la morfología de la cuenca y las características de su red de drenaje y ofrece diferentes posibilidades a la hora de modelar los diversos componentes que intervienen en el proceso de transferencia lluvia-caudal.

Se recomienda el modelo SWMM, principalmente al análisis y diseño de redes secundarias de drenaje urbano; en áreas en que se pretende mejorar sustancialmente los estándares en la modelación. Los principales procesos hidrológicos que involucra son la generación de escorrentía y la propagación de éstas a través de espacios abiertos, conductos libres y elementos de retención. El modelo no presenta restricciones en variables físicas como pendientes, áreas y uso del suelo lo que hace amplia su aplicación en varios tipos de cuencas urbanas. La limitación más importante del modelo es la ausencia de integración con los SIG, lo que complica bastante la importación y exportación de datos para su análisis.

A2.1.23 Referencias Bibliográficas

ALLASIA, D. G. Impacto das incertezas no custo de uma rede de macrodrenagem. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiente), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

ARIZONA DEPARTMENT OF WATER RESOURCES. State Standard For Hydrologic Modeling Guidelines. Arizona State. U.S., 2006

BERNE, A., DELRIEU, G., CREUTINB, J. D. y OBLED, C. Temporal And Spatial Resolution of Rainfall Measurements Required For Urban Hydrology. Journal of hydrology. U.S., 2004. pp. 166-179.

BLADÉ, E. Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones. Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña – España, 2005.

CHASE, D. Urban Hydrology. Water Ware Consultants, June 8 – 10. U.S. 2005.

COLLISCHONN, W: Simulación Hidrológica de Grandes Cuencas. Tese de Doctorado. IPH, UFRGS. U.S., 2001.

COLLISCHONN, W., y TUCCI, C. E. Simulación Hidrológica de Grandes Cuencas. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Brasil, 2001. Vol. 6, No. 1.

DISKIN Y DING. Channel routing independent of length subdivision. Water Resources Research. Res. 30 (5). U.S., 1994. p1529-1534.

DOLZ, J. y GÓMEZ, M. Problemática del drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas y del estudio hidráulico de las redes de colectores, Ingeniería del Agua, 1994. p 55-66.

EPA US ENVIROMENT PROTECTION AGENCY. Storm Water Management Model (SWMM). U.S., 2006.

IDEA - Instituto de Estudios Ambientales. Cuencas experimentales urbanas en Colombia. Caso Manizales. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. Grupo de trabajo académico en Ingeniería hidráulica y ambiental. Manizales, Colombia, 2005.

MATT M., and Waylen, P. An application of the distributed hydrologic model to a tropical montane watershed. *Journal of Hydrology*. U.S., 2006. p. 481– 495.

MOBAYED, N. Sistematización y automatización como herramienta para la gestión del agua. Sistema CALRHID para el diseño y manejo computarizado de redes urbanas de alcantarillado pluvial y sanitario. Caso de Celaya, Guanajuato (México). Guanajuato – México, 2004.

MORAD, M., y TREVIÑO, A. Sistemas de Información Geográfica y Modelizaciones Hidrológicas. *Boletín de la A.G.E.* N° 31, 2001. p. 23-46

NOEL, D.C. and TERSTRIEP, M.L. W-ILLUDAS - A continuous urban runoff/washoff model. *Proc. Intl. Symp. on Urban Hydrology, Hydraulic, & Sediment control*. Levington. University of Kentucky, 1982.

OÑATE, F., y AGUILAR, G. Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos. III Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográfica. Lima - Perú, 2003.

PUERTAS, J., SUÁREZ, J. y CAGIAO, J. El sentido físico de los parámetros en la modelización numérica del drenaje urbano. *Revista Ingeniería del agua*, Vol 9. N° 3. Septiembre, 2002. p. 269-278.

ROESNER, L. A. Quality Aspects of Urban Runoff, Short Course on Applications of Storm Water Management Model. University of Massachusetts. Department of Civil Engineering, August 1974.

ROSSMAN, L. Storm Water Management Model User's Manual. Version 5.0, National Risk Management Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati. EPA/600/R-05/040. U.S., 2004.

SILVEIRA, A. L. Provável Efeito Urbano nas Relações IDF das Chuvas de Porto Alegre. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. N° 2. p:93 - 107.

SOROOSHIAN, S., Q. DUAN, y V. GUPTA: Calibration of Rainfall-Runoff Models: Application of Global Optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting Model, *Water Resources Research*, (29-4). U.S., 1993 p:1185-1194.

TAE, Jae K. Determination of Urban Runoff Using ILLUDAS and GIS. Applications of GIS to Civil Engineering Texas A&M University. Texas, Mayo 2004.

THOSAINGE, S. Modelling Of Urban Stormwater Drainage Systems Using IIsax. Thesis Submitted In Fulfilment of The Requirement for the degree of doctor of philosophy. Victoria University of Technology, School of The Built Environment. U.S., 2000.

TORRES E., OROPEZA, J. L., y FERNÁNDEZ, D. S. Aplicación del modelo SWAT en la cuenca “El Tejocote”, Estado de México. X CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN. Simposio 4: Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas. Chihuahua – México, 2000.

TORRES, A. Hidrologia Urbana. Ed. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, 2004. 377 p. ISBN: 958-683-713-0.

VILLANUEVA, A., y C. E: M. TUCCI,. Simulação de alternativas de controle em plano diretor de drenagem urbana. Brasil, 2001.

VILLARROEL A. Proyecto SHETRAN: Manejo de Cuencas Hidrográficas en Chile. Aplicación del Sistema Hidrológico Europeo (SHETRAN) en una Microcuenca cordillerana a problemas de Inundación. Universidad de Chile, Santiago. 2003.

WARD, G. BENAMAN J. Models for TMDL Application In Texas Watercourses. Center for Research in Water Resources. University of Texas at Austin, 1999.

A2.2 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

A2.2.1 Estaciones hidrometeorológicas

La información hidrológica de variables como la precipitación y caudal es operada mediante estaciones de EEPPM y el IDEAM. Se recopilaron 73 estaciones de precipitación de las cuales 39 contiene información diaria, 7 contienen información mensual y 27 contienen promedios mensuales multianuales. El 50% de las estaciones de precipitación tienen registros superiores a los 30 años. El nivel de pluviosidad está entre 1,000 y 2,500 mm/año. En cuanto a la calidad estadística de la información por su homogeneidad, la precipitación en general no presenta problemas de cambio ni tendencias en la media y la varianza, lo que se concluye del análisis hecho.

Actualmente, se tienen registros de 14 estaciones de caudal a lo largo del tramo del río Aburrá (13 de registro diario y una mensual) todas operadas por EEPPM. De la calidad en la información de esta variable dado que se encuentra afectada por los vertimientos de aguas residuales y el incremento de estos a lo largo del tiempo, la información presenta inconsistencias, por lo tanto se requiere hacer la reconstrucción de las series naturales.

A2.2.2 Pruebas de homogeneidad

Estas pruebas se basan generalmente en la comparación de parámetros que se obtuvieron a partir de los estadísticos de las series (media, varianza, etc.) con valores críticos teóricos correspondientes a determinadas funciones de distribuciones de probabilidad según la prueba usada. Las pruebas utilizadas para el cambio en la media fueron: prueba T simple (Lettenmaier, 1976b), prueba T modificada (Bayley & Hammersley, 1946; Matalas & Langbein, 1962), Prueba de Mann–Whitney (Hollander & Wolf, 1973), prueba del signo (Gilbert, 1987). Las utilizadas para cambio en la varianza fueron: Prueba F simple (Lettenmaier, 1976a; Devore, 1982), prueba F modificada (Bayley & Hammersley, 1946), prueba de Ansari–Bradley (Hollander & Wolf, 1973), prueba de Bartlett (Snedecor & Cochran), prueba de Levene (Snedecor & Cochran). Para el estudio de la tendencia de la serie se utilizaron: prueba T (Salas, 1992), prueba de Hotelling–Pabst (Conover, 1971), prueba de Mann–Kendall (Gilbert, 1987; Gibbons, 1994), prueba de Sen (Salas, 1992). La Tabla A2.3 presenta una síntesis de las pruebas utilizadas:

Tabla A2.3. Pruebas utilizadas para el análisis de homogeneidad

CAMBIOS EN LA MEDIA	CAMBIO EN LA VARIANZA	TENDENCIA EN LA MEDIA
- Prueba T simple - Prueba T modificada - Prueba del signo - Prueba de Mann–Whitney	- Prueba F simple - Prueba F modificada - Ansari–Bradley - Bartleff - Levene	- Prueba T - Hotelling–Pabst - Mann–Kendall - Sen

Fuente: Red Río Fase I, 2003.

Generalmente las pruebas de cambios y tendencias anteriormente mencionadas exigen independencia serial. Se recomienda realizar las pruebas de tendencias sobre la serie anual. En este caso, algunas de las pruebas de homogeneidad tienen mayor relevancia y peso sobre otras de acuerdo a las hipótesis que requieren cumplir para resultados confiables. Este es el caso de las pruebas T y F modificadas las cuales no requieren independencia serial por lo que se convierten en las más relevantes en las pruebas a nivel mensual, ya que generalmente toda serie de este tipo resulta ser serialmente dependiente.

Las pruebas de independencia serial que se aplicaron a los registros de las estaciones de la Cuenca del río Aburrá fueron las siguientes:

- Autocorrelograma de Anderson (DIME, 2003)
- Prueba de Sperman (DIME, 2003)
- Prueba de las corridas (DIME, 2003)

De las anteriores pruebas la de mayor peso es el Autocorrelograma de Anderson, ya que indica en que posible rezago se puede presentar la dependencia serial. En la Tabla A2.4 se presentan las convenciones de las pruebas utilizadas en las estaciones analizadas.

Tabla A2.4. Convenciones

MEDIA	PRUEBA				
1 –	Mann–Whitney	A–	Acepta media estacionaria		
2 –	T Simple	R–	Rechaza media estacionaria		
3 –	T Modificada				
4 –	Signo				
VARIANZA	PRUEBA				
1 –	F Simple	A–	Acepta varianza estacionaria		
2 –	F Modificada	R–	Rechaza varianza estacionaria		
3 –	Ansari–Bradley				
4 –	Barlett				
5 –	Levene				

TENDENCIA	PRUEBA					
1 -	T	A-	Acepta serie sin tendencia en la media			
2 -	Hotelling-Pabs	R-	Rechaza serie sin tendencia en la media			
3 -	Mann-Kendall					
4 -	Sen					
# -	El tamaño de la serie no es el suficiente para aplicar la prueba					

Fuente: Red Río Fase I, 2003.

Las pruebas a nivel mensual como a nivel anual de las estaciones de precipitación y caudal se presentan en las Tabla A2.5, Tabla A2.6, Tabla A2.7 y Tabla A2.8.

Tabla A2.5. Pruebas de homogeneidad a nivel mensual de las estaciones de precipitación

ESTACIÓN		MEDIA				VARIANZA						
NOMBRE	CÓDIGO	CAMBIO	1	2	3	4	CAMBIO	1	2	3	4	5
BOQUERON	2701078	12/1975	R	R	R	R	06/1981	A	A	R	A	R
MESETA LA SN PE	2701080	12/1978	R	R	R	R	04/1979	R	R	R	R	R
STA HELENA	2701081	03/1995	A	R	R	R	12/1994	R	R	R	R	R
CUCHILLA LA	2701082	11/1978	A	R	A	R	03/1979	R	R	R	R	R
ASTILLEROS	2701111	04/1994	A	R	R	R	06/1998	R	A	R	R	R
IGUANA LA	2701112	03/1994	A	R	A	R	12/1995	A	A	R	A	R
OLAYA HERRERA	2701507	06/1970	A	A	A	R	01/1981	A	A	R	A	R
TULIO OSPINA	2701509	10/1970	A	A	A	R	03/1991	R	A	R	R	R
PIEDRAS BLANCAS	2701512	11/1974	R	R	R	R	03/1975	R	A	R	A	R
PROGRESO HDA EL	2701515	04/1983	A	R	A	R	05/1984	R	R	R	R	R
SALADA LA	2701526	04/1993	A	R	A	R	10/1994	A	A	R	A	R
MAZO	2701034	12/1975	A	A	A	R	03/1991	A	R	R	A	R
FABRICATO	2701037	04/1969	A	R	A	R	12/1968	R	R	R	R	R
SAN ANTONIO DE PRADO	2701038	02/1950	A	A	A	R	04/1973	A	R	R	A	R
SAN CRISTOBAL	2701046	12/1989	A	R	A	R	10/1989	A	R	R	R	R
MIGUEL DE AGUINA	2701047	01/1976	A	A	A	R	04/1991	A	R	R	A	R
GIRARDOTA	2701056	11/1989	A	R	A	R	02/1994	R	R	R	R	R
BARBOSA	2701057	12/1979	R	R	R	R	12/1988	R	R	R	R	R
BOQUERON	2701062	12/1985	R	R	A	R	04/1982	A	R	R	A	R
NIQUIA	2701076	11/1990	A	R	A	A	03/1991	R	R	R	R	R
AYURA	2701093	05/1973	A	A	A	R	04/1991	A	R	R	R	R
CUCARACHO	2701114	05/1993	A	A	A	R	09/1995	A	R	R	A	R
ASTILLERO	2701115	03/1995	A	R	A	R	10/1994	R	A	R	A	R
EL CONVENTO COPACABA	2701122	11/2000	A	R	A	R	03/2001	A	R	R	A	R
MANANTIALES	2701950	11/1990	A	R	A	R	03/1991	R	R	R	R	R
CHORRILLOS	2701035	04/1969	A	R	R	R	09/1968	A	R	R	R	R
CALDAS	2701036	04/1968	A	R	R	R	12/1964	R	R	R	R	R
VILLAHERMOSA	2701045	04/1962	A	R	R	R	09/1968	R	R	R	R	R
GABINO	2701066	08/1969	A	R	A	R	06/1984	A	A	R	A	R

ESTACIÓN		MEDIA				VARIANZA						
NOMBRE	CÓDIGO	CAMBIO	1	2	3	4	CAMBIO	1	2	3	4	5
PALMAS LAS	2308023	04/1988	A	R	R	R	05/1962	A	R	R	R	R
FE LA	2308021	03/1950	A	R	A	R	10/1961	R	R	R	R	R
SEVERA LA	2308022	04/1962	A	R	R	R	09/1968	A	A	R	R	R
VASCONIA	2308024	04/1949	A	A	A	R	03/1977	A	A	R	A	R
MOSCA LA	2308026	04/1962	A	R	A	R	09/1968	A	A	R	A	R
RIONEGRO LA MACARE	2308027	12/1975	A	R	A	R	05/1983	A	A	R	R	R
RIOABAJO	2308034	05/1970	A	R	A	R	08/1988	R	R	R	R	R

Fuente: Red Río Fase I, 2003.

Tabla A2.6. Pruebas de homogeneidad a nivel anual de las estaciones de precipitación

ESTACIÓN		MEDIA				VARIANZA					TENDENCIA					
NOMBRE	CÓDIGO	CAMBIO	1	2	3	4	CAMBIO	1	2	3	4	5	1	2	3	4
BOQUERON	2701078	1976	R	R	R	R	1981	R	A	R	R	R	A	A	A	A
MESETA LA SN PE	2701080	1979	R	R	A	R	1979	R	A	R	A	R	A	A	A	A
STA HELENA	2701081	1987	A	R	A	A	1994	R	R	R	R	R	R	A	A	A
CUCHILLA LA	2701082	1976	A	A	A	R	1981	R	A	R	R	R	A	A	A	A
ASTILLEROS	2701111	-	A	#	#	A	1997	R	#	R	A	R	A	A	A	A
IGUANA LA	2701112	-	A	#	#	A	1996	R	#	R	A	R	A	A	A	A
OLAYA HERRERA	2701507	-	A	A	A	A	-	A	A	A	A	A	A	A	A	A
TULIO OSPINA	2701509	-	A	A	A	A	1992	A	A	R	A	R	A	A	A	A
PIEDRAS BLANCAS	2701512	-	A	#	#	A	1973	R	#	R	A	R	A	A	A	A
PROGRESO HDA EL	2701515	-	A	A	A	A	1988	R	R	R	R	R	A	A	A	A
SALADA LA	2701526	1993	A	A	A	R	1998	R	R	R	R	R	A	A	A	A
MAZO	2701034	1976	A	A	A	R	1988	A	A	R	A	R	A	A	A	A
FABRICATO	2701037	1970	A	R	R	R	1988	R	A	R	A	R	A	A	A	A
SAN ANTONIO DE PRADO	2701038	1969	A	A	A	R	1970	R	R	R	R	R	A	A	A	A
SAN CRISTOBAL	2701046	1970	A	A	A	R	1977	A	A	R	A	R	A	A	A	A
MIGUEL DE AGUINA	2701047	-	A	A	A	A	1992	A	A	R	A	R	A	A	A	A
GIRARDOTA	2701056	-	A	A	A	A	1986	R	A	R	A	R	A	A	A	A
BARBOSA	2701057	1980	R	R	R	R	1978	R	A	R	R	R	R	R	R	R
BOQUERON	2701062	-	A	A	A	A	1975	R	R	R	R	R	A	A	A	A
NIQUIA	2701076	1991	A	A	A	R	1996	A	A	R	A	R	A	A	A	A
AYURA	2701093	-	A	A	A	A	1982	A	A	R	A	R	A	A	A	A
CUCARACHO	2701114	-	A	A	A	A	1997	A	A	R	A	R	A	A	A	A
ASTILLERO	2701115	-	A	#	#	A	1996	A	#	R	A	R	A	A	A	A
EL CONVENTO COPACABA	2701122	-	A	#	#	A	1997	A	#	R	A	R	A	A	A	A
MANANTIALES	2701950	-	A	A	A	A	1991	A	A	R	A	R	A	A	A	A
CHORRILLOS	2701035	1970	A	R	R	R	1970	A	A	R	A	R	R	R	R	R
CALDAS	2701036	1968	A	R	R	R	1971	R	R	R	R	R	R	R	R	R
VILLAHERMOSA	2701045	1962	A	R	R	R	1970	A	A	R	A	R	R	R	R	R
GABINO	2701066	1969	A	R	R	R	1976	A	A	R	A	R	R	R	R	R

ESTACIÓN		MEDIA				VARIANZA					TENDENCIA						
NOMBRE	CÓDIGO	CAMBIO	1	2	3	4	CAMBIO	1	2	3	4	5	1	2	3	4	
PALMAS LAS	2308023	1988	A	R	R	R	1988	A	A	R	A	R	R	R	R	R	R
FE_LA	2308021	1962	A	R	A	R	1984	A	A	R	A	R	A	A	A	A	A
SEVERA_LA	2308022	1962	A	R	R	R	1963	A	A	R	A	R	R	R	R	R	R
VASCONIA	2308024	1969	A	A	A	R	1980	A	A	R	A	R	A	A	A	A	A
MOSCA_LA	2308026	1969	A	A	A	R	1962	A	A	R	A	R	A	A	A	A	A
RIONEGRO_LA_MACARE	2308027	1976	A	R	R	R	1985	A	A	R	A	R	A	A	A	A	A
RIOABAJO	2308034	1969	A	R	R	R	1988	R	R	R	R	R	A	A	A	A	A

Fuente: Red Río Fase I, 2003.

Tabla A2.7. Pruebas de homogeneidad a nivel mensual de las estaciones de caudal

ESTACIÓN		MEDIA				VARIANZA						
NOMBRE	CÓDIGO	CAMBIO	1	2	3	4	CAMBIO	1	2	3	4	5
RM-7 Piedras Blancas	2701709	01/1992	R	R	R	R	10/1986	R	R	R	R	R
RM-8 Chorrillos	2701710	10/1970	A	R	R	R	01/1976	R	R	R	R	R
MEDELLIN_CALDAS RM	2701716	05/1984	A	R	A	R	06/1986	R	A	R	R	R
MEDELLIN_ANCON SUR	2701727	01/1991	R	R	R	R	12/1990	R	R	R	R	R
Q. EL HATO_RM-9	2701731	09/1969	A	A	A	R	12/1976	R	R	R	R	R
MEDELLIN_SALADA LA	2701733	01/1976	R	R	R	R	01/1976	R	R	R	R	R
MEDELLIN_MACHADO R	2701734	04/1981	A	R	R	R	06/1982	R	A	R	R	R
MEDELLIN_YARUMITO	2701735	06/1995	A	R	R	R	08/1988	R	R	R	R	R
RMS-15 Gabino	2701736	07/1995	A	R	A	R	03/1996	A	A	R	A	R
MEDELLIN_HATILLO EL	2701738	04/1994	A	R	R	R	09/1986	R	R	R	R	R
Q. LA GARCIA_EMBAL	2701765	05/1995	A	R	A	R	05/1995	A	A	R	A	R
MEDELLIN_ANCON NOR	2701781	10/1994	A	R	R	R	07/1994	A	A	R	A	R
RMS-22 GIRARDOTA	2701803	12/2000	R	R	R	R	11/2000	A	A	R	A	R

Fuente: Red Río Fase I, 2003.

Tabla A2.8. Pruebas de homogeneidad a nivel anual de las estaciones de precipitación

ESTACIÓN		MEDIA				VARIANZA					TENDENCIA						
NOMBRE	CÓDIGO	CAMBIO	1	2	3	4	CAMBIO	1	2	3	4	5	1	2	3	4	
RM-7 Piedras Blancas	2701709	1992	R	R	R	R	1988	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
RM-8 Chorrillos	2701710	1970	A	R	R	R	1976	R	A	R	R	R	A	A	A	A	A
MEDELLIN_CALDAS RM	2701716	-	A	#	#	A	1985	A	#	R	A	R	A	A	A	A	A
MEDELLIN_ANCON SUR	2701727	1991	R	R	R	A	1988	R	A	R	A	R	R	R	R	R	R
Q. EL HATO_RM-9	2701731	-	A	#	#	A	1976	R	#	R	R	R	A	A	A	A	A
MEDELLIN_SALADA LA	2701733	1976	R	#	#	A	1978	A	#	R	A	R	A	A	A	A	A
MEDELLIN_MACHADO R	2701734	-	A	#	#	A	1982	R	#	A	A	R	A	A	A	A	A
MEDELLIN_YARUMITO	2701735	1995	A	R	R	A	1991	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
RMS-15 Gabino	2701736	-	A	A	A	A	1992	A	A	R	A	R	A	A	A	A	A
MEDELLIN_HATILLO EL	2701738	1994	A	R	R	A	1986	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Q. LA GARCIA_EMBAL	2701765	-	A	#	#	A	1991	A	#	R	A	R	A	A	A	A	A

ESTACIÓN		MEDIA				VARIANZA					TENDENCIA					
NOMBRE	CÓDIGO	CAMBIO	1	2	3	4	CAMBIO	1	2	3	4	5	1	2	3	4
MEDELLIN _ ANCON NOR	2701781	-	A	#	#	A	1992	A	#	R	A	R	A	A	A	A
RMS-22 GIRARDOTA	2701803	-	A	#	#	A	1999	R	#	R	A	R	A	A	A	A

Fuente: Red Río Fase I, 2003.

