

005A

00/2002/
AFORMAS

Una aproximación al Estado del Arte del Recurso Hídrico en Antioquia



Compilación
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia
2002



Una aproximación al Estado del Arte
del Recurso Hídrico en Antioquia

Compilación

Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia

2002



TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	10
1.1.	CÁTEDRA DEL AGUA	10
1.2.	OBJETIVOS	12
1.3.	A FUTURO	13
2.	INVENTARIO GENERAL DE AGUAS Y SUS CALIDADES EN ANTIOQUIA	15
2.1.	CATÁLOGO DE ESTUDIOS DE CANTIDAD Y CALIDAD DEL RECURSO	15
2.2.	ESTADO DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA EN ANTIOQUIA	17
2.2.1.	Distribución espacial de la información	18
2.2.2.	Calidad de los registros hidrológicos	23
2.3.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	24
2.4.	INVENTARIO HÍDRICO	26
2.4.1.	Variables macroclimáticas	26
2.4.2.	Conclusiones	30
3.	MÉTODOS BIOLÓGICOS DE DESCONTAMINACIÓN	33
3.1.	DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES REALIZADAS	33
3.1.1.	Revisión bibliográfica	33
3.1.2.	Estado del tratamiento de aguas residuales en Colombia y Antioquia	34
3.1.3.	Inventario de sistemas en Antioquia	34
3.2.	ESTADO DEL ARTE	34

3.3.	ESTADO DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	35
3.4.	INVENTARIO DE SISTEMAS EN ANTIOQUIA	36
3.5.	CONCLUSIONES	38
4.	CRECIDAS, TORRENTES Y ASENTAMIENTOS HUMANOS	40
4.1.	METODOLOGÍA	40
4.1.1.	Búsqueda y recopilación de información	40
4.1.2.	Análisis y síntesis de información	40
4.1.3.	Propuestas de procesos de apropiación	40
4.2.	RESULTADOS	41
4.2.1.	Instituciones contactadas	41
4.2.2.	Base de datos	41
4.3.	ANÁLISIS	45
4.3.1.	Localización de estudios	45
4.3.2.	Temas más tratados	45
4.3.3.	Número de estudios por municipio	45
4.4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
5.	INTERACCIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN	49
5.1.	METODOLOGÍA	50
5.1.1.	Recopilación de información	50
5.1.2.	Análisis y síntesis de la información recopilada	50
5.1.3.	Procesos de divulgación	50
5.2.	RESULTADOS	50
5.2.1.	Desarrollo de la base de datos con la información disponible para el Departamento	50
5.2.2.	Encuesta dirigida a investigadores y gestores de proyectos	54
5.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	55

5.3.1.	Temas tratados en los trabajos recopilados	55
5.3.2.	Regiones más estudiadas del Departamento	56
5.3.3.	Análisis de coberturas vegetales	56
5.4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
6.	USO EFICIENTE Y AHORRO DEL AGUA	59
6.1.	DEMANDA DE AGUA EN EL DEPARTAMENTO	59
6.1.1.	Sector doméstico y terciario	61
6.1.2.	Sector agropecuario	63
6.1.3.	Sector hidroeléctrico	65
6.1.4.	Sector industrial	66
6.2.	ÍNDICES DE CONSUMO	67
6.2.1.	Sector doméstico	68
6.2.2.	Sector agropecuario	70
6.2.3.	Sector industrial	71
6.3.	PRODUCTIVIDAD DE AGUA EN EL DEPARTAMENTO	72
6.4.	TECNOLOGÍAS DE AHORRO Y USO EFICIENTE	73
6.4.1.	Tecnologías para el sector domiciliario	73
6.4.2.	Tecnologías para el sector industrial	74
6.5.	RESULTADOS DE PROGRAMAS DE REUSO DE AGUA EN 12 EMPRESAS DE GALVANOPLASTIA EN LA CIUDAD DE MEDELLIN	76
6.6.	POLÍTICAS PARA EL AHORRO Y USO EFICIENTE DEL AGUA	77
6.6.1.	Política del precio	77
6.6.2.	Estímulo a tecnologías de ahorro del agua	81
6.6.3.	Desarrollo normativo	83
6.6.4.	Campañas educativas	84
	CRÉDITOS A GRUPOS DE TRABAJO	85