Los análisis de los resultados para las estaciones de las tablas anteriores describen para cada una los posibles saltos en la media, la varianza, la tendencia de la varianza, la tendencia de la media, dispersión de datos, y la periodicidad tanto de la media como de la varianza.

A2.3 ANÁLISIS DEL CAMPO DE LLUVIA EN LA CUENCA DEL RÍO ABURRÁ

El proceso de toma de decisiones en la planificación de los recursos hidráulicos y la gestión de cuencas en una determinada región se basa en la información histórica de las variables hidrológicas que la caracterizan y el adecuado uso de los recursos naturales, con la participación consciente y activa de todos los actores presentes en la cuenca. Dentro de estos actores, la precipitación es la variable hidrológica que tiene mayores registros en el tiempo y cobertura espacial en toda la Cuenca del río Aburrá, además, de tener importantes efectos sobre la escorrentía y por lo tanto en los flujos de las corrientes de agua. Por ello, se hacen una serie de análisis a esta variable considerando la variabilidad espacio-temporal de la precipitación a diferentes escalas: anual, diaria y horaria. Se presenta la incidencia de los fenómenos macroclimáticos en el patrón de lluvia para diferentes escenarios y se hace una búsqueda de señales de cambio climático por medio de un análisis exploratorio a la serie de precipitación Miguel de Aguinaga, cuya medición alcanza casi cien años de registro en la Cuenca del río Aburrá.

A2.3.1 Caracterización a escala anual

El clima varía naturalmente en diferentes escalas de tiempo y espacio. Dentro de sus fluctuaciones temporales, se considera la estacional como una de la más trascendencia en la determinación y modulación de procesos atmosféricos (IDEAM, 1999). La Fluctuación estacional corresponde a la fase del clima a escala mensual. En latitudes medias, las secuencia de las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño es algo común para los habitantes de dichas regiones, en tanto que en latitudes tropicales, lo frecuente es la alternancia de temporadas lluviosas y temporadas secas. En la Figura A2.8 se aprecia el ciclo anual de la lluvia en varias estaciones de la Cuenca del río Aburrá. Se puede observar un comportamiento bimodal en todas las estaciones, con

valores máximos durante los períodos abril-mayo y octubre-noviembre y valores mínimos en los períodos de diciembre-enero y julio-agosto. El incremento de la lluvia durante los meses de mayo y octubre es importante para todas las estaciones analizadas, siendo una señal que se da a nivel interanual como resultado a la migración de la Zona de Confluencia Intertropical - ZCIT, considerada como una de las más importantes fluctuaciones climáticas de la escala estacional que controla el comportamiento climático en el trópico suramericano y el caribe y que se da como resultado del ciclo anual de temperaturas superficiales por efecto de la insolación, constituyendo un mecanismo que explica claramente el ciclo anual de la hidroclimatología de Colombia (Poveda, 2004).

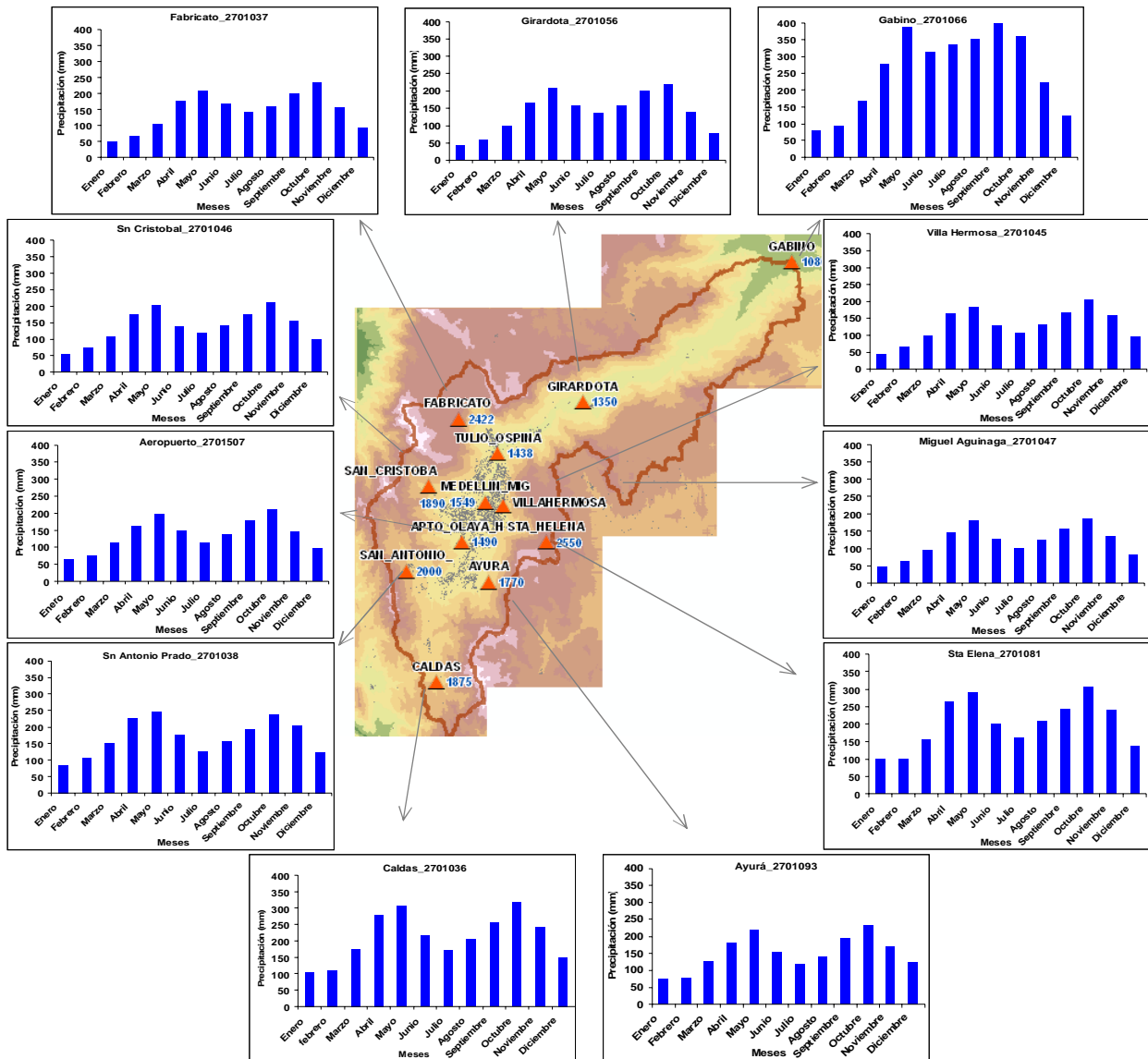
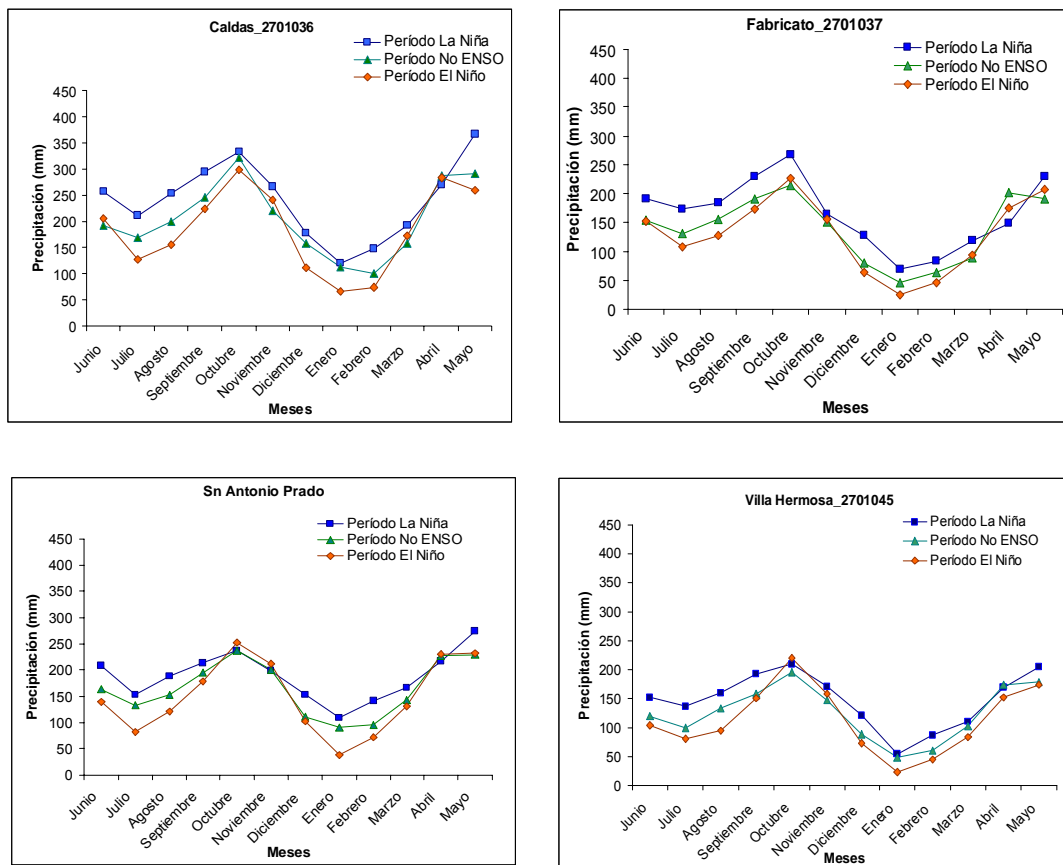


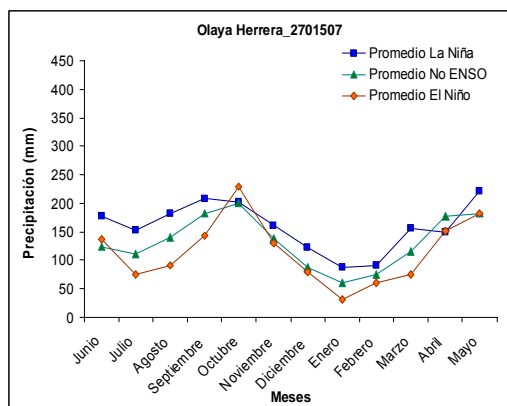
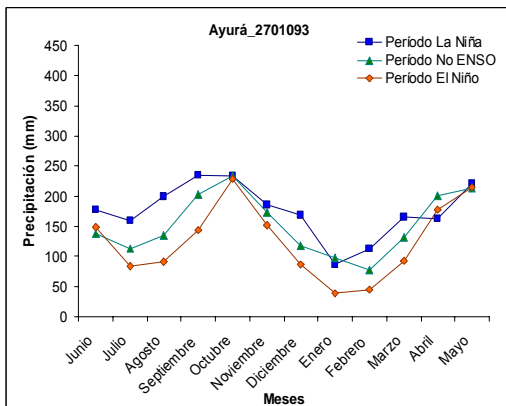
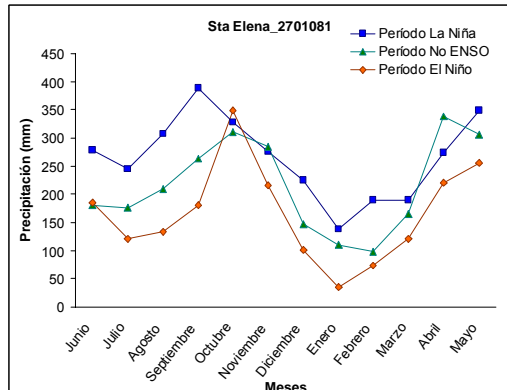
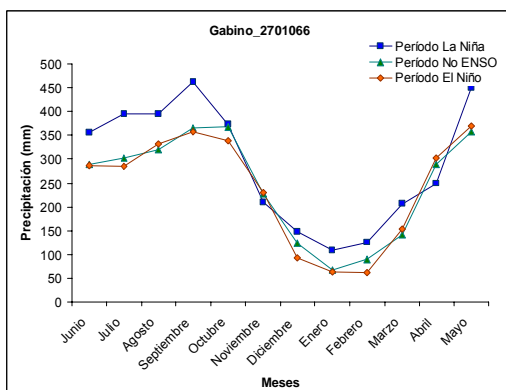
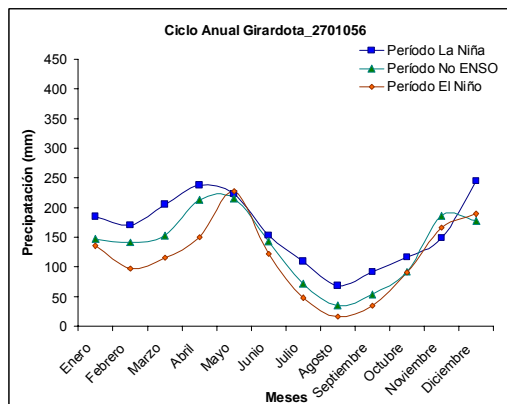
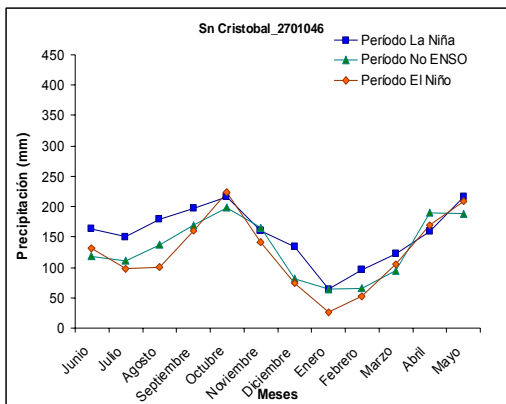
Figura A2.8. Mapa Ciclo anual de la lluvia en la Cuenca del río Aburrá

Existen pruebas de la variabilidad climática a diferentes escalas temporales en la región tropical de Suramérica. Esta variabilidad en el clima normalmente tiene que ver con fenómenos que ya han producido impactos que se verían acentuados por el calentamiento global y sus cambios meteorológicos y climáticos. (IPCC, 2001).

El Niño en su fase calida y la Niña en su fase fría constituyen las fases extremas del fenómeno oceanoatmosférico conocido como El Niño-Oscilación del SUR (ENSO). Ambas fases se encuentran asociadas a anomalías hidrológicas que ocurren en el trópico suramericano. Este fenómeno es la causa de una gran parte de la variabilidad climática a escala interanual en América Latina.

Bajo este contexto se presenta en la Figura A2.9 para el ciclo anual, un análisis del comportamiento de la lluvia mensual de las estaciones de precipitación de la Cuenca del río Aburrá discretizado para los años en que ocurrieron eventos tipo ENSO (El Niño – Oscilación del Sur) según clasificación de la NOAA.





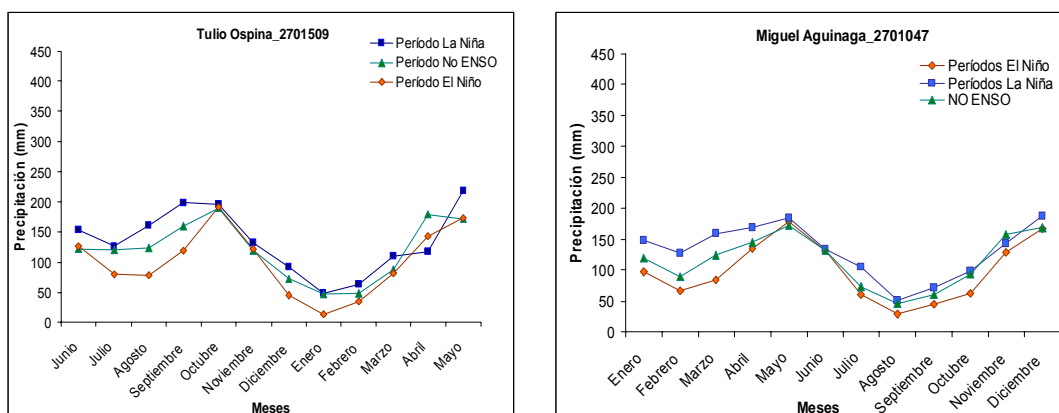


Figura A2.9. Ciclo Anual discretizado por años de eventos ENSO (El Niño-Oscilación del Sur)

Gráficamente se observa que no hay un comportamiento claro en los meses de mayores registros de lluvia (abril-mayo y octubre-noviembre). Ello se puede entender como la interrelación que se presenta en los períodos ENSO con los desplazamientos de la ZCIT intranualmente.

En la Tabla A2.9 se muestran los resultados para la media y la desviación de las estaciones analizadas. Puede observarse que la media para los años La Niña siempre es notablemente mayor a los de períodos de El Niño.

Tabla A2.9. Media y desviación típica (mm) de las precipitaciones medias mensuales de la Cuenca del río Aburrá para los años El Niño, La Niña y No ENSO. Los años hidrológicos de consideraron de junio (0) a Mayo (+1)

ESTACIÓN	REGISTRO NORMAL		AÑOS/ EL NIÑO		AÑOS/ NIÑA	
	Media	Desv. Típ.	Media	Desv. Típ.	Media	Desv. Típ.
CALDAS	204.6	97.3	184.9	102.2	241.1	106.8
FABRICATO	139.2	78.7	129.8	81.1	166	92.2
S ANTONIO PRADO	165.1	79.3	149.6	91.3	188.7	83
VILLA HERMOSA	125.3	67.3	113.4	72.9	147.2	75.7
SAN CRISTOBAL	132.1	71.4	124.5	77.3	155.1	73.2
GIRARDOTA	135.6	86.4	116.1	82.2	162.6	86.2
GABINO	244.9	136.2	239.4	146.8	289.7	159
SANTA ELENA	215.8	119.9	166	122.6	265.8	157
AYURÁ	152.8	76.7	125.2	74.8	175.5	77.6
AEROPUERTO	132.6	67.6	115.2	72	159	70.6
TULIO OSPINA	119.7	70.5	100.4	69.1	134.7	73.3
MIGUEL AGUINAGA	115.1	59.5	98.8	61.1	131.5	66.4

También se observa que durante los años La Niña la precipitación media de la Cuenca del río Aburrá tiene valores por encima de los promedios de los períodos normales.

Este análisis nos permite dar un indicativo de la variación de la lluvia en la Cuenca del río Aburrá con respecto al fenómeno ENSO y las manifestaciones de sus fases extremas El Niño y La Niña. Para todas las estaciones se observa la influencia que tiene el fenómeno macroclimático sobre el campo de lluvias de la Cuenca del río Aburrá.

▪ **Análisis del Cambio Climático en la Cuenca del río Aburrá**

La temperatura promedio del planeta ha aumentado aproximadamente 0.6°C en los últimos 135 años, con el mayor calentamiento concentrado en los últimos 15 años (WMO, 1995). Hay evidencias serias sobre la relación de este calentamiento con el incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (Thomson, 1995). Esto incluye cambios en los regímenes de lluvias, evaporación y escorrentía.

En Colombia hay reportes acerca del incremento de algunas variables atmosféricas citados en Hense et al. (1988). Poveda et al., (2001) sintetizan que existen tendencias de calentamiento que se observa en las series de temperaturas mínimas y que concuerda con las series de temperaturas medias. Las series de punto de rocío y presión de vapor indican un aumento en la humedad atmosférica donde las tendencias coinciden con el calentamiento. Sin embargo las series de precipitación no muestran señales claras de cambio climático.

Dada las condiciones de información climatológicas con que cuenta la Cuenca del río Aburrá, se tiene que la variable de mayor registro continuo en el tiempo es la precipitación. Las demás variables como humedad atmosférica, punto de rocío, presión de vapor y temperatura presentan registros interrumpidos o suspendidos en el tiempo en el historial de las series de esas variables.

Para este análisis se tomó la precipitación como la variable hidrológica de mayor registro en la Cuenca del río Aburrá (desde 1908) y se buscó por medio de la Estación Miguel de Aguinaga_2701047, que es la de mayor registro histórico de medición, identificar señales de cambio climático, efectuando una serie de pruebas estadísticas, en términos de cambios en la media, en la varianza y existencia de tendencias en la serie.

Aunque la serie tiene un largo registro temporal, la estación ha sido removida de sus puntos de medición varias ocasiones a distancias máximas de 3 kilómetros lo que restringe los análisis que se deseen hacer. Sin embargo para datos anuales como es el caso, no es relevante debido a que la escala anual es robusta y las mediciones que se efectúan no representan variaciones que interfieran la dinámica de la lluvia a esta escala. Caso contrario cuando se tienen datos diarios o mensuales donde hay mayor variabilidad de la lluvia por incidencia de fenómenos de corta escala.

La estación cuenta con mediciones de registros desde 1908 hasta 2004 (96 años). La serie anual de presenta en la Figura A2.10.

Un análisis gráfico al comportamiento de la serie anual refleja una tendencia decreciente, para el conjunto de años por lo que se adopta la aplicación de metodologías de análisis de homogeneidad por medio de la herramienta ANSET (Análisis de series de tiempo) del programa HidroSIG.

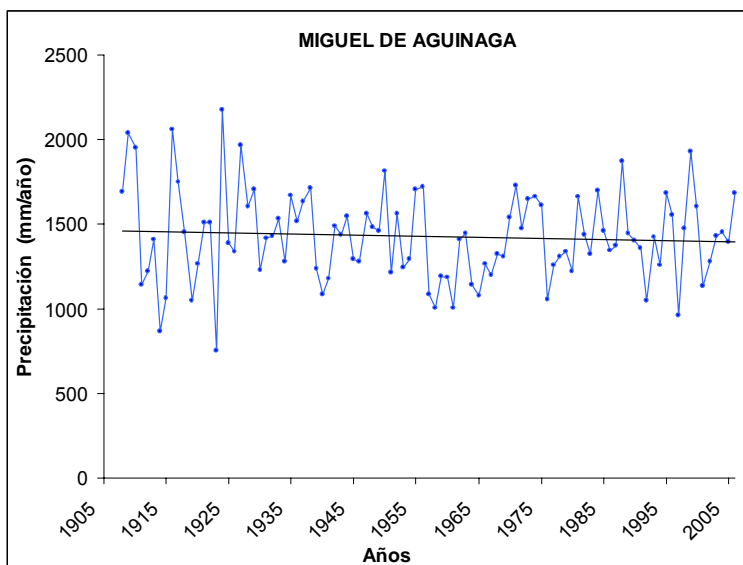


Figura A2.10. Serie anual de precipitación en la Estación Miguel de Aguinaga_2701047

▪ **Análisis de homogeneidad**

Dentro de las herramientas estadísticas, existe el análisis de homogeneidad como la que nos ayuda a interpretar y cuantificar en que momento y de que magnitud se presentan cambios de la media, la varianza y tendencias en una serie de tiempo. Las pruebas realizadas se resumen a continuación.

Tabla A2.10. Cambio en la media

PRUEBA	NIVEL SIGNIFICANCIA	RESULTADO
Sumas acumuladas	0.05	No hay cambios en la media
Abbe	0.05	No hay cambios en la media
Petit	0.05	Cambio en 1935 magnitud 6.12 mm

Tabla A2.11. Cambio en la varianza

PRUEBA	NIVEL SIGNIFICANCIA	RESULTADO
Barlet	0.05	No hay cambios en la varianza
F modificada	0.05	No hay cambios en la varianza

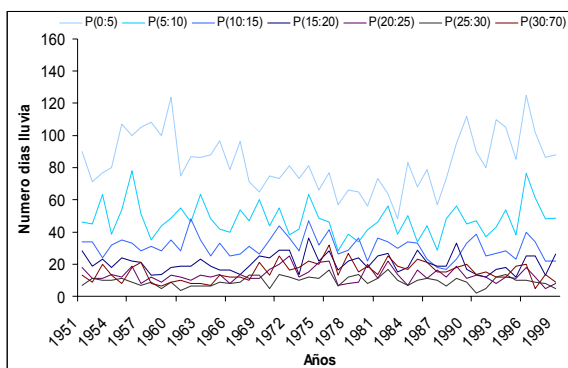
Tabla A2.12. Tendencia en la media

PRUEBA	NIVEL SIGNIFICANCIA	RESULTADO
Prueba T	0.05	Se acepta la hipótesis de tendencia
Hotelling-Pabst	0.05	Se rechaza la hipótesis de tendencia
Mann-Kendall	0.05	Se acepta la hipótesis de tendencia
Sen	0.05	Se rechaza la hipótesis de tendencia

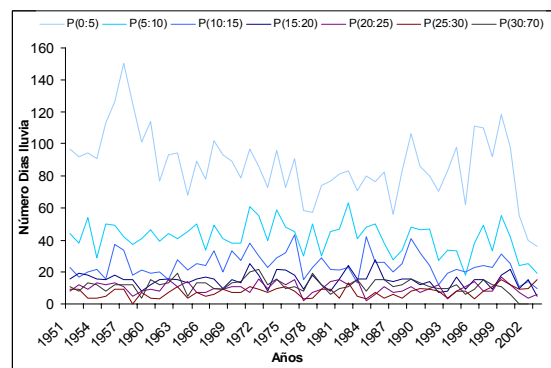
Los anteriores resultados dejan ver que existe no se presentan un cambio claro en la media para la totalidad de las pruebas. Para la varianza no se registran cambios mientras que si hay tendencia en dos de las pruebas y de rechazo en las otras. Estas metodologías son sensibles a varios factores como la media, la desviación estándar lo que no permite tener conclusiones claras. Además de lo expuesto por Poveda et al., (2001) anteriormente sobre las series de precipitación, existen factores locales, de urbanización e industrialización que pueden incidir en la dinámica de la lluvia local en el tiempo.

▪ **Caracterización a escala diaria**

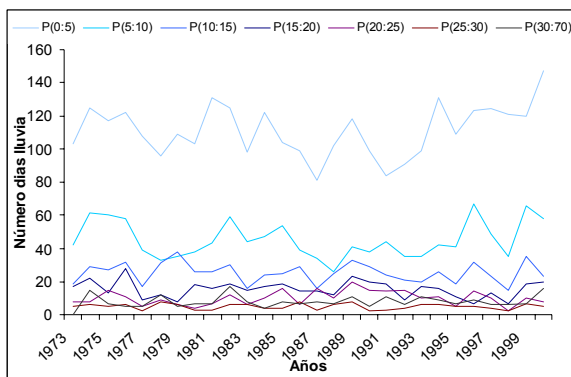
Con el fin de entender como es el comportamiento de la lluvia en los registros diarios de precipitación se hizo un análisis de los registros para diferentes umbrales. Esto es, cuantos días de un año hubo lluvias en un rango determinando. Se definieron 7 umbrales de lluvia, así: P(0-5), corresponde a la precipitación que se tuvo entre 0 mm y 5 mm. P(5-10) a la precipitación entre 5 mm y 10 mm; luego P(10-15) y así sucesivamente hasta P(30-70). Allí se pudo observar que a medida que se incrementan los valores del umbral de lluvia el número de días disminuye, lo que indica que la mayoría de los registros de lluvia de un año se dan dentro del primer umbral; P(0-5). La Figura A2.11 muestra para cada serie analizada el registro de número de días con precipitación dentro del umbral señalado.



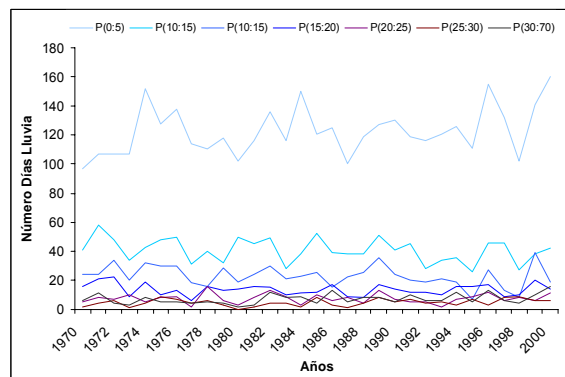
Caldas



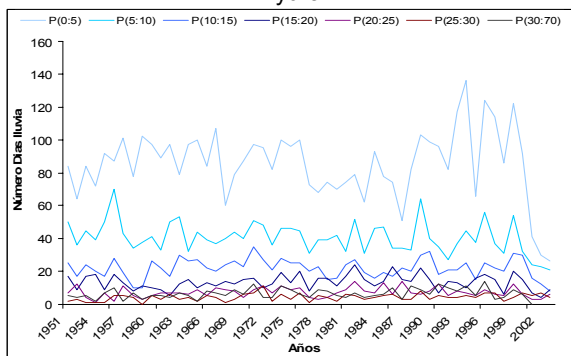
San Antonio Prado



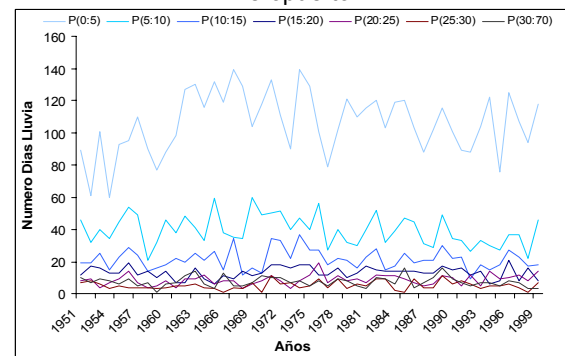
Ayurá



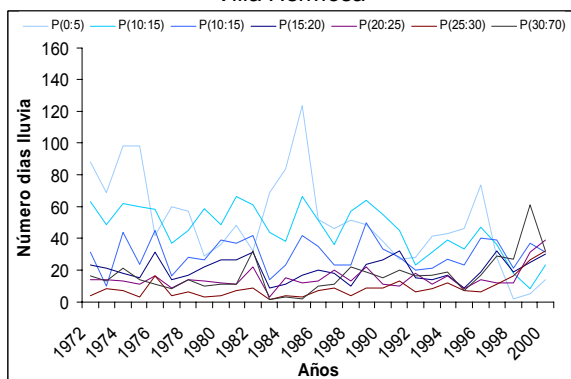
Aeropuerto



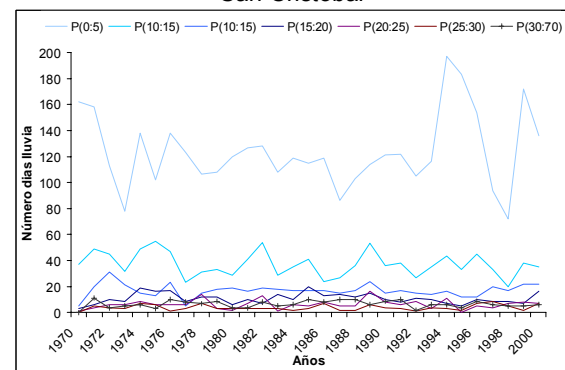
Villa Hermosa



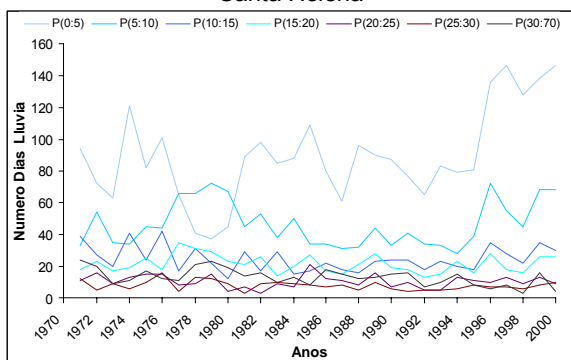
San Cristobal



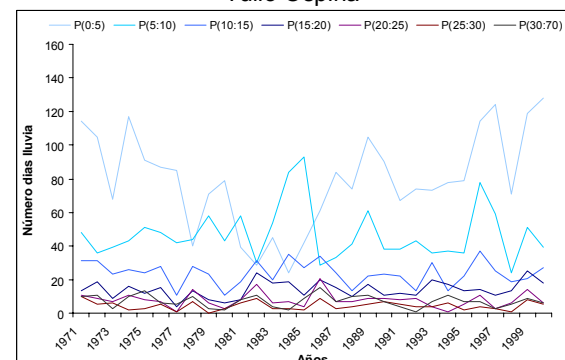
Santa Helena



Tulio Ospina



Barbosa



Girardota

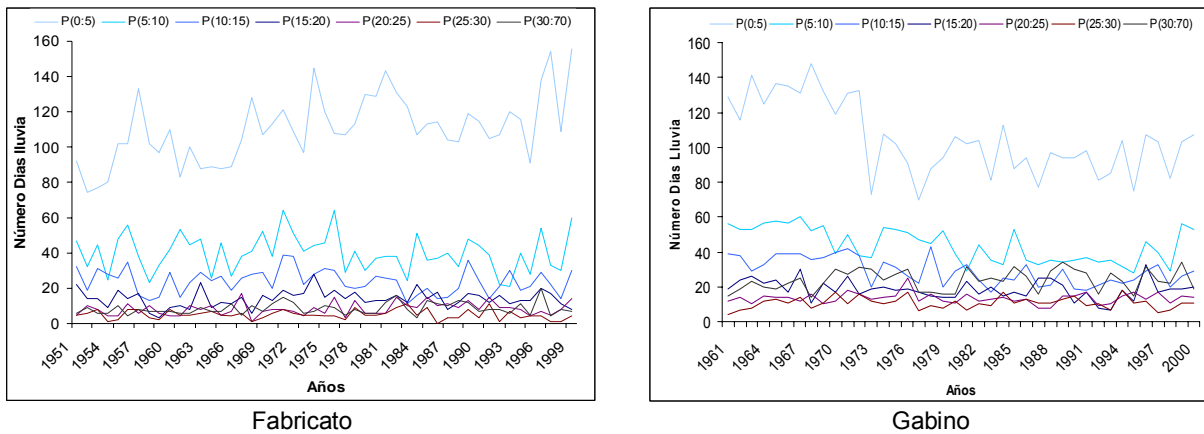


Figura A2.11. Número de días con precipitación para cada serie de la Cuenca del río Aburrá

Se observa que el primer umbral P(0-5) es el que más registros de días tiene en la totalidad de las estaciones para todos los años. Los umbrales de mayor registro de lluvia se dan entre 5 y 15 días al año siendo los menos recurrentes en la historia de las series.

Para la búsqueda de tendencias de las series a esta escala, se plantea un análisis de probabilidad de lluvia, con el fin de entender posibles cambios o tendencias en las series a esta escala. El procedimiento consiste en construir el histograma acumulado de frecuencias y a posteriormente estimar los cuantiles de precipitación.

A partir de las series diarias se estima para cada año climático (Junio del año 1 a Mayo del año 2) la función de distribución acumulada empírica y se estiman los valores correspondientes a los cuantiles de 10, 30, 50, 70 y 90%. Para la precipitación se desprecian los cuantiles de 10 y 30% dado que son, en la mayoría de los casos, iguales a cero y no ofrecen posibilidad de análisis. Como resultado se obtienen series anuales para cada cuantil de distribución de la serie de tiempo original.

Se dividió la Cuenca del río Aburrá en zona sur, zona centro y zona norte, con el fin de identificar cambios y diferencias en las tendencias de las series para cada zona. Las Figura A2.12 Figura A2.13 y Figura A2.14 muestran el comportamiento de los cuantiles de precipitación para cada zona.

Para las series de cuantiles para las tres zonas de la Cuenca del río Aburrá, se obtienen resultados diversos en cuanto a tendencias de las series. Para la zona sur se encontró que no se presenta tendencia alguna para los cuantiles excepto para la del cuantil del 70% de una sola serie. En la zona centro donde el entorno ambiental es netamente urbano se encontró que hay tendencias crecientes para los cuantiles de precipitación superiores, esto es para los registros de lluvia de mayor medición.

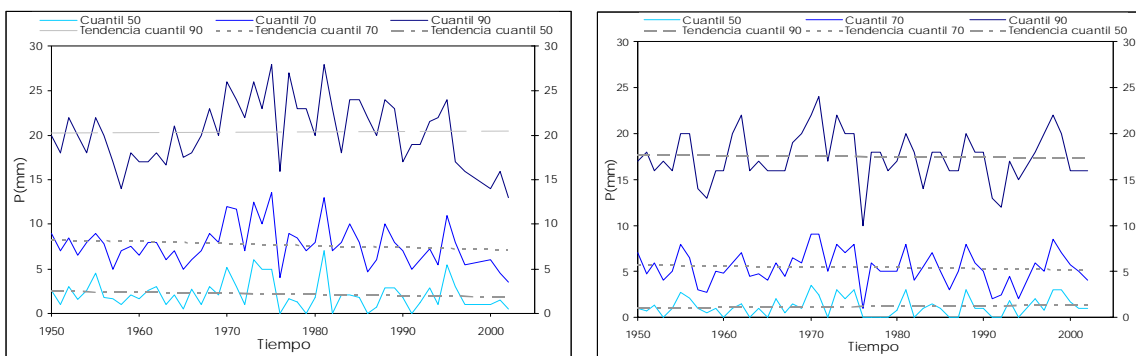


Figura A2.12. Series de cuantiles de las estaciones Caldas y San Antonio correspondientes a la zona sur de la Cuenca del río Aburrá

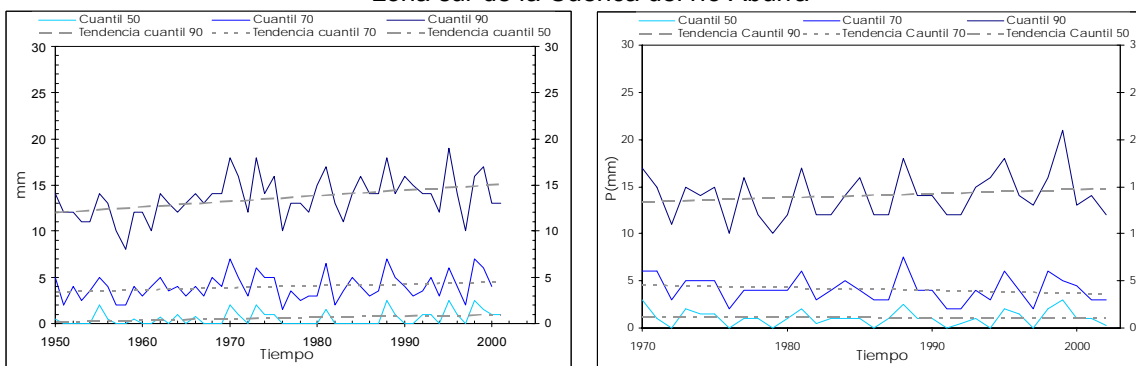


Figura A2.13. Series de cuantiles de las estaciones Villa hermosa y Aeropuerto correspondientes a la zona centro de la Cuenca del río Aburrá

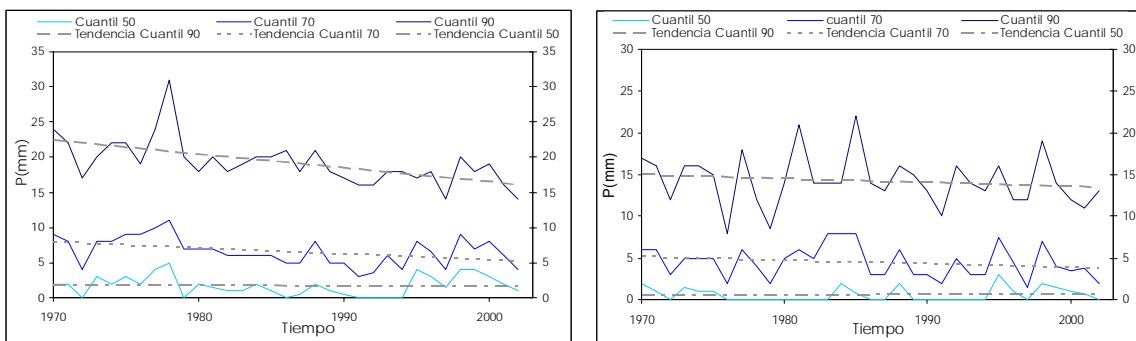


Figura A2.14. Series de cuantiles de las estaciones Barbosa y Girardota correspondientes a la zona norte de la Cuenca del río Aburrá

No podemos hablar de intensidades ni eventos debido a que los registros aquí tenidos en cuenta son los totales del día a día y la escala temporal no llega a considerar eventos de corta duración.

Para la zona norte de la Cuenca del río Aburrá se encontró que existen tendencias decrecientes en las series de los cuantiles del 70 y 90% lo que da indicios de una dinámica de esta variable muy significativa a lo largo de la Cuenca del río Aburrá.

A2.3.2 Caracterización a escala diurna

El ciclo diurno de temperaturas es una característica dominante en la variabilidad climática e hidrológica en las regiones tropicales, que excede en mucho el rango de temperaturas del ciclo anual (Hastenrath, 1991). ¹ El ciclo diurno de la precipitación tiene repercusiones importantes en el entendimiento del clima tropical, sobre del que se desconocen aspectos fundamentales.

El ciclo diurno ha sido investigado de forma parcial en regiones detalladas de Colombia. El trabajo mas reciente realizado por Poveda et al., (2001) estudia el ciclo diurno de la precipitación en los Andes tropicales de Colombia, donde se entiende la dinámica hidrológica de esta variable a la escala diurna para tres subregiones de Colombia.

Con este análisis se busca entender las características generales del ciclo diurno de la precipitación de la Cuenca del río Aburrá en cuanto a su variabilidad temporal y espacial, mediante estudios del comportamiento horario a través del tiempo, de su variación en el ciclo anual y su relación con fenómenos macroclimáticos.

■ Información utilizada

Para el análisis del ciclo diurno de la zona del Valle, se tienen registros horarios de precipitación correspondientes a 10 estaciones pluviográficas. De estas estaciones, 8 están ubicadas en la Cuenca del río Aburrá y 2 en el Valle de San Nicolás, todas ellas suministradas por las Empresas Públicas de Medellín. La totalidad de la información corresponde a mediciones telemétricas continuas desde el año 1998 hasta el presente. La información de las estaciones analizadas se observa en la Tabla A2.13

Tabla A2.13. Estaciones seleccionadas para la caracterización del ciclo diurno

ESTACIÓN	MUNICIPIO	LOCALIZACIÓN		COTA (msnm)
		NORTE	ESTE	
CHORRILLOS	MEDELLIN	1,188,220	842,280	2353
MOSCA	GUARNE	1,189,300	847,000	2250
SEVERA	GUARNE	1,184,120	847,700	2170
VILLA HERMOSA	MEDELLIN	1,183,990	837,340	1690
GERONA	MEDELLIN	1,181,050	836,480	1675
AYURÁ	ENVIGADO	1,173,830	835,380	1770
LAS PALMAS	EL RETIRO	1,172,290	838,550	2495

¹ Citado en *Caracterización del ciclo diurno de los Andes tropicales*, Poveda, et al. 2001

ESTACIÓN	MUNICIPIO	LOCALIZACIÓN		COTA (msnm)
		NORTE	ESTE	
MIGUEL AGUINAGA	MEDELLIN	1,184,470	834,980	1549
MANANTIALES	BELLO	1,190,290	838,360	1790
CONVENTO	COPACABANA	1,192,002	842,964	1580

▪ **Ciclo diurno a largo plazo**

Una primera aproximación para caracterizar el ciclo diurno de precipitación de la zona en estudio consistió en estimar promedios horarios de precipitación como porcentaje del total diario. Esto se realizó con el objeto de comparar la variación en el porcentaje de precipitación durante cada hora del día entre las estaciones consideradas. La gran diferencia en la escala de valores promedios de precipitación horaria para estas estaciones fue decisiva para caracterizar el ciclo diurno de la lluvia en la Cuenca del río Aburrá

Los ciclos diurnos obtenidos para las estaciones seleccionadas se muestran en la Figura A2.15 donde se aprecia la variabilidad espacial del ciclo diurno de la lluvia para la zona de estudio.