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	<u>Interfaz de búsqueda</u>	16
2.2	<u>Interfaz de ingreso de nuevos registros</u>	17
2.3	<u>Distribución de las estaciones para registro de precipitación y caudal</u>	18
2.4	<u>Distribución de otras estaciones hidroclimatológicas</u>	19
2.5	<u>Estaciones de caudal por rangos de áreas para la región considerada</u>	19
2.6	<u>Estaciones de caudal por rangos de áreas en algunas regiones del Departamento de Antioquia</u>	21
2.7	<u>Estaciones hidrometeorológicas que permanecen en operación en el Departamento de Antioquia para registros de precipitación y caudal</u>	22
2.8	<u>Estaciones hidroclimatológicas que permanecen en operación en el Departamento de Antioquia</u>	22
2.9	<u>Longitud de registros y localización de estaciones de caudal medio</u>	23
2.10	<u>Porcentaje de datos faltantes de estaciones de caudal medio</u>	24
2.11	<u>Mapa de temperatura media anual</u>	26
2.12	<u>Mapa de precipitación media anual</u>	29
2.13	<u>Mapa de evapotranspiración real media anual</u>	30
3.1	<u>Tecnologías de tratamiento biológico empleadas</u>	37
3.2	<u>Sistemas de tratamiento por industria</u>	37
4.1	<u>Distribución geográfica de trabajos</u>	45
4.2	<u>Tipos de estudio desarrollados en Antioquia</u>	46
4.3	<u>Cantidad de estudios por municipio en Antioquia vs. Número de inundaciones</u>	46

5.1	<u>Distribución de estudios en el Departamento</u>	56
5.2	<u>Estudios según el tipo de cobertura vegetal</u>	56
6.1	<u>Consumo de agua por sectores en Antioquia</u>	60
6.2	<u>Porcentaje de utilización por estrato del agua de uso residencial</u>	62
6.3	<u>Participación de cultivos en el consumo de agua en el agro antioqueño</u>	64
6.4	<u>Participación del sector pecuario en el consumo de agua del Departamento de Antioquia</u>	65
6.5	<u>Energía eléctrica consumida por sectores en el Departamento de Antioquia</u>	66
6.6	<u>Índices de consumo por usuario por mes en varias ciudades americanas</u>	68
6.7	<u>Índices de consumo por persona al año en el Área Metropolitana</u>	68
6.8	<u>Evolución del índice de consumo por usuario en el Área Metropolitana por estrato</u>	69
6.9	<u>Índices de consumo por persona al año en algunos municipios de Antioquia</u>	69
6.10	<u>Índices de consumo en algunas entidades de servicio</u>	70
6.11	<u>Índice de consumo de agua por cultivo en Antioquia</u>	71
6.12	<u>Algunos índices de consumo industriales</u>	71
6.13	<u>Productividad del agua en el Departamento de Antioquia</u>	72
6.14	<u>Ahorros en proyecto de re-uso de agua en galvanoplastia</u>	77
6.15	<u>Evolución del consumo y el precio en el sector residencial del Área Metropolitana del Valle de Aburrá</u>	78
6.16	<u>Evolución de consumos y precios en el sector industrial de Antioquia</u>	78
6.17	<u>Comparación del valor del agua en Antioquia y algunas naciones europeas</u>	80
6.18	<u>Agua no contabilizada en algunas ciudades europeas y su comparación con Medellín</u>	80
6.19	<u>Relación Precio-Consumo en diferentes lugares del mundo y del Departamento de Antioquia</u>	81
6.20	<u>Porcentajes de ahorro según la tecnología implementada (Unión Europea)</u>	82
6.21	<u>Ahorro potencial del agua en algunos sectores industriales (Unión Europea)</u>	82

ÍNDICE DE TABLAS

2.1	<u>Estaciones de caudal por rangos de área para algunas regiones en Antioquia</u>	20
3.1	<u>Situación municipal del tratamiento de aguas residuales en Colombia y Antioquia</u>	36
3.2	<u>Estado actual de los sistemas inventariados en Antioquia</u>	36
4.1	<u>Instituciones contactadas</u>	41
4.2	<u>Resumen de los resultados de la base de datos</u>	41
6.1	<u>Demanda de agua en el sector residencial para el Departamento de Antioquia</u>	61
6.2	<u>Demanda de agua en el sector terciario y de servicios para el año 2000 en el Departamento de Antioquia</u>	62
6.3	<u>Consumo de agua de los principales productos agrícolas de Antioquia</u>	64
6.4	<u>Demanda de agua en el sector industrial para el Departamento de Antioquia</u>	67

PRESENTACIÓN

El Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA), en el marco de la Estrategia de Ciencia y Tecnología para Medellín y Antioquia, promueve 5 temas estratégicos para la competitividad y sostenibilidad de la región en el largo plazo: 'Agua y Medio Ambiente', 'Salud', 'Software', 'Biotecnología' e 'Informática Educativa'.

En cada una de estas grandes áreas temáticas, se convoca a lo mejor del talento regional, vía Cátedras, para trabajar en la construcción de pensamiento estratégico y la definición de lineamientos de política.

La Cátedra del Agua es un mecanismo de articulación, promovido y coordinado por el CTA, que se encuentra soportado en un direccionamiento estratégico con 6 líneas básicas de interés, denominadas Macroproyectos Ejes Prioritarios.

El Convenio Interinstitucional Cátedra del Agua lo constituyen regularmente las siguientes instituciones: (a) Generadores del conocimiento: Universidades de Antioquia, Pontificia Bolivariana, de San Buenaventura, Nacional de Colombia Sede Medellín, Católica de Oriente y Escuela de Ingeniería de Antioquia; (b) Usuarios del conocimiento: Corantioquia, Cornare, Isagen y Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales.