Al analizar el comportamiento del ciclo diario de la precipitación utilizando los promedios horarios, se encontró que los ciclos diurnos obtenidos tienen un comportamiento bimodal donde las lluvias máximas se dan en las horas de la tarde entre las 13 y 15 horas (hora local) y en las primeras horas de la madrugada entre las 23 y 03 horas siendo las del segundo máximo las que tienen mayor amplitud y el que presenta las mayores cantidades de lluvia. La menor precipitación se da en primeras las horas de la mañana, entre las 07 y 10 horas hora local.

▪ **Ciclo anual del ciclo diurno**

Como se observa en la Figura A2.16, la serie presenta un comportamiento bimodal, es decir, que la región se caracteriza por la presencia alternada de dos estaciones muy lluviosas en el año. En promedio, la precipitación anual de la Cuenca del río Aburrá es del orden de los 1500 mm. Las dos temporadas lluviosas que se presentan muestran diferencias significativas que hay que tener en cuenta. Ambas temporadas registran las dos terceras partes de la lluvia anual, la otra tercera parte de la lluvia se distribuye en las temporadas menos lluviosas en el resto del año. La Figura A2.16 muestra el ciclo anual de la precipitación a partir de datos horarios.

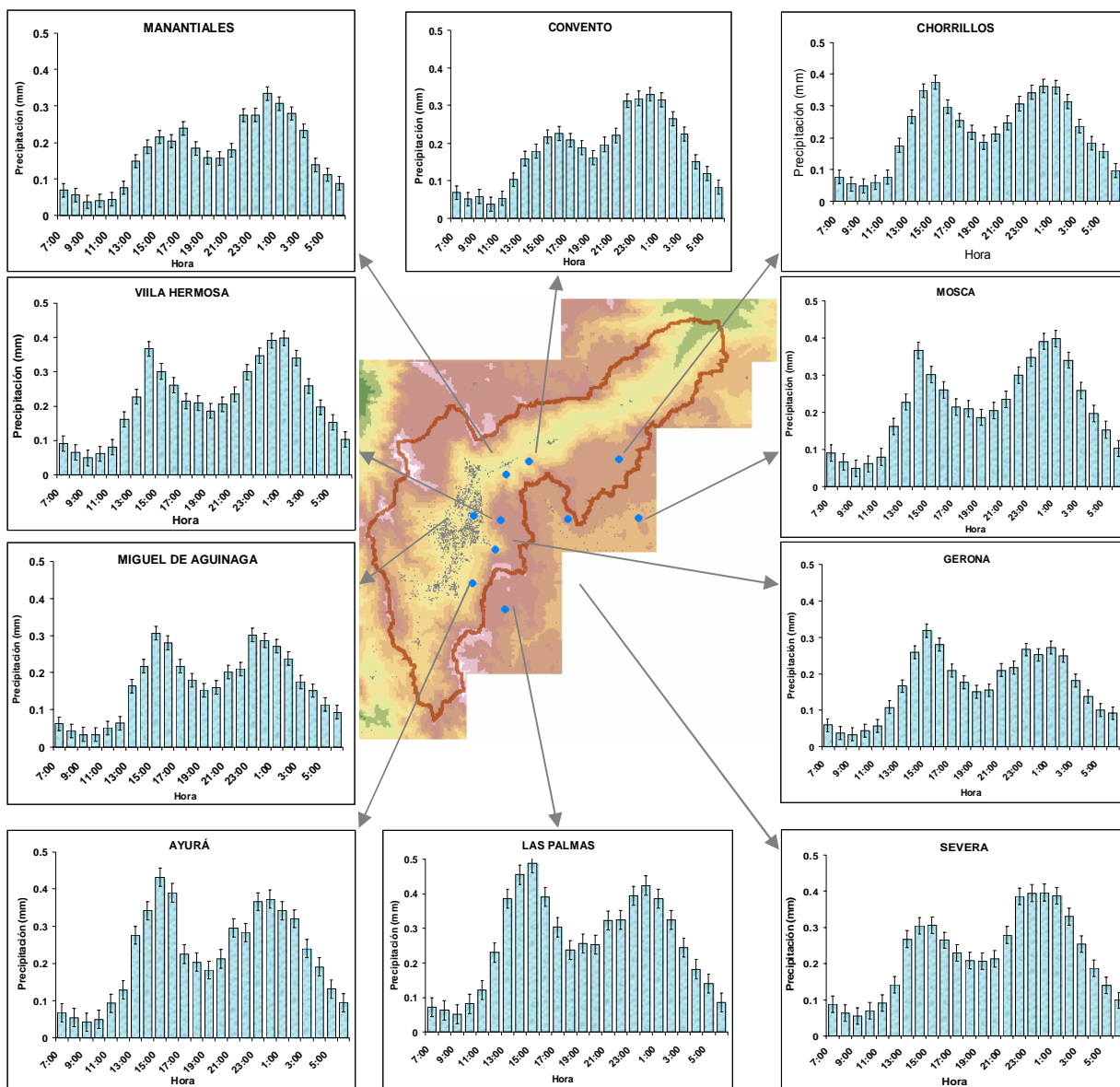


Figura A2.15. Ciclo diario de las estaciones de precipitación en la Cuenca del río Aburrá

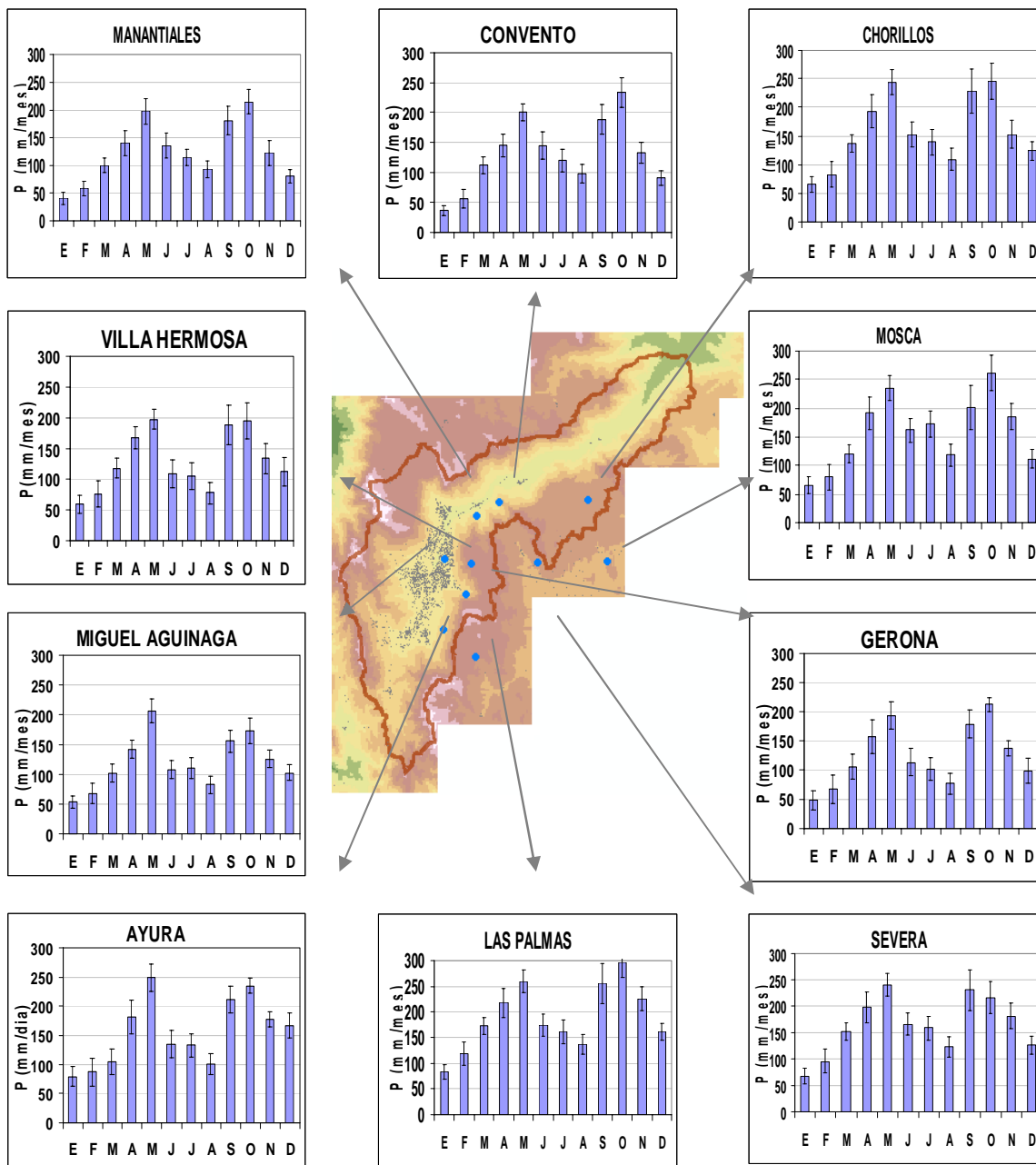


Figura A2.16. Ciclo anual de la precipitación a partir de datos horarios

A2.3.3 Conclusiones

Este análisis tuvo como objeto establecer un conocimiento sobre la cuantificación de la incidencia de fenómenos tipo ENSO sobre la precipitación de la Cuenca del río Aburrá y las manifestaciones de sus fases extremas, El Niño y La Niña.

Se pudo observar que existe una variación significativa en la disminución de la magnitud de la lluvia durante períodos El Niño e incremento para períodos La Niña de todas las estaciones. Cabe entenderse que esta conclusión es de gran utilidad en los estudios de planificación y operación de sistemas de recursos hidráulicos en la Cuenca del río Aburrá, puesto que tienen incidencia temporal en el régimen de caudales de las cuencas de la zona.

No fue posible encontrar señales claras de cambio climático con los análisis a la serie Miguel de Aguinaga. Este aspecto tuvo relevancia al tener como base el hecho de que la estación no ha permanecido en un mismo sitio en su historia, lo que ha generado incertidumbre en las lecturas que toma. Paralelamente, la Cuenca del río Aburrá no cuenta con una serie característica en el espacio y en el tiempo, que tenga registros continuos para conocer las variaciones que se han dado por el cambio climático y las posibles tendencias en el tiempo.

Caso contrario a la conclusión anterior, la Cuenca del río Aburrá tiene en la variable precipitación, los registros de mayor cubrimiento espacial sobre la zona y de mayor registro continuo en el tiempo, lo cual permite que sea esta variable, la más adecuada para análisis.

Con los datos a escala diaria se pudo conocer la existencia de cambios en los registros diarios de la precipitación sobre la zona de estudio. Se pudo observar por medio de los cuantiles, la probabilidad de la lluvia en diferentes umbrales, destacándose los cuantiles de precipitación superiores.

El ciclo diario permite entender las variaciones espacio temporales de la lluvia de corta duración y proveer un diagnóstico importante de las características de la distribución temporal de tormentas en la zona de estudio. La variación del ciclo diario de la lluvia se caracteriza por presentar distribución bimodal, con dos periodos de valores máximos y un mínimo principal con dos periodos de valores máximos y un mínimo principal. Las altas precipitaciones que se generan en la región presentan una mayor frecuencia y son más abundantes al iniciar la tarde y en las primeras horas al amanecer.

A2.3.4 Referencias Bibliográficas

AGUDELO, P., ARIAS, P., SALAZAR, L. Caracterización del ciclo diurno en los Andes Tropicales de Colombia. Trabajo dirigido de Grado. (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería Civil. Medellín 2001.

DGAC- DIRECCION METEOROLÓGICA DE CHILE. Documento de meteorología y nubes, año1995 [en línea] <<http://www.meteochile.cl/>> [citado en diciembre de 2006].

GIL, M. QUICENO, N., La influencia del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur sobre el Ciclo Anual de la Hidroclimatología de Colombia, Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1997.

MESA O. J., G. POVEDA, Y L. F. CARVAJAL, "Introducción al Clima de Colombia" Imprenta Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Bogotá, 1997. 378 p. ISBN: 958-628-144-2

MONTGOMERY, D. y RUNGER, G. Probabilidad y Estadística. McGraw Hill. México. 1996.

PÉREZ, C., POVEDA G., MESA O., CARVAJAL L., OCHOA A. Evidencias de cambio climático en Colombia: Tendencias y cambios de fase y amplitud de los ciclos anual y semianual. 2001. Medellín. Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.

POVEDA, G., SMITH, R., RUIZ, D., MESA, O., ACOSTA, Z. Análisis de homogeneidad de series de precipitación máxima anual de 24 horas en Colombia. Memorias XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología. IAHR, 2001. Guayaquil, Ecuador, 225-236, 1996. Medellín.

POVEDA, G., y MESA, O., Las fases extremas del ENSO - El Niño y La Niña - y su influencia sobre la hidrología de Colombia, Revista de Ingeniería Hidráulica en México, Vol XI, N° 1, pp:21-37, 1996.

RAVE, C., MANTILLA, R., POVEDA, G. Tendencias en La Distribución de Probabilidades de Lluvias y caudales en algunas cuencas colombianas. Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. 2001.

A2.4 MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA LA PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN

A continuación una breve explicación de las metodologías utilizadas para la proyección de la población (Unalmed, 2004).

A2.4.1 Método aritmético

Este método asume que la población tiene un crecimiento o decrecimiento lineal, balanceado por la mortalidad y emigración. El método es aplicable a pequeñas comunidades, zonas rurales o grandes ciudades con dificultad de expansión y escaso desarrollo económico. Este método utiliza la siguiente expresión:

$$P_2 = P_1 + (P_1 - P_0) \times \frac{n}{m}$$

Donde:

P_2 = Población del último año del periodo de diseño.

P_1 = Población en el año t_1

P_0 = Población en el año t_0

n = $t_2 - t_1$

m = $t_1 - t_0$

t_2 = Último año del periodo de diseño

t_1 = Año del censo P_1

t_0 = Año del censo P_0

A2.4.2 Método geométrico

Este método asume que la población posee un crecimiento balanceado similar al de la curva de interés compuesto. Se aplica a aquellas poblaciones que no han alcanzado su máximo desarrollo y que mantienen una tasa de crecimiento fija.

El método utiliza la siguiente ecuación:

$$P_2 = P_1 \times (1 + r)^n$$

Donde:

P_2 = Población del último año del período de diseño.

P_1 = Población del último censo.

n = $t_1 - t_0$

t_2 = Último año del período de diseño

t_1 = Año del censo P_1

r = Tasa de crecimiento geométrico dada como:

$$r = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

A2.4.3 Método de la variación logarítmica

Este método requiere como mínimo de tres censos, para este caso se utilizaron los censos de 1973, 1985 y 1993. Utiliza las siguientes variables:

P_i = Población en el año i .

P_2 = Población del último censo.

P_1 = Población penúltimo censo.

P_0 = Población del antepenúltimo censo

t_2 = Año último censo

t_1 = Año del penúltimo censo

t_0 = Año antepenúltimo censo

$$K_2 = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{t_2 - t_1} \quad \text{y} \quad K_1 = \frac{\ln P_1 - \ln P_0}{t_1 - t_0}$$

Donde

$$P = P_2 e^{(2K_2 - K_1)(t - t_2)}$$

A2.4.4 Método propuesto por la Universidad Nacional de Colombia

Este método se utiliza cuando se detectan problemas en las poblaciones, como la tendencia a desaparecer y exagerados crecimientos, es un método acotado propuesto por la Universidad Nacional de Colombia, el cual supone una población de saturación máxima en el caso de poblaciones crecientes o una población mínima para el caso de poblaciones decrecientes.

Las variables consideradas por este método son:

K = Constante de crecimiento o decrecimiento

P_0 = Población penúltimo censo

P_1 = Población último censo

P_i = Población para el período i .

t_0 = Año penúltimo censo

t_1 = Año último censo.

P_s = Población de saturación máxima

P_M = Población mínima posible.

Las ecuaciones para este método son:

Población creciente:

$$K = \frac{\ln(P_S - P_i) - \ln(P_S - P_0)}{t_i - t_0}$$

$$P_t = P_S - (P_S - P_{t-1}) \exp(K)$$

Población decreciente:

$$K = \frac{\ln(P_M) - \ln(P_0 - P_M)}{t_i - t_0}$$

$$P = P_M + (P_{t-1} - P_M) \exp(K)$$

En estudios realizados por la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (Unalmed, 2004), se han usado poblaciones de saturación igual a tres veces la población inicial y población mínima posibles iguales a la mitad de la población inicial con resultados aceptables.

A2.4.5 Método de la curva de crecimiento

Este método supone que el crecimiento de la población obedece a una ley de variación constante de la tasa de crecimiento y en periodos de tiempo aproximadamente iguales. Sólo es aplicable cuando se dispone, como mínimo, de tres datos censales.

Sean P_0 , P_1 y P_2 los resultados de la población dados por los censos realizados en los tiempos t_0 , t_1 y t_2 respectivamente.

$t_2 - t_1$ es el periodo intercensal entre los censos P_2 y P_1

$t_1 - t_0$ es el periodo intercensal entre los censos de P_1 y P_0

$\frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1}$ es la tasa de crecimiento anual en el periodo $t_2 - t_1$

$\frac{P_1 - P_0}{t_1 - t_0}$ es la tasa de crecimiento anual en el periodo $t_1 - t_0$

Se debe cumplir que $t_2 - t_1 \cong t_1 - t_0 = m$

En los periodos intercensales, la variación de la tasa de crecimiento debe cumplir la desigualdad:

$$Q = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} - \frac{P_1 - P_0}{t_1 - t_0} > 0$$

La variación de la tasa para un periodo posterior debe ser aproximadamente igual a los periodos históricos:

$$R = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} + \left[\frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} - \frac{P_1 - P_0}{t_1 - t_0} \right]$$

La población para el año $t_2 + m$ esta dada por:

$$P_{(t_2+m)} = P_2 + R.m = P_3$$

Para hallar la población para un periodo posterior $t_2 + 2m$, la población P_4 sería:

$$P_{(t_2+2m)} = P_3 + (R+Q).m = P_4$$

Para un periodo posterior a $t_2 + n.m$ la población P_{n+2} será:

$$P_{(t_2+nm)} = P_{(n+2)} + (R+(n-1)Q).m = P_{n+2}$$

A2.4.6 Método de la tasa decreciente

La suposición de una tasa decreciente de crecimiento es uno de los métodos más confiables para estimar futuras poblaciones, requiere de mínimo tres datos censales para poder aplicar el método. Este método no es posible aplicarlo en poblaciones con tendencia creciente.

Para aplicar el método se procede a estimar la población de saturación, la cual puede ser definida por el usuario. En la propuesta original el método se recomienda definir la población de saturación utilizando la expresión:

$$S = \frac{2P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 - P_1^2(P_0 + P_2)}{P_0 \cdot P_1 - P_1^2}$$

Se calcula la constante de esta tasa K_d , mediante la expresión reducida:

$$\frac{dP}{dt} = K_d(S - P)$$

Donde: S: Población de saturación

P: Población histórica

K_d : Constante de la tasa decreciente de crecimiento.

P_0 : Es la población del antepenúltimo censo

P_1 : Es la población del penúltimo censo

P_2 : Es la población del último censo

Para una población futura, $K_d = \frac{-Ln \left[\frac{S-P}{S-P_0} \right]}{t-t_1}$, luego: $P = S - (S - P_1) \cdot e^{-k_d(t-t_1)}$

A2.4.7 Referencias Bibliográficas

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLIN y AGUAS Y AGUAS DE PEREIRA. Oferta y demanda hídrica, en la subregión No 1 del departamento de Risaralda con los municipios de Cartago y La Virginia. Medellín, 2004.

A2.5 ACUEDUCTOS COMUNITARIOS EN LA CUENCA DEL RÍO ABURRÁ

A2.5.1 Introducción

La población urbana está acostumbrada a recibir el agua para consumo doméstico a través de sistemas de gran escala, con fuentes de abastecimiento lejanas, de manera que no se crea ninguna relación con el territorio que provee el recurso. Salvo pequeños comités de usuarios, desconocidos para la mayoría, tampoco existe relación con la empresa que suministra el recurso, sólo se establece un vínculo a través del pago mensual de la factura. En algunas zonas periurbanas y en el sector rural, el panorama es diferente; el servicio de acueducto se presta a través de redes descentralizadas que utilizan aguas procedentes de corrientes cercanas y que muchas veces son administradas directamente por las comunidades.

El origen de estos sistemas se explica ante la ausencia de propuestas gubernamentales para la prestación del servicio, muchos asentamientos informales resolvieron por sí mismos el suministro de agua potable creando acueductos que aun subsisten. No puede desconocerse sin embargo, que en ocasiones ha sido el estado quien ha promovido este tipo de organizaciones, aportando capital para que la comunidad cree su propio acueducto.

A pesar de que estas organizaciones comunitarias no son visibles, su importancia en la prestación de este servicio es significativa en términos cualitativos y cuantitativos. La Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios calcula que en el país existen unos 12,000 acueductos comunitarios (www.sui.gov.co), determinantes en la calidad de vida de muchos sectores donde no existe otra opción para acceder al servicio.

Pero su importancia no sólo radica en el suministro del agua sino en que en muchas ocasiones se convierten en puntos donde se articula la vida social de una comunidad, constituyendo un elemento clave del tejido social. Podría decirse que un acueducto comunitario es la institución que mejor ejemplifica el tema de la gestión integral del recurso hídrico porque a su alrededor confluyen con interrelaciones muy visibles, variables de orden ambiental, social, institucional, político y económico.

Durante las etapas de diagnóstico y formulación del Plan de Ordenación de la Cuenca del río Aburrá (POMCA), la presencia de acueductos comunitarios ha derivado discusiones relacionadas con tres temas específicos, asociados al ordenamiento ambiental y territorial:

- La oferta hídrica como elemento limitante a la ocupación del territorio.

- La necesidad de dar un manejo especial a ciertas zonas, con el fin de asegurar la calidad y cantidad del recurso hídrico demandado.
- El equilibrio territorial regional, definido por el trasvase de agua de una cuenca a otra, según necesidades de demanda

De manera paralela, el tipo de sistema desarrollado para la prestación del servicio de acueducto ha sido objeto de análisis. Se evidencian grandes diferencias asociadas al manejo del recurso hídrico entre los sistemas independientes y los centralizados. Las características de la organización administradora del servicio crean también determinantes de relación con el territorio, uso del recurso y costos por acceso al mismo.

El siguiente documento contiene una exposición sobre los principales aspectos relacionados con la gestión del recurso hídrico, destinado a abastecer acueductos comunitarios en la Cuenca del río Aburrá. Parte de una breve introducción teórica que será el marco de lectura a conflictos relacionados con la disponibilidad de agua y administración del servicio.

Se presenta un inventario de acueductos comunitarios donde se incluyen datos como número de usuarios, caudal concedido, caudal de la fuente, nivel de potabilización, entre otros. Finalmente, a partir de esta aproximación inicial a un diagnóstico sobre el estado de estos sistemas comunitarios, se sugieren elementos de gestión sobre la prestación del servicio.

A2.5.2 Descripción del trabajo

El trabajo desarrollado consistió en una investigación sobre el contexto del servicio comunitario de acueducto, en los niveles nacional y local y un inventario de este tipo de sistemas dentro de la cuenca.

En el primer lugar, las fuentes de información primaria fueron encuentros de acueductos comunitarios promovidos por Ecofondo, La Corporación Cultural Penca de Sábila y otras ONG's reunidas alrededor del tema. Los encuentros realizados el 1 de agosto de 2006 (Medellín), 6 y 7 de septiembre de 2006 (Bogotá) y 14 de marzo y 26 de abril de 2007 (Medellín), han sido importantes espacios para la reflexión y discusión entre los administradores de estos acueductos.

Su objetivo común ha sido promover la creación de redes que desde los diferentes niveles favorezcan el intercambio de experiencias y el fortalecimiento de las organizaciones. De igual manera se atendieron fuentes secundarias como informes de la Superintendencia de

Servicios Públicos e investigaciones realizadas por el Instituto CINARA (Centro de Investigaciones en Gestión Integral del recurso hídrico, Acueducto y Saneamiento básico) de la Universidad del Valle.

A2.5.3 Relaciones entre planificación hídrica y ordenamiento territorial

El Consejo Mundial del Agua, GWP (Global Water Partnership) indica que *“la gestión integral del recurso hídrico, más que un objetivo, es un derecho de la sociedad, fundamentado en la necesidad de incrementar los beneficios asociados al uso del agua y a la necesidad de equidad entre los recursos humanos y financieros, requeridos para tener acceso al recurso”*. (Rees, 2006) señala también que las externalidades derivadas de conflictos entre agua, tierra y capital deben ser objeto de gestión. Son estos tres elementos los que crean la base para el análisis entre el ordenamiento territorial y el uso del recurso hídrico.

A2.5.4 Aspectos legales

Existe una relación directa entre el uso de los recursos naturales y el uso del suelo. El ordenamiento ambiental de una cuenca debe integrar ambos aspectos, proponiendo estrategias que permitan el aprovechamiento del potencial del suelo y garanticen una adecuada administración de los recursos naturales.

La legislación colombiana entrega a la autoridad ambiental la responsabilidad de elaborar planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA), considerando que son estas últimas las unidades geográficas base para realizar gestión del recurso hídrico (Decreto 2811 de 1974, Ley 99 de 1993, Decreto 1729 de 2002). Estos planes se superponen a los planes de ordenamiento territorial (POT), los cuales se aplican en el nivel municipal. El POMCA y los POT aportan elementos relacionados con la gestión y suministro de agua para uso doméstico. Por encima de ambos instrumentos, están las disposiciones de la Ley 99, sobre las prioridades para la asignación de concesiones de agua y la protección de áreas estratégicas.

El mandato constitucional otorga a cualquier ciudadano el derecho al acceso a los servicios públicos domiciliarios, generando un claro marco a la ocupación del territorio. Esta directriz puede considerarse el fundamento de la disposición del artículo 12 la Ley 388 de 1994, donde se establece que el perímetro urbano es equivalente al perímetro de servicios públicos.

En el área urbana esta sería la única relación restrictiva entre la densidad de población y la disponibilidad del recurso hídrico. La misma ley indica también que el área periurbana debe ser objeto de desarrollo con restricciones de uso, de intensidad y de densidad, garantizando el autoabastecimiento en servicios públicos domiciliarios, de conformidad con lo establecido en la Ley 99 de 1993 y en la Ley 142 de 1994 (artículo 34).

Sobre la prestación de servicios públicos en el área rural no hay disposiciones específicas desde el ordenamiento territorial. En este caso, las restricciones se refieren a la necesidad de conservar suelos con cobertura forestal como elemento clave para la preservación del recurso hídrico (Ley 99 de 1993). El principal instrumento que desde la legislación se propone para el cumplimiento de esta disposición, es la compra de tierras en las cabeceras de las cuencas que abastecen los acueductos, actividad que los entes territoriales han ido cumpliendo poco a poco, pero no con el rigor que la ley 99 estableció al momento de su expedición.

Se ilustra así como las mayores directrices, que desde la legislación relacionan los temas de uso del agua y del suelo son la compra de tierras y la obligación del estado a garantizar el acceso a los servicios públicos, en el caso de análisis de los acueductos. Las normas básicas de planeación municipal establecen que la ocupación de un predio requiere ciertas garantías sobre la disponibilidad de servicios públicos. Sobre el agua para otro tipo de usos, vale anotar que existe subordinación respecto al uso doméstico, considerándolo prioritario sobre cualquier otro.

A2.5.5 Oferta hídrica y desequilibrios regionales

Normalmente, la oferta hídrica disponible en una cuenca no ha sido limitante para la ocupación de la misma. En este caso se acostumbra importar agua de otras cuencas a través de sistemas de acueducto con altos costos financieros y muchas veces ambientales. Este fenómeno, casi universal, lleva a la aparición de relaciones de dependencia y subordinación causantes de desequilibrios regionales.

Al estudiar un caso extremo como el de Ciudad de México, Castañeda (1991) muestra como las dimensiones de la región afectada, la intensidad de la explotación del recurso hídrico y la lógica de expansión metropolitana, hacen cada día más vulnerable, en términos económicos, ecológicos y estratégicos, la existencia de la Metròpoli. Debido a la magnitud de las obras de abastecimiento de agua y la asignación de grandes volúmenes presupuestarios para su financiamiento, esta necesidad no solo se ha convertido en una pesada carga para las entidades responsables sino que ha contribuido a afianzar la dependencia financiera del país con el exterior y a retrasar considerablemente el desarrollo de otros sectores productivos. Igualmente, señala el autor como las cuencas

aportantes ven limitada su posibilidad de ocupación y uso del suelo. Todo ello representa elevados costos sociales y económicos no solo para la población urbana sino también para la rural.

Las grandes ciudades crecen con argumentos como las economías de escala o la concentración de las fuentes de empleo, pero también deben considerar ineficiencias debidas al manejo de los residuos, el transporte, la calidad ambiental y las dificultades asociadas a la provisión de agua.

A2.5.6 Usos del suelo requeridos para la conservación del recurso hídrico

La legislación colombiana asume como un hecho la relación entre cobertura forestal, oferta hídrica y control de caudales. El tema está explícito en las disposiciones que implican la conformación de reservas forestales en las zonas donde nacen las fuentes de agua utilizada para el consumo humano y en aquellas que dan importancia a la reforestación como actividad en la cual cada acueducto debe invertir parte de sus recursos (Ley 99 de 1993)

Se considera sin embargo que las restricciones al uso del suelo para proteger la oferta hídrica no tienen que referirse únicamente a la cobertura forestal, el tema de la conservación de la calidad fisicoquímica del agua es también trascendental. La actividad agropecuaria es un elemento que, según condiciones particulares, genera mayor o menor contaminación en las fuentes. Los vertimientos directos de aguas servidas así como la presencia de pozos sépticos reducen la potabilidad del agua. La evidente relación entre calidad del agua y salubridad de la población da una importancia vital a este tema y lleva a considerar la necesidad de restricciones en el uso del suelo dentro del área de influencia de las fuentes de agua.

Sin embargo, estas características no pueden llevar a considerar que es inaceptable cualquier tipo de actividad o uso en áreas de influencia de las cuencas aportantes. La necesidad de ocupación y explotación del suelo es irrefutable, más aun en una cuenca como la del río Aburrá, por ello, es necesario buscar estrategias de gestión ambiental que garanticen una ocupación que cumplan las siguientes condiciones:

- Mínimo aporte de sedimentos
- Estabilidad de taludes
- Conservación de la capacidad de infiltración del agua en el suelo

- Conservación de la calidad fisicoquímica del agua

Estos objetivos implican el manejo de técnicas de saneamiento ambiental adecuadas, prácticas agropecuarias limpias, control sobre la densidad de urbanización, cuidado en la construcción de obras civiles así como la conservación de una adecuada cobertura vegetal, lo cual permitiría utilizar el terreno sin que ello implique afectación significativa del recurso hídrico. La propuesta legal referida a la compra de tierras requeridas para la protección del recurso hídrico es válida pero no puede ser única, el control sobre la función social y ambiental de la propiedad de terceros es un ejercicio ineludible para las autoridades ambientales y municipales.

A2.5.7 Acueductos comunitarios y sus implicaciones para su desarrollo local

La cercanía geográfica con la fuente donde se toma el agua genera relaciones particulares con el territorio, pues evidencia para los habitantes de una cuenca la clara relación entre bienestar y calidad ambiental. Ser usuario de los servicios ambientales de la cuenca dónde se habita podría ser un estímulo natural para la protección de los recursos. En su texto sobre desequilibrios territoriales y sostenibilidad global (Carrizosa, 2005), expone la necesidad de buscar nuevos conceptos como el de la sostenibilidad local, soluciones que no son necesariamente económicas sino principalmente sociales y ambientales.

El autor habla sobre los “terruños”, aquellos territorios donde más que crecimiento económico se busca construir nación, restaurar ecosistemas, conservar la biodiversidad y los valores culturales. Terruños poblados no por razones de mercado sino de nacionalidad, de humanidad y de buen vivir. Los acueductos comunitarios son instrumentos para la construcción de esta particular noción de desarrollo: un acueducto comunitario es fuente de empleo y capacitación, crea mayor compromiso y sentido de pertenencia sobre el sistema, la comunidad y el territorio.

Diversos estudios diagnósticos (García y Bastidas, 2004, CINARA, 2004, Jiménez, 2001, Vargas, 2001) demuestran cultura de pago, cohesión comunitaria, participación, solidaridad con familias en dificultades económicas, asociatividad, capacidad de gestión para la educación a sus usuarios y para la protección de las microcuencas abastecedoras.

Un acueducto comunitario brinda el servicio de abastecimiento de agua con un claro criterio de bienestar social. Esta es una realidad casi generalizada que lleva a considerar estas instituciones como elementos estratégicos en el desarrollo local.

A2.5.8 Conflictos entre uso del suelo y uso del agua en la Cuenca

Existe una relación indiscutible entre las condiciones ambientales en la Cuenca que abastece un acueducto y su sostenibilidad a mediano y largo plazo. En la Cuenca del río Aburrá hay conflictos asociados a incompatibilidades entre el uso del suelo y la necesidad de abastecimiento de agua a través de fuentes locales. Se presenta una lista de situaciones recurrentes enunciadas por los administradores de los acueductos, funcionarios de las administraciones municipales y usuarios de los sistemas. Se trata de una enumeración de carácter muy general que reúne problemas comunes y de variable importancia según condiciones locales:

- Contaminación del agua por presencia de zonas de explotación porcícola, avícola o ganadera, siendo particularmente impactante la actividad ganadera cuando se acompaña de la costumbre de fertilizar potreros utilizando para el riego aguas enriquecidas con porquinaza.
- Contaminación del agua por agroquímicos, especialmente en cultivos de papa y cebolla.
- Utilización del agua de las fuentes para el riego de zonas agrícolas. En épocas de verano es común la suspensión temporal del servicio por la destinación del recurso hídrico para el riego de cultivos aguas arriba de las bocatomas.
- Contaminación por aguas servidas de uso doméstico.
- Significativo aporte de sedimentos debido a la construcción de carreteras, manejo inadecuado de taludes, urbanización y diversos usos del suelo que favorecen la generación de procesos erosivos.
- Dificultades para establecer convenios para la protección de zonas cercanas a las fuentes de agua, con propietarios de áreas de nacimiento y zonas de retiro.
- Dificultades en el manejo de servidumbres para el paso de tuberías de conducción. Los propietarios de los terrenos restringen el acceso para actividades de mantenimiento a las redes o se oponen a permitir el paso de las mismas. En ocasiones las servidumbres se hacen costosas o las autoridades no tienen la capacidad de gestión que permita el paso de las redes por algunos predios.
- Incumplimiento de las directrices que obligan a los municipios a adquirir tierras en las partes altas de las cuencas abastecedoras de acueductos para el cuidado del recurso hídrico.

- Los casos de sobre-demanda del recurso en zonas donde no es posible contar con el servicio de EEPMM ya empiezan a surgir dentro de la Cuenca. El ejemplo más significativo es el del municipio de Sabaneta, donde los proyectos de expansión urbanística riñen con la oferta hídrica. La principal constructora del municipio ha optado por tratar de constituir una empresa privada de acueducto para garantizar el servicio a las nuevas viviendas, sin embargo, la concesión de agua otorgada pone en peligro las posibilidades de expansión de las redes comunitarias.
- La información recopilada no permite relacionar presencia de enfermedades infecciosas con la calidad del agua suministrada, sin embargo, se espera que esta sea una situación frecuente en zonas donde no hay condiciones óptimas de potabilidad.

Los conflictos asociados con la administración de los sistemas comunitarios y su relación con el sistema regulatorio vigente están descritos en el siguiente numeral.

A2.5.9 Problemas institucionales

Un inventario realizado por el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), citado por la Superintendencia de Servicios Públicos en un documento diagnóstico sobre pequeños prestadores de Servicios Públicos (2006), indica que en Colombia hay unos 12,000 acueductos comunitarios. Entre sus principales características se enumeran: atomizados, dispersos, informales, técnica y financieramente inviables, poco atractivos a la inversión privada, bajos indicadores de gestión pero igualmente bajos niveles de reclamación, difícilmente controlables por la Superintendencia de Servicios Públicos, desarticulados con las administraciones municipales.

A partir del diagnóstico mencionado, el Superintendente delegado propone desestimular las asociaciones comunitarias en centros poblados y permitirlo en zonas que por sus condiciones sociales, económicas y geográficas sea imposible otra forma empresarial. En estos casos, flexibilizar los estándares de calidad del servicio, financieros, tarifarios y de operación y delegar en el alcalde la vigilancia de las organizaciones bajo un control de tutela selectivo, y no permanente, de la superintendencia y las autoridades sanitarias.

De esta forma, el Superintendente está admitiendo o estimulando la prestación del servicio comunitario sólo en zonas donde no existe la posibilidad de que el servicio sea público o el estímulo para que sea privado. ¿Cómo se interpreta tal disposición?

Hernando Correa en 2006 realizó un documento llamado “Acueductos comunitarios, patrimonio público y movimientos sociales” donde se evidencia cómo los acueductos comunitarios son, aún en la periferia de centros urbanos, valiosos elementos de cohesión

comunitaria, demuestran fortalezas organizacionales y técnicas, aportan otro tipo de servicios sociales, establecen redes y asociaciones con otras organizaciones y son elementos activos en el manejo de las microcuencas, en fin, hacen méritos para ser considerados, como define el autor, patrimonio público local.

Desde otro punto de vista Pérez (2001) con base en datos suministrados por la Superintendencia de Servicios Públicos, compara sus indicadores de gestión con aquellos de empresas públicas y privadas de diversas escalas, encontrando que algunos de los indicadores de estas organizaciones tienen una calificación superior a las empresas de mayor tamaño, de carácter oficial o privado:

La eficiencia técnica y operativa, los niveles de legalidad en las conexiones y cobertura son mayores en muchos casos, también presentan un mejor balance financiero y menores costos de contratación. Sin embargo, es mayor el consumo promedio por suscriptor (debido a los menores costos del servicio) y se presentan resultados inferiores en los niveles de cobertura nominal de medición de agua, continuidad del servicio y niveles de existencia de plantas potabilizadoras.

Los resultados de encuentros regionales y departamentales de acueductos comunitarios (Primer Encuentro Departamental del Acueductos Comunitarios, 1 de Agosto de 2006; Primer Encuentro Nacional de Acueductos Comunitarios, 6 y 7 de septiembre de 2006, Grupo de trabajo de Acueductos Comunitarios de la Zona 6 del Municipio de Envigado – Noviembre 2006-Enero 2007-, Primer encuentro de Acueductos Comunitarios del Valle de Aburrá – 23 de marzo de 2007) describen situaciones similares a aquellas consideradas por el Centro de Investigaciones en Acueducto y Saneamiento Básico de la Universidad del Valle (Cinara) en su amplia trayectoria de trabajo con Acueductos Comunitarios:

- Tarifas bajas que no corresponden a análisis de costos
- Baja disponibilidad a pagar por parte de los usuarios quienes están acostumbrados a recibir agua en abundancia y a mínimo costo.
- Mantenimiento puntual
- Uso del agua sin medición
- Mayores niveles de consumo
- Administración por comités de vecinos vitalicios o juntas de acción comunal quienes generalmente no reciben salario

- Operación remunerada para uno o dos empleados
- Aportes de la comunidad en mano de obra para actividades de reparación
- Carencia de reglamentos y libros contables
- Fuerte sentido de pertenencia de la comunidad sobre sus acueductos
- Uso de tecnología no convencional
- Niveles de ingresos recibidos que permiten asumir los costos de operación y mantenimiento regular del sistema, pero no grandes reparaciones o ampliaciones.
- Falta de dominio sobre las microcuencas que abastecen el recurso
- Redes en mal estado
- Falta de planeación
- Desconocimiento e incompreensión del sistema regulatorio

En algunos casos aislados, se encuentra que los administradores de los sistemas no son abiertos a la participación, logrando un amplio control sobre las comunidades, sometiéndolas a aceptar sus propias y particulares condiciones de prestación del servicio. También se reportan extraoficialmente casos de control de los acueductos por parte de grupos armados.

Es claro que la lista de condiciones enunciadas tiene un carácter general y que no hay duda que existe un buen número de acueductos cuya organización administrativa y condiciones técnicas y financieras aseguran sostenibilidad en el mediano plazo. En el caso de la Cuenca del río Aburrá, sobresale el acueducto Multiverdal Arco Iris, organización que recibió el Premio a la Gestión Empresarial otorgado por el MAVDT, 2006. Otros ejemplos de gestión son los acueductos El Socorro, el Escobero y Cristal Peña Azul en Envigado, Mandalay en Caldas, Isaac Gaviria en Medellín y La Palma en Girardota.

A2.5.10 Ley 142 de 1994. ¿Amenaza u oportunidad para los sistemas comunitarios?

La ley 142 establece 4 principios básicos para la prestación del servicio de acueducto en Colombia: solidaridad, neutralidad, eficiencia económica y suficiencia financiera.

Los principios de neutralidad y eficiencia económica dependen en gran medida de la administración del acueducto, la observación de las generalidades descritas muestra que, en la mayoría de los casos, se aplican. Sin embargo, hay claras dificultades relacionadas con los principios de solidaridad y suficiencia financiera. Este último principio establece que un acueducto debe recuperar, vía tarifa, los costos en los que incurre para la prestación del servicio.

En el caso de los sistemas comunitarios, por tradición histórica, la concepción del agua como un elemento común y de libre acceso (asociada a su condición de ruralidad), y sus características socioeconómicas, permiten que las tarifas cobradas a los usuarios sean tan bajas que no siempre sea posible operar en las condiciones que la ley 142 exige, es decir: Potabilidad, planeación a largo plazo, rigor administrativo, estudio tarifario, entre otros.

El principio de solidaridad es una posible salida a este problema: La ley establece que cada acueducto debe crear un fondo de solidaridad y redistribución de ingresos, que en caso de no poderse alimentar por sus usuarios de estratos altos (dado su bajo número), estará a cargo de la administración municipal, la cual debe destinar parte de su presupuesto a la atención del servicio de acueducto y al saneamiento básico. La aplicación de los subsidios es entonces una solución clara al problema de suficiencia financiera de los sistemas comunitarios y permitiría solucionar muchos de sus problemas económicos.

Hay dificultades de aplicación argumentadas en la no formalidad de estos sistemas comunitarios. Las administraciones locales justifican su no intervención indicando que los subsidios solo pueden aplicarse en sistemas legalmente formalizados, de manera que se crea un círculo vicioso cuya salida requiere gestión y voluntad política: si no se mejoran las condiciones financieras de muchos de los sistemas comunitarios será difícil para ellos acogerse a la normatividad vigente; pero de la misma manera, el no acogerse a ella, parece ser un impedimento para acceder a recursos externos que permitan financiar procesos de mejoramiento técnico y administrativo. En la mayoría de los casos solo se conocen intervenciones puntuales relacionadas con compromisos de tipo electoral.

Finalmente es necesario anotar que la ausencia de un seguimiento por parte de la Superintendencia de Servicios Públicos, dificulta su potencial de intervención. Los

requisitos logísticos que el acompañamiento institucional requiere como manejo de herramientas informáticas o cumplimiento de múltiples trámites de tipo administrativo, hacen que los acueductos se muestren temerosos y reacios a acogerse a la vigilancia legal. Se les exigen condiciones de operación que no necesariamente son requerimientos estrictos, tal es el caso de la macro y micromedición, actividades que requieren de costosos equipos que en el caso de pequeños sistemas no son siempre necesarios.

El registro de los estados financieros, la apropiación de sistemas contables como el plan único de cuentas (PUC), de bases de datos digitales que requieren conexión a Internet como el SUI (Sistema Único de Información), o la consideración de parámetros de eficiencia que aplican sólo a empresas de mayor envergadura, son elementos que dificultan claramente el desarrollo de las actividades administrativas que las comunidades han apropiado. Finalmente se anota que existe una percepción generalizada sobre el hecho de que el cumplimiento de la normatividad demanda tiempo y dinero pero no ofrece beneficios. Los administradores hacen constante mención a la necesidad de capacitación y asesoría en temas técnicos, legales y administrativos, actividades que no aparecen en las propuestas de gestión de la Superintendencia.

A2.5.11 Consideraciones sobre la pertinencia del uso del agua que se produce dentro de la Cuenca

Se considera que el uso del agua de la cuenca es pertinente y favorable al consumo doméstico, dado que la oferta hídrica no está siendo utilizada en su pleno potencial y de esta manera se lograría:

- Reducir impactos sobre otras cuencas cuyo desarrollo podría limitarse ante la constante exportación de agua, favoreciendo el equilibrio en el desarrollo regional.
- Obligar a una adecuada gestión ambiental en las microcuencas locales.
- Disminuir de manera significativa las necesidades de inversión en infraestructura para el abastecimiento de agua en el largo plazo.
- Estimular mejores relaciones entre los usuarios de los acueductos y el territorio que ocupan.
- Permitir un control sobre la densidad de población favoreciendo la calidad ambiental

Finalmente se enfatiza en el incuestionable valor de los acueductos comunitarios en la construcción de tejido social, estímulo a la participación comunitaria y al desarrollo local

A2.5.12 Recomendaciones

La historia de muchas de estas organizaciones da fe de su capacidad de gestión, sin embargo, el acompañamiento de la autoridad ambiental y la administración municipal es un soporte indispensable. Se propone la creación de un programa de fortalecimiento de los acueductos comunitarios en la Cuenca del río Aburrá, orientado a ampliar la cobertura de estos sistemas, mejorar su capacidad de gestión administrativa, promover el ahorro y uso eficiente del recurso, asegurar la calidad del servicio a través del uso de tecnologías de bajo costo y favorecer la acertividad de la gestión ambiental en las microcuencas locales.

Es necesario resaltar la importancia del saneamiento básico en las áreas rurales como elemento fundamental para asegurar mejores condiciones de acceso al recurso hídrico de la cuenca. Saneamiento efectivo se traduce en fuentes de agua potable cercanas y con menores costos operativos para los acueductos locales.

A partir del trabajo realizado se identifican 6 temas básicos relacionados con la sostenibilidad de los sistemas comunitarios:

- Calidad administrativa. Dadas las características de los estos acueductos, se considera fundamental potenciar las fortalezas como la convocatoria comunal para el desarrollo de tareas específicas, la cercanía que facilita el conocimiento y comunicación con todos los usuarios, la escala que permite un amplio dominio del territorio y la infraestructura creada.
- El rigor en los procesos administrativos debe ser adaptado al conocimiento local, de manera que no se impongan sistemas ajenos a la realidad de las comunidades pero si se mejoren los niveles de organización y planeación a mediano y largo plazo. En este mismo sentido, el estímulo al control social es un elemento básico para garantizar la calidad de la gestión. Es necesario capacitar a los usuarios para que conozcan el sistema y sepan vigilarlo de manera efectiva, a favor del interés común.
- Desarrollo de nuevas tecnologías de captación, potabilización y conducción del agua, que permitan reducir costos de operación, maximizar la eficiencia y utilizar el conocimiento de los expertos locales. Elementos de bajo costo como filtros de arena de flujo lento, o sistemas que permitan la potabilización el agua dentro de las viviendas, según usos específicos, son clave para reducir los costos de operación de los acueductos. El saneamiento ambiental también debe acompañarse de propuestas alternativas para las aguas servidas como separación de heces y orina, baños secos, reciclaje de aguas grises, entre otros., que no solo reducen el consumo de agua sino las posibilidades de contaminación de la misma.

- En cuanto al uso racional del recurso, a lo largo del documento se indicó como las condiciones culturales y ambientales en las cuales se han desarrollado estos sistemas, además de las bajas tarifas cobradas a los usuarios y la muy común ausencia de medición, favorecen el desperdicio del recurso incrementando costos operativos y reduciendo posibilidades de ampliación y mejoramiento técnico de los sistemas. El desarrollo de programas de racionalización del consumo es básico para asegurar la sostenibilidad del servicio comunitario en el tiempo.
- Gestión ambiental en las microcuencas abastecedoras. Se requiere conocer y estimular alternativas de uso del suelo con impacto mínimo sobre el régimen hidrológico y la calidad del agua, como técnicas de agricultura limpia, ganadería intensiva con mínimo pastoreo, uso de forrajes de corte, disposición adecuada de residuos, estrategias para el control de la erosión superficial e intervención mínima en zonas inestables y de alta pendiente.
- Los acueductos comunitarios han avanzado en procesos orientados a crear redes y asociaciones que permitirían intercambiar experiencias y conocimientos para favorecer una dinámica regional uniforme y en favor de la sostenibilidad de estas organizaciones. El estímulo a estos procesos es también una estrategia valiosa para asegurar la continuidad de los sistemas.
- Financiación. La aplicación de subsidios definidos por la ley 142 es la primera y más cercana herramienta de financiación para el desarrollo de la gestión propuesta. En lo que se refiere al manejo de las cuencas, se considera necesario aplicar los mecanismos de financiación establecidos por ley (tasas retributivas, tasas por uso del agua, inversión del 1% del costo de proyectos que aprovechen el recurso hídrico de una cuenca, pago por servicios ambientales) al desarrollo de programas como los enunciados en el numeral 3.

A2.5.13 Propuesta

A partir del trabajo presentado se derivan propuestas específicas referentes a la formulación de políticas y proyectos cuyo objetivo es estimular el servicio comunitario de acueducto en la Cuenca. Algunas de las recomendaciones expuestas tienen relación con temas contemplados en otros capítulos del POMCA, pues naturalmente existen relaciones con aspectos de la gestión ambiental y territorial. En lo que se refiere específicamente al tema del servicio, se propone la adopción de una política que dirija la gestión municipal de acuerdo con los siguientes planteamientos:

Los acueductos comunitarios son un patrimonio social que debe conservarse por su importancia como elementos de formación y cohesión comunitaria

Los municipios deben dar estricto cumplimiento a las disposiciones de ley que los obligan a invertir en programas de acueducto hasta asegurar una cobertura total del servicio de agua potable para la población. Cada acueducto deberá captar recursos del municipio para constituir su Fondo de Solidaridad y Redistribución de Ingresos (FSRI) de acuerdo con las disposiciones de la Ley 142 y sus decretos reglamentarios. Este fondo contribuirá a incrementar los ingresos de los sistemas comunitarios con el fin de financiar programas de mejoramiento técnico y administrativo.

De manera paralela se propone el desarrollo de proyectos específicos orientados a mejorar los niveles de información, a buscar tecnologías que permitan reducir costos operativos según condiciones locales y a fortalecer la capacidad técnica y administrativa de los sistemas mediante el desarrollo de programas de capacitación y asesoría.

A2.5.14 Base de datos

La base de datos que contiene la información recolectada referente a los acueductos comunitarios en la cuenca del río Aburrá, se presenta al final de este anexo.

A2.5.15 Referencias Bibliográficas

REES, J. Urban water and sanitation services. The background papers, No. 11. Global Water Partnership. U.S., 2006.

CASTAÑEDA, L. Agua y sustentabilidad en la Ciudad de México. Estudios demográficos y urbanos. El Colegio de México, A.C. 1991.

CARRIZOSA, J. Desequilibrios territoriales y sustentabilidad local. Ed. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 2005.

CORREA, H. 2006. Acueductos comunitarios, patrimonio público y movimientos sociales. [en línea]. <http://www.ecofondo.org/mambo/index.php?option=com_remository&Itemid=58&func=fileinfo&filecatid=91&parent=category, consultado> [citado en marzo de 2007]

GARCÍA, V. y BASTIDAS, F. La gestión comunitaria en procesos de abastecimiento de agua y saneamiento como base de sostenibilidad y construcción de tejido social. Instituto CINARA [en línea]. <<http://www.cinara.univalle.edu.co/archivos/pdf/14.pdf> 2004> [citada en septiembre de 2006]

CINARA. La comunidad como proveedora de agua potable en la periferia marginal urbana. El caso de la Sirena, Santiago de Cali, Colombia, 2004 [en línea]: <<http://www.cinara.univalle.edu.co/archivos/pdf/12.pdf>>

JIMÉNEZ, C. El rol de las comunidades en la gestión de sistemas de abastecimiento de agua en países de desarrollo - Colombia. Estudio de caso. Cooperativa Acueducto Tinajuela Coconuco. Empresa de Servicios Públicos. COOPTC.ESP. Municipio de Coconuco- Cauca [en línea]. <<http://www.cinara.univalle.edu.co/archivos/pdf/69.pdf>> [citada en Junio de 2007].

VARGAS, S. El rol de las comunidades en la gestión de sistemas de abastecimiento de agua en países de desarrollo – Colombia. Estudio de caso: Asociación Municipal de Acueductos Comunitarios AMAC del Municipio de Dosquebradas, Risaralda, Colombia [en línea]. <<http://www.cinara.univalle.edu.co/archivos/pdf/67.pdf>> [citada en Junio de 2007]

PÉREZ, M. A. Balance y gestión de empresas de acueducto y alcantarillado de pequeña escala en Colombia [en línea]. <<http://www.cinara.univalle.edu.co/archivos/pdf/11.pdf>> [citada en Junio de 2007]

PRIMER ENCUENTRO DEPARTAMENTAL DE ACUEDUCTOS COMUNITARIOS (1°:2006: Medellín). Memorias de 1er encuentro departamental de acueductos comunitarios. Medellín, agosto de 2006.

PRIMER ENCUENTRO NACIONAL DE ACUEDUCTOS COMUNITARIOS (1°:2006: Bogotá). Memorias de 1er encuentro nacional de acueductos comunitarios. Bogotá, 6 y 7 de septiembre de 2006.

PRIMER ENCUENTRO METROPOLITANO DE ACUEDUCTOS COMUNITARIOS (1°:2007: Medellín). Memorias de 1er encuentro metropolitano de acueductos comunitarios. Medellín, 14 de marzo de 2007.

SEGUNDO ENCUENTRO DEPARTAMENTAL DE ACUEDUCTOS COMUNITARIOS (2°:2007: Medellín). Memorias de 2° encuentro departamental de acueductos comunitarios. Medellín, 26 de abril de 2007.

A2.6 MODULO DE DISPONIBILIDAD

A2.6.1 Concepción módulo de disponibilidad hídrica

Se ha desarrollado un modelo para el cálculo de la disponibilidad del recurso hídrico. Con esta herramienta es posible establecer en la cuenca de interés la disponibilidad del recurso hídrico y definir si los usuarios que se encuentran aguas abajo se verán afectados por nuevas concesiones. El modelo permite identificar los tramos de la red de drenaje en que se presentan estados deficitarios, y sirve como sistema de soporte a la decisión en la reglamentación del uso del agua.

El modelo establece la disponibilidad hídrica, calculada como la diferencia entre la oferta natural de los caudales mínimos y las demandas del recurso en la cuenca, tomadas como la agregación en la dirección del flujo de todos los valores de captaciones registrados en la cuenca.

■ Diagrama de procesos

- Proceso de entrada de información
 - Se ingresan las coordenadas de los puntos de captación con su respectivo caudal
 - Se ingresan las coordenadas de los puntos de vertimiento con su respectivo caudal
 - Se ingresa el mapa de direcciones de flujo
 - Se ingresa el mapa de oferta natural de caudales
 - Si se tiene se ingresa mapa de caudales ecológicos
- Proceso de modelamiento
 - Se genera un raster con los puntos de captación existentes en la base de datos contenidos en la cuenca seleccionada.
 - Se genera un raster con los puntos de vertimiento existentes en la base de datos contenidos en la cuenca seleccionada.

- Se agrega el mapa de captación en dirección del flujo.
 - Se agrega el mapa de vertimientos en la dirección del flujo.
 - Se lee el mapa de oferta natural.
 - Se genera el mapa de disponibilidad a partir del mapa de oferta natural, el mapa de caudales ecológicos si se ingresó y el mapa de demanda agregada de las captaciones y vertimientos.
 - Proceso de salida
- **Formato de entrada de datos**

Son necesarios dos mapas obligatorios y uno opcional para realizar el proceso descrito anteriormente, el mapa de elevación digital y el de caudales mínimos, los obligatorios y el mapa de caudales ecológicos opcional (Figura A2.17). Se resalta que los mapas deben estar fabricados para la cuenca que se desee analizar. Estos mapas deben ser congruentes, es decir, deben tener el mismo número de filas y columnas y también deben tener las mismas coordenadas mínimas. De no ser así, el sistema mostraría valores de disponibilidad errados ya que el caudal no pasaría por las mismas celdas donde se encuentran las captaciones.

Los archivos de captaciones y vertimientos son de texto plano (Figura A2.18 y Figura A2.19); debe tener cuatro columnas, la primera es un indicador, la segunda y tercera las coordenadas X e Y y la cuarta columna el caudal captado o vertido en el punto.

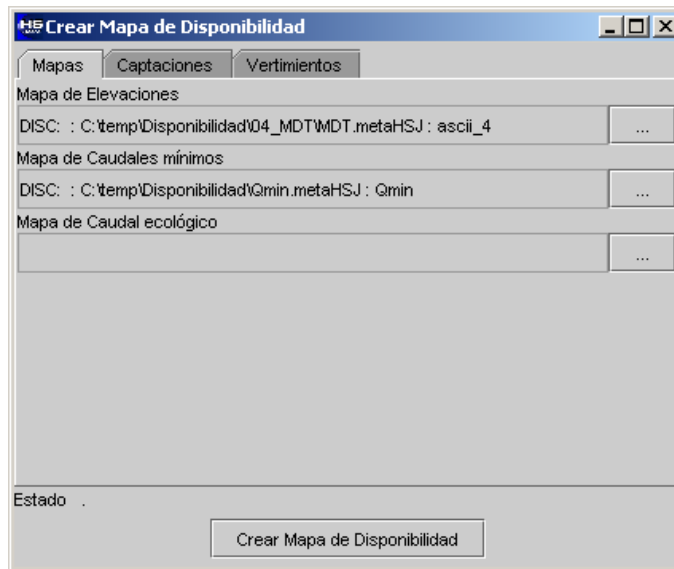


Figura A2.17. Ingreso de mapas al modelo

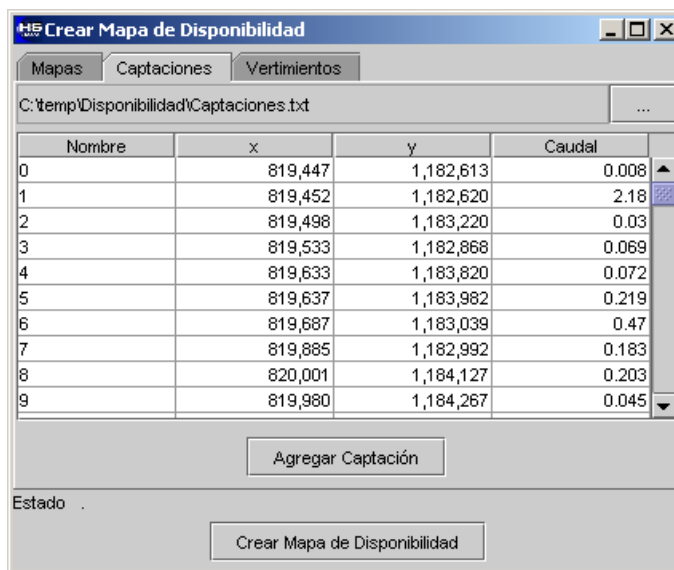


Figura A2.18. Interfaz para el ingreso de las captaciones

Crear Mapa de Disponibilidad

Mapas Captaciones Vertimientos

C:\temp\Disponibilidad\Vertimientos.txt

Nombre	x	y	Caudal
V_0	824,693.688	1,177,058.125	0.449
V_1	824,126.5	1,176,597.5	0.526
V_2	824,738	1,176,480	0.27
V_3	823,398.312	1,178,295.5	0.453
V_4	824,170.812	1,176,506.125	0.066
V_5	827,817.5	1,173,623	0.344
V_6	827,802.062	1,173,613.75	0.261
V_7	827,428.25	1,173,686.75	0.538
V_8	826,792.062	1,174,977.25	0.103
V_9	823,773.875	1,178,915.75	0.415
V_10	824,096.875	1,178,066.125	0.058
V_11	825,246.938	1,175,676.75	0.443
V_12	827,020.688	1,176,633.875	0.452

Estado

Crear Mapa de Disponibilidad

Figura A2.19. Interfaz para el ingreso de vertimientos

- Mapa de Resultados

Mapa de resultados para la quebrada Doña Maria. El programa muestra tanto el mapa de disponibilidad como las captaciones y vertimientos (Figura A2.20).

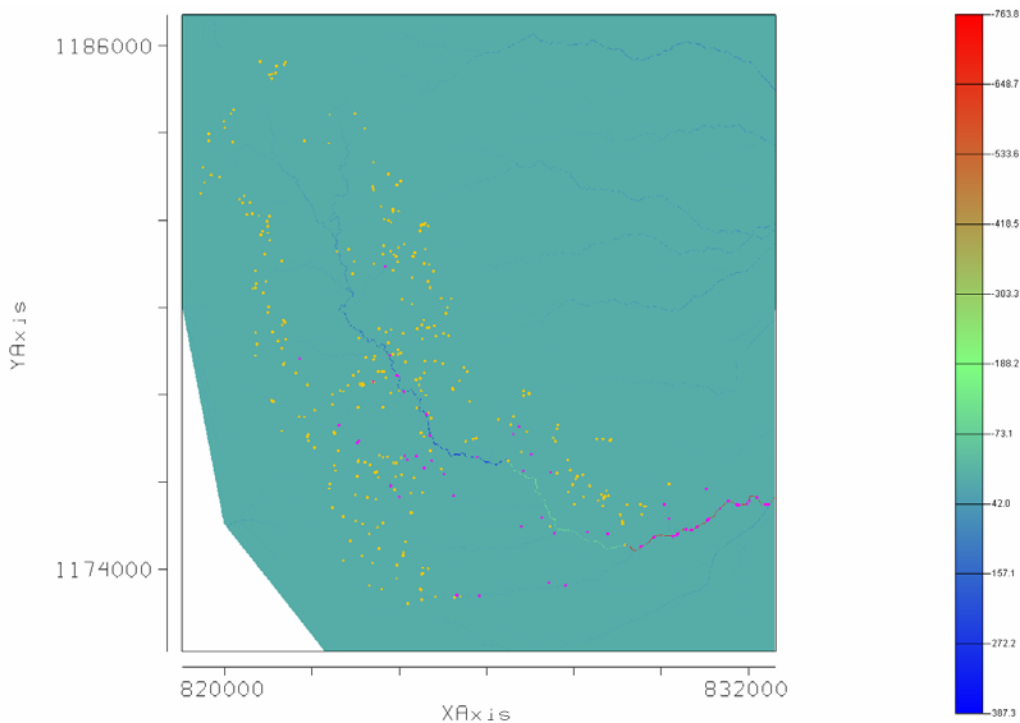


Figura A2.20. Mapa de resultados

Hay que tener en cuenta que el modulo de disponibilidad será de gran ayuda si la información que se le ingresa es de buena calidad. Si el modulo se utiliza con información incompleta no será confiable.

El modulo se probó con la información de la quebrada Doña Maria ya que esta quebrada se encuentra en proceso de reglamentación y por ello cuenta con los mapas de caudales mínimos, mapa de elevaciones y mapa de caudales ecológicos a una buena resolución (10m x 10 m), además se tiene información levantada en campo de captaciones y vertimientos.

Se recomienda que el módulo se utilice con mapa de píxeles lo más finos posible (escalas menores a 1:10000) para que el modelo hidrológico represente adecuadamente las condiciones reales de oferta y demanda. Por tanto se recomienda usar el sistema por microcuencas ya que trabajar con la cuenca completa, dada su gran área, generaría problemas computacionales al ser ejecutado.

A2.6.2 Manual de modulo de disponibilidad

El módulo de disponibilidad está acoplado a HidroSIG. La funcionalidad básica de HidroSIG puede ser consultada en su manual de usuario, este manual solo explica como funciona el módulo de disponibilidad.

Para ingresar al módulo se debe abrir HidroSIG y luego dar clic en *Herramientas -> Disponibilidad* como se muestra en la Figura A2.21.

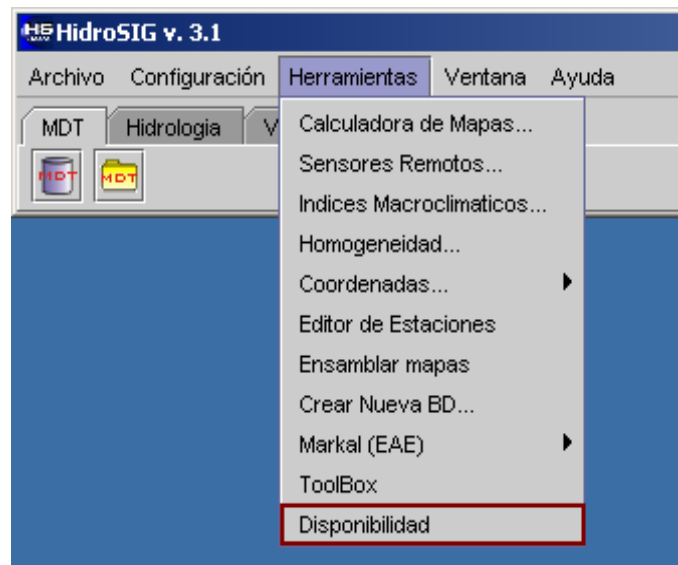


Figura A2.21. Ingreso al módulo

■ Interfaz para ingreso de mapas

La interfaz del módulo está compuesta por un conjunto de paletas para el ingreso de la información y la configuración y por el botón que inicia el proceso del cálculo de la disponibilidad junto con una barra de estado (Ver Figura A2.22 Números 1 y 2).

Para el ingreso de los mapas de elevaciones (ya corregido con las direcciones de drenaje), caudales mínimos y caudales ecológicos se da clic en los botones señalados con los números 3, 4 y 5 de la Figura A2.22. Luego se selecciona el lugar donde se encuentran los mapas en un archivo del disco duro o en una base de datos de HidroSIG.

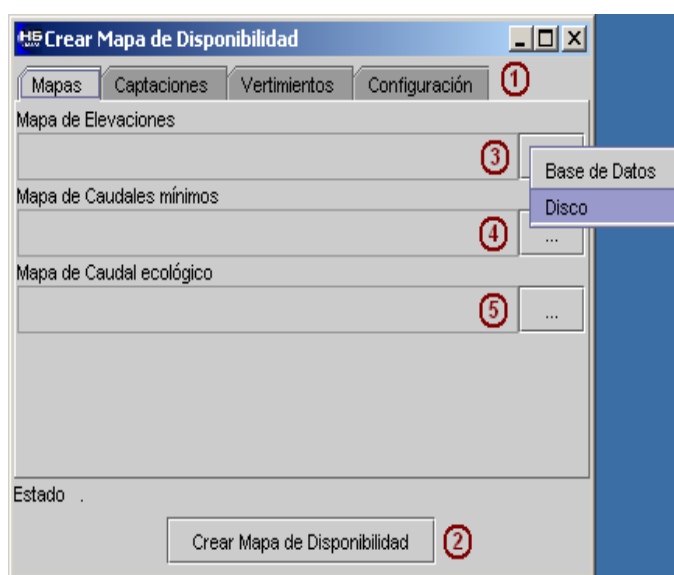


Figura A2.22. Interfaz Principal

■ Interfaz para el ingreso de captaciones

Para el ingreso de las captaciones se debe tener un archivo de texto plano que contenga separados por tabuladores un nombre, la coordenadas norte y este y el caudal otorgado en el punto. En la Figura A2.23 se muestra como se ingresan las captaciones, dando clic en el botón señalado con el número 1 y seleccionando el archivo de texto que tenga la información. Luego de esto aparece la tabla con la información de las captaciones. Además el usuario puede agregar captaciones las cuales serían las que un usuario estaría pidiendo permiso. Esto se puede realizar dando clic en el botón marcado con el número 2 y llenando la información en el la tabla en el punto marcado con el número 3.

▪ Interfaz para el ingreso de vertimientos

Para el ingreso de los vertimientos al igual que el de las captaciones se debe tener un archivo de texto plano que contenga separados por tabuladores un nombre, la coordenadas norte y este y el caudal que verten en el punto. En la Figura A2.24 se muestra como se ingresan los vertimientos, dando clic en el botón señalado y seleccionando el archivo de texto que tenga la información.

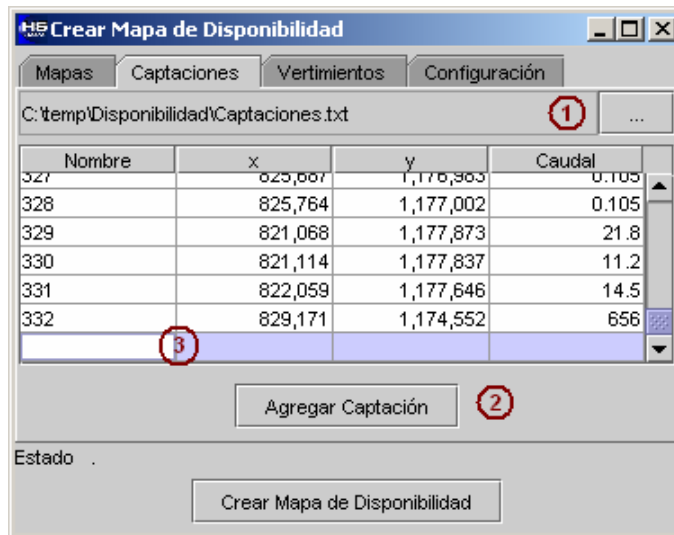


Figura A2.23. Ingreso de Captaciones

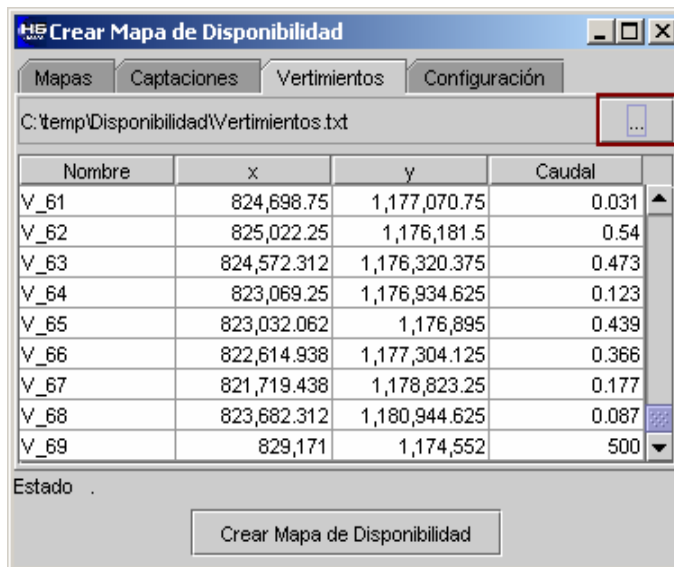


Figura A2.24. Interfaz para el ingreso de Vertimientos

▪ Configuración

El usuario puede cambiar los colores de las captaciones y los vertimientos cuando se va a mostrar el mapa al final del proceso, esto lo puede hacer dando clic sobre el color correspondiente y seleccionando el color deseado.

▪ Resultados

El sistema luego de crear el mapa de disponibilidad lo muestra, insertando además las captaciones y vertimientos que se ingresaron. (Ver Figura A2.26)

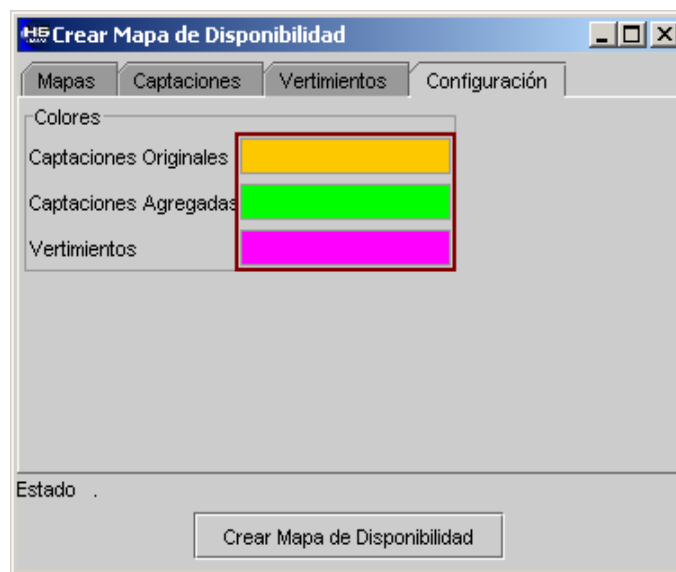


Figura A2.25. Interfaz para la configuración del sistema

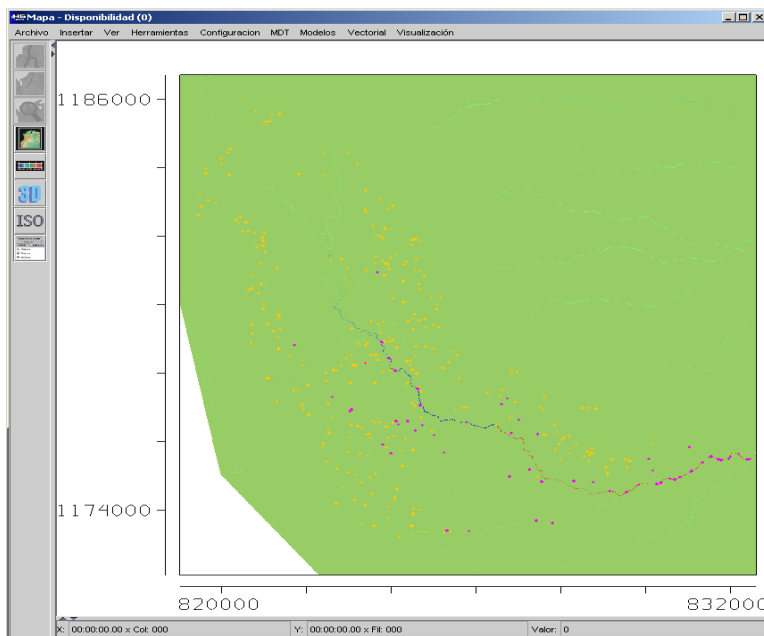


Figura A2.26. Mapa de Resultados

MUNICIPIO	NOMBRE DEL ACUEDUCTO	NOMBRE DE LA FUENTE	CAUDAL DE LA FUENTE (l/s)	CAUDAL OTORGADO (l/s)	CAUDAL OTORGADO (l/s)	# SUSCRIPTORES	CUENCA	COORDENADAS DE CAPTACIÓN		MEDIDORES		AGUA POTABLE		SISTEMA DE POTABILIZACIÓN			ADMINISTRADOR	DIRECCIÓN	TELEFONO
								X	Y	MACRO	MICRO	SI	NO	D	FLOC	FIL			
MEDELLIN	Corporación junta administradora acueducto Aguas Frías	Q Guapante		3.51	3.51	218	Q. la Picacha	826,551.0	1,181,226.0		x			x			José Hernán Garcia	carrera 77A N° 32b-06	3531625
	Corporación de acueducto de Altavista	Q el barcino, Los perez y la piedra		15.07	15.07	1268	Q. Altavista	828,270.0	1,180,152.0		x						Gustavo Cano	CALLE 18 N° 103 - 127	3532563
	Junta Administradora San José de manzanillo -Agua Pura-	Q la Guayabala		7.16	7.16	175	Q. Altavista	829,516.0	1,178,045.0		x						Soraya		2567470-3427401
	Junta Administradora Acueducto Multiveredal el Mantial	Q. la Manguala		11.24	11.24	170	Q. Doña María	823,542.0	1,174,736.0		x	x		x	x	x	Andrea Montoya		3794605
	Junta Administradora Acueducto la Sorbetana	Q. la Sorbetada		2.60	2.60	77	Q. Doña María	824,358.0	1,178,604.0		x	x		x	x	x	Wilson Mejía		2791794
	Corporacion de Asociados de Acueducto Montañita	Q la larga, la chata y un afluente		2.00	2.00	65	Q. Doña María	822,596.0	1,176,885.0		x	x		x	x	x	Jorge González	Vereda Montañita	2861152/2868667
	Corporación de acueducto San José	Q. la campiña Y charco Azul		4.00	4.00	102	Q. Doña María	825,906.0	1,174,220.0		x	x		x	x	x	Wilson Mejía	Vereda San Jose	2792793
	Corporación de asociados del Acueducto el Mazo	Q. San Roque		1.00	1.00	112	Q. Piedras Blancas	841,913.5	118,325.4		x	x		x	x	x	Mariluz Hincapié		5669730/9397
	Corporación de asociados del acueducto las Flores	Q. los Chiqueros		1.01	1.01	198	Q. Piedras Blancas	843,453.7	118,266.4		x	x		x	x	x	Gloria Hernández		5669191
	Corporación de acueducto Multiveredal Santa Elena	Q. santa Elena		10.17	10.17	1057	Q. Santa Elena	842,769.2	117,780.1		x	x		x	x	x	Antonio Grajales	CORREGIMIENTO SANTA ELENA	5382018
	Corporación de Acueducto San Pedro	Q. san Pedro		10.00	10.00	817	Q. Santa Elena	840,434.0	1,177,873.0		x	x		x	x	x	Trinidad Hincapie	Corregimiento Santa Elena	5380353
	Corporación de Acueducto multiveredal Arcoiris	Q la frisola y afluente 1 y 2		10.30	10.30	527	Q. la Iguañá	825,777.0	1,188,060.0		x	x		x	x	x	Oscar Gómez	VEREDA EL LLANO	4272084
	Junata Administradora Acueducto Multiveredal el Hato	Q. el Hato		5.69	5.69	330	Q. la Iguañá	829,688.0	1,189,772.0		x	x		x	x	x	Juan Diego Uribe		4275336
	Corporación de Acueducto Multiveredal la Acuarela	Q. la Fransisca y "la Legia"		19.00	19.00	2008	Q. la Iguañá	826,293.0	1,186,245.0		x	x		x	x	x	Marta Nelly Sánchez	CALLE 61 N 130-17 OFICINA 201	4276009
	Junata Administradora Acueducto Multiveredal la Iguañá	Q. la Iguañá		5.20	5.20	238	Q. la Iguañá	826,474.0	1,190,412.0		x	x		x	x	x	Juan Diego Uribe		4275336
	Corporación de asociados del acueducto Isaac Gaviria	Q. la Caneca y la Castro 2		3.76	3.76	627	Q. La Aguacatala				x	x		x	x	x	Marta Isabel Zapata	CALLE 56H 18-27	2849356
	Reglamentación de Aguas Ql la guacatala Pedro Luis Castrillon y otros	Q. La Aguacatala en 4 derivaciones		15.30	15.30		Q la Aguacatala			x	x	x		x	x	x	varios		
	Junta de Acción comunal Loma de los Mangos	Q la Aguacatala		7.00	7.00		Q la Aguacatala				x						Rubén Darío Zuluaga	Calle 20 A Sur No. 22-332 casa 217	317 10 78
Urbanización Primavera de San Carlos	Q la Aguacatala		0.40	0.40		Q la Aguacatala				x	x		x	x	x	Oscar Mesa Vanegas	Carrera 24 No. 16AA Sur-147	268 90 49	
DON MATIAS	Acueducto Multiveredal Animas Piedraita	Q. Piedraita	3.20	1.50	1.50	67				x	x	x	x	x	x	Dario Marin	Vereda Piedraita	3128086860	
	Acueducto Veredal San Andres	Fuente San Andrés	4.00	1.20	1.20	47	SN	849,542.0	1,203,861.0		x	x		x	x	x	Fernando Rua	Vereda San Andres	3127195144
	Acueducto Corregimiento de Bellavista	Q. kilones	4.20	2.00	2.00	267	Q. Laureles	868,162.0	1,215,700.0	x	x	x		x	x	x	Nelson Giraldo	Corregimiento Bellavista	3117343164
	Acueducto Multiveredal San José frisolera	Q. la Meseta		1.50	1.50	113	Q. Mnazanares	871,871.0	1,216,324.0		x	x		x	x	x	Hernado Cuervo	Vereda san Jose Frisolera	3103732577
	Acueducto Veredal La Pradera	Q. la Pradera	3.50	1.50	1.50	43	Q. Laureles	870,207.0	1,214,591.0		x	x		x	x	x	Albeiro	Vereda la Pradera	3116311502
Acueducto Veredal La Montera	Q. la Montera	600.00	1.50	1.50	97	Q. la Montera	866,706.0	1,210,708.0		x	x		x	x	x	Hernan			
CALDAS	Acueducto Veredal Primavera	Q. el Zarzo	3.82	1.73	1.73	232	Q. el Zarzo	828,836.0	1,163,017.0		x					Jaime Humberto Salazar	Sector Primavera	2787838	
	Acueducto Veredal Mandalay	Q. la Chuscala y la Piedrahita	21.20	12.00	12.00	950	Q. la Chuscala	827,092.0	1,164,385.0	x	x					Rodrigo Tirado Sanchez	Cr. 53 N 140B -14	3383471-3038297	
	Acueducto la Valeria	Q. la Solita		1.80	1.80	110	Q. la Valeria	824,680.0	1,166,129.0				x			Reinaldo Gil		3030955	
	Acueducto la Raya	Q la Manuela	6.00	3.56	3.56	380	Q. la Raya	826,453.0	1,167,553.0							Oscar Rios Marulanda	Vereda la Raya	2780827	
	Acueducto el Cano	Q. la Manuela y La Peñola	7.50	2.00	2.00	250	Q. la Valeria	824,041.0	1,167,873.0				x			Jorge Wilson Henao	Cr.55N 110S 162	2781228	
	Acueducto La Salada Parte Baja	Q. La Mina	80.00	2.71	2.71	212	Q. la Salada	828,197.0	1,160,985.0							Deivid Alonso Montoya		2788738	
	Acueducto veredal La Chuscala	Q. La Cusumba Y la Julia		10.00	10.00	360	Q. la Chuscala	826,249.0	1,163,542.0							Manuel Londoño	Vereda La Chuscala	2786210	
	Acueducto La Mansión	Q. La Rápida		0.87	0.87	144	Q. la Corrala	828,660.0	1,165,513.0				x			Luis Enrique Cortes	Sector La Mansión	3038113	
	Acueducto Veredal Los Velez	Q. los Vélez		1.50	1.50		Q. la Miel	831,036.0	1,166,284.0				x			Luz Marina Naranjo	Vereda la Miel	3030375	
	Acueducto Los Doce	Cañada Honda		0.69	0.69	80													
	Acueducto Veredal el Raizal	Q. la Gazapera y La Picina		2.78	2.78	270	Q. la Valeria	825,726.0	1,164,647.0								Jose Pablo Snachez		3388790
	Acueducto Multiveredal Corrala Corralita	Q. la Miel					Q. la Corrala	829,127.0	1,164,908.0								Alveiro Zuluaga	Vereda Corralita Parte Alta	3037209
	Acueducto Vereda el sesenta	Cañada Curva de Cuchas				110	Q. Alto de san Miguel	830,667.0	1,158,427.0				x				Manuel Toro	Vereda el Sesenta	3037848
	Acueducto la Quiebra	Q. san Fransico 1, San fransisco 2		2.00	2.00	300	SN	826,889.0	1,161,537.0				x				Virgilio René Restrepo		2785426
	Acueducto veredal Aguacatala	Q. la Cano		4.00	4.00		SN	826,717.0	1,166,808.0										
	Acueducto Veredal la Clara (J.A.C. Vereda la Clara)	Q. la Sultana		1.27	1.27		Q. la Clara	831,838.0	11,600,916.0										
	Acueducto Veredal Cardalito (J.A.C Vereda Cardalito)	Q. el Mocho		0.26	0.26		Q. la salada	827,735.0	1,156,685.0										
	Acueducto Comunitario Barrio Andalucía (J.A.C)	Q. el Laurel		0.36	0.36		SN	827,656.0	1,164,911.0										
Acueducto Barrio Jesus de la Buena speranza (J.A.C)	La Cano # 2		0.87	0.87		SN	827,580.0	1,165,697.0											
Acueducto la Mani del Cardal	Nacimiento Natural					Q. la Salada	827,179.0	1,159,909.0								Alicia Hurtado		2784860	

MUNICIPIO	NOMBRE DEL ACUEDUCTO	NOMBRE DE LA FUENTE	CAUDAL DE LA FUENTE (l/s)	CAUDAL OTORGADO (l/s)	CAUDAL OTORGADO (l/s)	# SUSCRIPTORES	CUENCA	COORDENADAS DE CAPTACIÓN		MEDIDORES		AGUA POTABLE		SISTEMA DE POTABILIZACIÓN			ADMINISTRADOR	DIRECCIÓN	TELEFONO
								X	Y	MACRO	MICRO	SI	NO	D	FLOC	FIL			
BARBOSA	Asociación Junta Administradora de Acueducto Vereda la Calda	Q. Aguas Frias		1.98	1.98	132	Q. la Caldas	864,787.0	1,210,056.0		x		x	x			Hernan Cataño Sossa	Vda La Calda	453 81 84
	Asociación de Usuarios de Acueducto Lajas La Herradura	Q. la herradura		1.45	1.45	140	Q. la Herradura	867,124.0	1,205,517.0		x	x					Raul Florez	Vda La Herradura	
	Asociación de Usuarios del el Acueducto Veredal Platanito	Q. la Aguada Platanito		3.00	3 - 1,2	290	Q. Platanillo	853,302.0	1,199,541.0				x	x	x	x	Jhon Jairo Montoya	Vda Platanito	407 10 04-3004612762
	Acueducto Veredal Las Peñas.	Q. los limones, las peñas, sin Nombre		0.51	0.51	40	Q. Cestillal	859,212.0	1,205,550.0				x				Pedro Monsalve	Vda Las Peñas	407 70 16
	Asociación de Usuarios Acueducto Vereda Buenos Aires	Q. la Pizarra		0.40	0.40	70	Q. la López	861,549.0	1,202,746.0				x	x			Gustavo Adolfo Escobar C.	Vda Buenos Aires	466 2215
	Coorporación Asociados Acueducto Vereda Filo Verde	La que se Abniega Las Minas		8.00	8.00	305	Q. la Silva	850,531.0	1,201,125.0				x	x	x	x	David Castrillon	Vda Filoverde	407 05 07
	Acueducto vereda Cestillal	Q. La Hoya		1.36	1.36	88	Q. Cestillal	856,884.0	1,205,441.0				x		x	x	Oscar Sosa	Vda Cestillal	866 49 55
	Asociación Acueducto La Lomita Primavera	Q. la Tabaca		3.50	3.50	376	Q. los Totumo	853,336.0	1,201,778.0				x	x			Pedronel Morales	Vda La Lomita	407 14 47
	Asociación de Usuarios del Acueducto Yarumito-Tamborcito	La Murillo - Chucho Puerta		4.50	1,5 - 4,5	214	Q. Yarumito	864,587.0	1,204,983.0				x		x		Raul Marin	Vda Yarumito	406 44 80
	Acueducto Comunal Tablazo Hatillo	Q. las Lajas		1.27	1.27	104	Q. la Trocha	852,301.0	1,201,760.0					x	x		Mario Toro	Vda Tablazo Hatillo	407 11 19
	Asociación Acueducto Veredad El Guayabo	Q. Cestillal - San Carlos		0.86	0.86	70	Q. Cestillal	858,072.0	1,205,060.0				x			x	Obdulio Garcia	Vda El Guayabo	406 45 81
	Acueducto Veredal Vallecitos	Q. Vallesito		0.96	0.96	98	Q. Llano Chiquito	862,717.0	1,203,347.0				x			x	Fernando Allen Meneses	Vda Vallecitos	406 14 28
	Acueducto Veredal de Chorrohondo	Nacimientos Q. Mal Paso y la Uvita		0.45	0,67 - 0,22	42	Q. Platanillo	853,416.0	1,197,502.0				x				Ovidio Soto	Vda Chorrohondo	454 64 26
	Acueducto Veredal El Peñasco	Q. El peñasco y Cañada honda		0.00	0.00	60	Q. la Cucha	869,885.0	1,210,156.0					x			Beatriz E. Vargas	Vda La Cuesta	453 80 64
	Acueducto Veredal El Paraiso	Q. la Mina Seniega		0.00	0.00	142	Q. la Queseria	851,933.0	1,201,393.0					x	x		Olga Bedoya	Vda El Paraiso	407 08 36
	Acueducto Veredal El Hatillo	Q. San Antonio		4.60	4.60	430	Q. Platanillo	854,352.0	1,199,305.0				x		x	x	Gilberto A. Vanegas	Cto Hatillo	407 01 44-3163677941
	Acueducto Veredal La Chorrera	Q. la Chorrera		0.00	0.00	135	Q. la Ovejas	860,974.0	1,200,275.0				x		x	x	Gildardo Agudelo	Vda La Chorrera	406 41 64
	Acueducto Veredal La Cejita	Q. aguas Frias		0.00	0.00	65	Q. Aguas Frias	871,797.0	1,209,689.0				x		x		Eduardo Gomez	Vda La Cejita	323 81 40
	Acueducto Veredal Dos Quebradas	Nacimiento la Delia		0.30	0.30	16	Q. Llano Chiquito	864,337.0	1,203,534.0				x				Rosmira Franco	Vda Dos Quebradas	406 04 65
	Acueducto veredal La Montañita	Q. los Cinco Riales y la Montañita		0.00	0.00	160	Q. Cinconales	862,316.0	1,207,419.0				x				Luis Lopez	Vda la Montañita	406 03 83
	Acueducto Veredal La Esmeralda	Q. Javier Angel, La chicharra		0.78	0.78	98	Q. la Ovejas	859,979.0	1,203,014.0					x			Lazaro Hoyos	Barrio La Esmeralda	406 06 59
	Acueducto Veredal Potrerito	Q. potreritos		0.00	0.00	48	Q. la Ovejas	860,647.0	1,201,878.0					x			Pedro Iondoño	Vda Potreritos	406 63 27
	Corporación Acueducto Veredal Aguas Claras Arriba	Q. El Guaico friega Platos		0.00	0.00	51	Q. aguas Claras	871,530.0	1,207,620.0					x	x		Arturo Isaza	Vda Aguas Claras Arriba	453 80 60
Asociación de usuarios del acueducto de Popalito	Q. la Llorona		2.60	2.60	109	SN	866,089.0	1,208,187.0				x		x		Luis Carlos Munera Giraldo	Vereda Popalito	466 24 12	
Acueducto Veredal Las Victorias	Q. el Aguacate, el Pino, sin Nombre		1.20	1.20	84	Q. la Montera	865,889.0	1,210,991.0					x			Martha Tobon	Vda Las Victorias	453 81 67	
Acueducto Veredal Monteloro			0.00	0.00	53	Q. la Herradura	870,028.0	1,205,149.0					x			Frank Esteban Garcia	Vda Monteloro	300 658 90 30	
Acueducto Multiveredal Aguas Cristalinas	Q. pantanillo		5.00	5.00	550								x	x	x	Gloria Soto	Clle 15 No 14-48	406 11 19- 406 20 08	
SABANETA	Corporación de usuarios de acueducto y alcantarillado María Auxiliadora -	La Romera		1.98	1.98	364	Q. la Doctora	831,752.0	1,171,723.0			x			x	x	Ramon Mazo Gonzalez	Crr 36 # 55A Sur 54 Apto 216	2883710
	Asociación de usuarios del acueducto de las brisas y San Isidro	Gusano		0.28	0.28	230	Q. la Doctora	829,842.0	1,171,304.0			x			x	x	Felix Rojas	Crr 30 # 62 Sur 280	2884957
	Junta de acción comunal Las Lomitas	Palenque o La Honda		0.89	0.89	320	Q. la Doctora	831,325.0	1,171,446.0			x			x	x	Carlos Omar Gil	Crr 32 # 61 Sur 83	2887643
	Corporación de acueducto agua vieja de María	Palenque o La Honda		0.76	0.76	200	Q. la Doctora	830,412.0	1,171,838.0			x			x	x			
	Corporación de usuarios de acueducto y alcantarillado La Floresta	Palenque o La Honda		0.61	0.61	180	Q. la Doctora	830,981.0	1,172,324.0			x			x	x			
	Corporación de usuarios de acueducto y alcantarillado Las Margaritas	Las Margaritas		6.01	6.01	60	Q. la Doctora	829,060.0	1,171,660.0			x			x	x	Alvaro A. Quiceno	Cll 77 Sur # 29-279 int. 103	2888302
	Asociación de usuarios del acueducto veredal La Doctora e.s.p	la Selva Canalon		3.86	3.86	700	Q. la Doctora	831,301.0	1,169,584.0			x			x	x			
	Corporación de usuarios del acueducto y alcantarillado Cañaveralejo	la Selva		2.67	2.67	300	Q. la Doctora	828,976.0	1,171,078.0			x			x	x	Jhon Jairo Gomez A.	Cll 78 Sur # 35-213	2885021
Asociación de usuarios del servicio de agua potable y alcantarillado de pan de azúcar asualpa	la Selva				358	Q. la Doctora	828,591.0	1,171,181.0			x			x	x	Jorge Ignacio Henao C.	Cll 81 Sur # 32-51	3020654	

MUNICIPIO	NOMBRE DEL ACUEDUCTO	NOMBRE DE LA FUENTE	CAUDAL DE LA FUENTE (l/s)	CAUDAL OTORGADO (l/s)	CAUDAL OTORGADO (l/s)	# SUSCRIPTORES	CUENCA	COORDENADAS DE CAPTACIÓN		MEDIDORES		AGUA POTABLE		SISTEMA DE POTABILIZACIÓN			ADMINISTRADOR	DIRECCIÓN	TELEFONO	
								X	Y	MACRO	MICRO	SI	NO	D	FLOC	FIL				CLOR
ENVIGADO	Acueducto Loma El Escobero	El Atravesado		3.50	3.50	388	Q. la Ayurá					x					Cesár Palacio Londoño	CI 36 D Sur 25 B-82	336 16 69	
	Asociación del acueducto y alcantarillado Chingui 1	Ahuyamera La Pavita		3.64	3.64	264	Q. la Ayurá					x		x			Miguel Olaya	CI 39 B sur 25 AA-102	332 50 28	
	Junta de acción comunal El Salado La Pavita	La Pava		3.00	3.00	93	Q. la Ayurá						x				Juan Quiroz	Cr 24 C 39D Sur 20	3317735	
	Asociación de socios del acueducto y/o alcantarillado del barrio El Socorro	El Salado			6.50	6.50	610	Q. la Ayurá					x				William Giraldo Celis	CI 40 Sur 24E-19	332 50 28	
	Consejo Comunal Las Brujas	El Atravesado		1.04	1.04	80	Q. la Ayurá					x	x	x		x	María Elena Uribe Jaramillo	CI 37B sur 27D-2 casa 120	331 69 61	
	La Morgan	La Morgan		1.50	1.50	162	Q. la Ayurá						x			x	Carlos Alberto Grajales	Vereda Las Palmas	386 11 65	
	Asociación de usuarios de acueducto y alcantarillado La Catedral	Cañada Honda		3.00	3.00	125	Q. la Ayurá						x				Bernardo Torres	Cr 29 40 Sur 10	334 18 43-331 05 98	
	Acueducto José Manuel Restrepo	Afl. La Mina		0.71	0.71	73	Q. la Ayurá						x				Alfonso Hernández	CL 41B sur 25-95	332 70 04	
	Federación Zuñiga	La Sebastiana		6.03	6.03	210	Q. la Ayurá						x				Adolfo León Ochoa Escobar	Cr 27D 34DD sur-72 (102)	270 60 26	
	Consejo Comunal Loma del Barro	Cien Pesos		1.50	1.50	59	Q. la Ayurá						x				William Osorio Ceballos	CII 49 D sur 39 B 250	270 75 63	
	Acueducto Urbanización Las Palmas y El Paraíso	Las Palmas		1.63	1.63	136	Q. la Ayurá						x				Aleida Osorio	Urb. Las Palmas Vereda Las Palmas	386 11 61	
	Junta Administradora del acueducto San Rafael	Arroyo Samuel Gil		0.45	0.45	26	Q. la Ayurá						x				Darío Catañeda	CII 41AA 29 B 21	276 73 98	
	Asociación de usuarios del acueducto San José, sector La Mina y San José	La Mina		3.50	3.50	210	Q. la Ayurá						x				José Angel Vasquez	CII 40 D 28 A 9	276 42 10	
	Asociación de usuarios de acueducto y alcantarillado Jose Miguel de La Calle	La Seca		0.98	0.98	59	Q. la Ayurá						x		x		Jorge Alberto Patiño Alzate	CII 45 B sur 36-84		
	Junta Administradora del Acueducto Esmeraldas	La Honda La Catalina		0.88	0.88	89	Q. la Ayurá						x				Jaime Montoya	Cr. 25 B 27 sur 21 (112)	336 07 56	
	Acueducto Acuañuga	Honda y Sta.Catalina		1.01	1,01 y 1,01	89	Q. la Ayurá						x				Renzo Torres		313 55 24	
	Corporación de usuarios del acueducto y alcantarillado barrio Alto de Las Flores	Cien Pesos		1.45	1.45	277	Q. la Ayurá						x				Alirio Agudelo	CI 52 B sur 40-20	302 53 98	
	Asociación Acueducto y alcantarillado Cristal Peñazul	El Palo		12.25	20 y 4,5	1709	Q. la Ayurá						x		x	x	x	Oscar Mauricio Alzate	CII 40S 24 E 07 (201)	333 33 00
	Acueducto Comunal Manuel Uribe Angel Parte Alta	Chorrofrío		3.06	3.06	236	Q. la Ayurá						x				Guillermo Castaño	Tr. 34 Bs 29 42 (206)	270 87 66	
	Asociación de usuarios del acueducto La Palmera	El Capiro		0.12	0.12	43	Q. la Ayurá						x				Juan Alzate	CII 40 A sur 25-63	270 60 27	
	JAC La Mina Parte Alta	Afl. sin nombre, Afl. La Palmera y La Minita		0.07	0,10, 0,066 y 0,053	7, 5 y 5	Q. la Ayurá						x				Fabio Benjumea			
	Acueducto Parcelación Manantiales de la Acuarela	Aguas de Telecom		0.70	0.70	22	Q. la Ayurá						x		x	x	x	Bayron Atehortua		542 00 23
	Acueducto de Parcelación el Espigal	Las Palmas		0.55	0.55	42	Q. la Ayurá							x	x	x	x	María Cecilia Ochoa		232 80 63- 313 21 84
	Acueducto Parcelación la Acuarela	Las Palmas		0.40	0.40	22	Q. la Ayurá						x		x	x	x	Antonio Ocampo		266 03 79
	Acta de Parcelación Aldea de Palmaverde	Aguas de Telecom		0.21	0.21	16	Q. la Ayurá						x		x	x	x	Antonio Ocampo		266 03 79
	Acueducto de Parcelación Arrayanes	Horizontes y cañada El Diablo		1.83	1.83	94	Q. la Ayurá						x	x	x	x		Claudia Mora		386 13 11- 268 31 77
	Acueducto de Parcelación Villa Serena	Qda y Afl.2 Qda.La Ardita		0.10	0,144 y 0,144 y 0,025	12	Q. la Ayurá						x		x	x	x	Agustín Echavarría		386 09 46
	Asociación de usuarios Acueducto "APURES"	Qda. El Llano		0.75	0.75	75	Q. la Ayurá						x					Luz Elena Rios Uribe		386 02 92- 341 45 19
	Asociación de usuarios del Acueducto Bosques de la Esperanza Parte Alta	Morro 2		0.30	0.30	16	Q. la Ayurá						x		x	x	x	María Eugenia Osorio de Duque		386 07 71
	Acueducto de Condominio Urbanización Las Palmas N° 1					12	Q. la Ayurá						x					Nidia Gómez		386 17 29
Acueducto de Parcelación el Escobero	La Pavita y La Laura		0.30	0.30	23	Q. la Ayurá						x		x	x	x	Jhonny Oswaldo Vélez			
Asociación de usuarios del Acueducto Aguas Telecom"ACUATEL"	Aguas de Telecom		1.31	1.31	10	Q. la Ayurá											Mauricio Jaramillo Vallejo		386 07 20	
Acueducto de parcelación Palmitas	Alaska		0.75	0.75	14	Q. la Ayurá						x					José González		324 05 54	
Junta de Acción Comunal La Catedral	La Toma Arenales				154	Q. la Ayurá						x					Hilda Mery Gutiérrez	Arenales	332 93 48	
Acueducto Los Rodas	La Pavita					Q. la Ayurá						x		x	x	x	José Fernando Escobar Restrepo		270 84 20	
J.A.C Acueducto El Vallano Parte Oriental	La Pavita		0.21	0.21	16	Q. la Ayurá						x					Enrique Villarraga		333 32 93	

MUNICIPIO	NOMBRE DEL ACUEDUCTO	NOMBRE DE LA FUENTE	CAUDAL DE LA FUENTE (l/s)	CAUDAL OTORGADO (l/s)	CAUDAL OTORGADO (l/s)	# SUSCRIPTORES	CUENCA	COORDENADAS DE CAPTACIÓN		MEDIDORES		AGUA POTABLE		SISTEMA DE POTABILIZACIÓN				ADMINISTRADOR	DIRECCIÓN	TELEFONO	
								X	Y	MACRO	MICRO	SI	NO	D	FLOC	FIL	CLOR				
LA ESTRELLA	Acueducto Multiveredal La Tablaza	La culebra		18.62	18.62	1858	Q. la Culebra	825,160.0	1,169,057.0		x	x		x	x	x	x	Secretaria de Servicios Publicos	Calle 100B sur # 57-74	2789704	
	Acueducto Multiveredal La Tablaza	Miraflores		4.24	4.24	512					x	x		x	x	x	x	Secretaria de Servicios Publicos	Calle 100B sur # 57-75	2789704	
	Acueducto Multiveredal La Tablaza	Don Toto		0.20	0.20	138					x	x		x	x	x	x	Secretaria de Servicios Publicos	Calle 100B sur # 57-76	2789704	
	Acueducto Multiveredal La Tablaza	Manantiales		0.08	0.08							x	x		x	x	x	x	Secretaria de Servicios Publicos	Calle 100B sur # 57-77	2789704
	Acueducto Multiveredal La Tablaza	La sierra		0.45	0.45							x	x		x	x	x	x	Secretaria de Servicios Publicos	Calle 100B sur # 57-78	2789704
	Acueducto Multiveredal La Tablaza	La corazona		0.28	0.28		30					x	x		x	x	x	x	Secretaria de Servicios Publicos	Calle 100B sur # 57-79	2789704
	Acueducto Multiveredal La Tablaza	Tablacita		0.33	0.33	49	Q. Tablacita	828,987.0	1,167,981.0		x	x		x	x	x	x	Secretaria de Servicios Publicos	Calle 100B sur # 57-80	2789704	
	Acueducto Multiveredal La Tablaza	La Bermejala		8.84	8.84	1024	Q. la Bermejala	855,400.0	1,170,038.0		x		x					Secretaria de Servicios Publicos	Calle 100B sur # 57-81	2789704	
	Junta Administradora de Acueducto El pedrero	Q. Grande		2.36	2.36		Quebrada Grande	826,613.0	1,172,401.0									Aleida Maria Arango	Barrio el Pedrero la Estrella	3021322	
	Junta Administradora de Acueducto El Llano La Culebra						Q. la Culebra	824,802.0	1,168,555.0									Angela Ruiz	Vereda el Llano la Culebra	3784533	
	Junta Administradora de Acueducto San Isidro	Q. san isidro				70	SN	829,824.0	1,168,531.0		x		x	x				Angela Usuga	Vereda San isidro	3031316	
	Junta Administradora de Acueducto Barrio San José	Q. la Ospina (FSN)		1.26	1.26		SN	827,146.0	1,172,740.0		x			x	x	x	x	Liliana Maria Acevedo	Vereda san Jose	3792983	
	Junta Administradora de Acueducto Umbria La Raya	Q. la Raya				60	Q. la Raya	826,763.0	1,167,909.0									Luis Eduardo Villa		3035846	
	Junta Administradora de Acueducto San Jose Meleguindo			0.23	0.23		Quebrada Grande	823,271.0	1,172,310.0									Gustavo Jaramillo		2797948	
	Junta Administradora de Acueducto La Inmaculada 1	Q. la Bermejala		11.46	11.46		Q. la Bermejala	826,595.0	1,170,277.0									Humbreto Arredondo		2793307	
	Acueducto Vereda La Raya	Q. el Tanque		0.26	0.26		Q. la Raya	825,615.0	117,164.0												
	Asoc. usuar. acued. vereda la Bermejala	Q. la Bermejala		1.07	1.07		Q. la Bermejala	825,854.0	1,170,038.0												
	Asociacion de usuarios del acueducto de la vereda	Q. la Bermejala		0.87	0.87		Q. la Bermejala	824,060.0	1,169,679.0												
Acueducto multiveredal (fuentes del chile)	Quebrada Grande		0.23	0.23		Quebrada Grande	855,519.0	1,171,664.0													
GIRARDOTA	Acueducto Veredal El Barro 1	Q. el Tigre		0.57	0.57	32	Q. el Salado	849,098.0	1,196,180.0									Israel Lopez	Vereda El Barro	2817174	
	Acueducto Veredal El Barro 2	Q. el Tigre		0.57	0.57	40	Q. el Salado	849,164.0	1,195,291.0									Luz Marina Vanegas	Vereda El Barro	2891318	
	Acueducto Veredal El Barro 3	Q. La Calera				63	Q. el Salado	849,559.0	1,194,829.0				x	x				Sandra Arboleda	Vereda El Barro	2892544	
	Acueducto veredal el Cano						Q. el Salado	851,839.0	1,194,590.0												
	Acueducto Veredal El Roble	Mal paso				480	Q. el Salado	852,781.0	1,194,890.0		x	x						Luz Eneida Pulgarin	Veredas Cano y Yarumo		
	Acueducto Veredal El Totumo Escuela	Q. la Fátima		0.21	0.21	34	Q. la Cascada	845,294.0	1,195,831.0		x		x	x	x	x		Juan de Jesus Torres Avendaño	Vereda el Tutumo	5168425	
	Acueducto Veredal Encenillos					63	Q. Fulgencio Ence	852,353.0	1,196,772.0				x					Cesar Emilio Henao	Vereda Encenillos	2890410	
	Acueducto veredal Jamunidí 1 Escuela					189	Q. el Saldo	849,914.6	1,196,558.6				x					Elkin D. Castro	Vereda Jamunidí	2895247	
	Acueducto Veredal Jamunidí 2					130	Q. el Saldo	850,128.5	1,195,403.5				x					Jhon J. Carmona	Vereda Jamunidí	2898394	
	Acueducto Veredal Juan Cojo El Tigre	Q. Currucao		0.97	0.97	105	Q. Juan Cojo	847,219.4	1,193,349.0		x	x						Carlos Gomez	Vereda Juan Cojo	2891758	
	Acueducto Veredal Juan Cojo El tabano	Q. Currucao		0.33	0.33	400	Q. la Ferrería	847,818.0	1,195,275.0		x	x						Carlos Gomez	Vereda Juan Cojo	2890009	
	Acueducto Veredal La Calera	Q. El tigre		0.10	0.10	30	Q. el salado	849,914.0	1,193,521.0				x					Gabriel Angel Gallego	Vereda La calera	2890009	
	Acueducto veredal La Meseta					54	Q. Fulgencio Ence	852,097.0	1,198,442.0		x		x					Gabriel Sanchez	Vereda La Meseta		
	Acueducto Veredal La Palma	Q.Chical		2.75	2.75	197	Q. la Silva	850,043.0	1,201,009.0		x	x						Jesús A. Castaño	Vereda La Palma	2894415	
	Acueducto Veredal Loma de los Ochoa	Q. la Soledad				50	Q. la Represa	847,384.0	1,198,036.0				x					Maria Cristina Mazo	Vereda Loma de los Ochoa	4675125	
	Acueducto Veredal Lomatica	La Mata		1.85	1.85	360	Q. la Mata	846,626.0	1,201,091.0				x					Gonzalo Sierra	Vereda Lomatica	4565452	
	Acueducto Veredal Manga Arriba	Juan Cojo		1.85	1.85	130	Q. Juan Cojo	846,919.0	1,195,232.0		x	x						Ignacio Alzate	Vereda Manga Arriba	4560317	
	Acueducto Veredal Manga Arriba Escuela	Q. Chachafuto		0.63	0.63	140	Q. Juan Cojo	846,663.0	1,194,205.0		x		x					Joaquin Hoyos	Vereda Manga Arriba	4544257	
	Acueducto Veredal Matica Baja	Q. la Correa		2.80	2.80	86	SN	848,867.0	1,198,488.0		x		x					Luisa Cordoba	Vereda Matica Baja	2892351	
	Acueducto Veredal Mercedes Abrego	La Correa		1.87	1.87	220	Q. el Caimito	849,188.0	1,200,710.0		x		x					Ignacio Rave	Vereda Mercedes Abrego	2742280	
	Acueducto Veredal Nueva Antioquia					100	Q. la cascado	845,176.0	1,195,070.0		x		x					Ivan Dario Coek	Vereda Totumo	2893293	
	Acueducto Veredal Portachuelo	SN (Afl. Quebrada el Limonar)		1.11	1.11	172	Q. Doña Chepa	845,341.0	1,198,059.0		x		x					Gabriela Saldarriaga	Vereda Portachuelo	2304375	
	Acueducto Veredal Potrerito	Q. Potrito		0.60	0.60	53	Q. la Correa	848,142.0	1,202,222.0				x					Mario Castaño	Vereda Potrerito	2892995	
	Acueducto Veredal San Andres	Q. la Correa		0.57	0.57	220	Q. la Correa	848,888.0	1,200,025.0				x					Victor Meneses	Vereda San Andres	3238374	
Acueducto Veredal san Diego	Maria Ignacia		2.43	2.43	291	Q. Fulgencio Ence	850,771.0	1,199,212.0		x		x					Oscar Rodriguez	Vereda San Diego	2890668		
Acueducto Veredal San Diego Sector 1	Q. los Carmona		2.00	2.00	60	Q. el Saldo	850,000.0	1,197,672.0				x					Marta Pulgarin	Vereda San Diego	2895141		
Acueducto Veredal San esteban	Q. Las Ortegas		2.10	2.10	320	Q. la Mata	846,165.0	1,198,553.0				x					Marco Fidel Echeverri	Vereda San Esteban	2895141		