El presente texto es el producto de una revisión y compilación técnica de los aspectos más relevantes de los documentos de actualización del estado del arte en el Departamento de Antioquia a diciembre de 2001, presentados por los grupos de investigación en torno a cinco de los seis macroproyectos definidos: 'Inventario General de Aguas y sus Calidades', 'Métodos Biológicos de Descontaminación', 'Crecidas, Torrentes y Asentamientos Humanos', 'Interacciones Suelo-Agua-Vegetación' y 'Uso Eficiente y Ahorro del Agua'. Se tienen disponibles además, bases de datos de estudios adelantados en cada temática y/o tecnologías disponibles.

Para el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia y para las demás instituciones signatarias de la Cátedra del Agua, la entrega de este documento constituye un motivo de satisfacción, ya que materializa la sinergia tan significativa que se ha generado como resultado del trabajo colectivo y cooperativo, en logros concretos, útiles y aplicables para el beneficio de la región, la sociedad antioqueña y el país, en torno al agua y el medio ambiente.

Esperamos que este documento se constituya en una herramienta de apoyo a la toma de decisiones requerida en el sector del agua y abra las puertas para futuros proyectos colectivos.

Agradecemos a COLCIENCIAS el patrocinio de este impreso y a las entidades signatarias del Convenio Cátedra del Agua por sus aportes.

Rafael Aubad López
Director
CTA

Carlos Daniel Ruiz Carrascal
Coordinador Técnico
Cátedra del Agua

I. INTRODUCCIÓN

I.1. CÁTEDRA DEL AGUA

Teniendo en cuenta que la Política Nacional Ambiental ha contemplado el agua como eje estructural, se ha reconocido la necesidad de una instancia que genere, organice, proyecte y difunda el conocimiento del recurso hídrico en el Departamento, y que al mismo tiempo promueva la investigación, la innovación y el desarrollo tecnológico en el tema del agua, de modo cooperativo, racionalizando costos y aprovechando lo mejor del talento disponible.

Es por eso que, con el objetivo de convocar a los profesionales y a las instituciones más capacitadas para actuar en la construcción de un pensamiento estratégico sobre política, investigación y desarrollo tecnológico del **recurso hídrico** en el Departamento de Antioquia, se firmó a finales de 1996 el Primer Convenio Interinstitucional de la Cátedra del Agua. Durante esta fase, se identificaron los elementos que permitieran en forma interdisciplinaria generar y sistematizar el conocimiento, señalando como criterio básico el énfasis hacia proyectos de investigación y desarrollo de corte transversal y cuya temática contemplase aspectos de decisión para la protección, la conservación, el aprovechamiento, el uso y la recuperación del agua en Antioquia. Se recopilieron cerca de 40 temas de interés que debían ser objeto de preocupación de la Cátedra y se definieron 5 macroproyectos ejes prioritarios, a saber:

- Inventario General de Aguas y sus Calidades en Antioquia.
- Métodos Biológicos de Descontaminación.
- Crecidas, Torrentes y Asentamientos Humanos.
- Interacciones Suelo-Agua-Vegetación.
- Generación, Transporte y Deposición de Lodos y Sedimentos.

Durante el Segundo Convenio se adelantó el sub-proyecto "Mapa Digital de Corrientes Superficiales y Catálogo de Estudios de Cantidad y Calidad del Recurso" en el marco del macroproyecto eje prioritario 'Inventario General de Aguas y sus Calidades'. En ese entonces se desarrolló un software en Interactive Data Language IDL que permitía estimar las características morfométricas de cuencas hidrográficas en el Departamento de Antioquia visibles a una resolución espacial de 30" de arco, además de desplegar registros de una base de datos con la toponimia de las corrientes superficiales, los municipios cercanos, y las estaciones de registro de precipitación y caudal existentes en las diferentes cuencas. El Catálogo asociado incluía estudios de cuantificación, diagnóstico y aprovechamiento del recurso hídrico desarrollados en la región, y disponibles en los Centros de Documentación de las principales instituciones del Departamento relacionadas con el tema.

A finales de la segunda fase del Convenio, surgió la necesidad de considerar un nuevo macroproyecto eje prioritario, relacionado con el 'Uso Eficiente y Ahorro del Agua'.

Durante el Tercer Convenio, firmado para el período 1999-2001 (y ejecutado en dos fases), se consolidó la propuesta de direccionamiento estratégico de la Cátedra mediante el alcance de los siguientes logros:

- Se establecieron los criterios y lineamientos para el desarrollo de una plataforma tecnológica que permita a múltiples usuarios acceder a información.
- Se actualizó la información del 'Catálogo de Estudios de Cantidad y Calidad del Recurso' a la fecha, y se diseñaron y desarrollaron los medios de acceso a la base de datos.
- Se ejecutó la segunda fase del 'Mapa Digital de Corrientes Superficiales' y se distribuyó en la región el Atlas Hidrológico del Departamento de Antioquia, el cual permite desplegar información geográfica de variables hidrometeorológicas y geomorfológicas a través de mapas en diferentes escalas y resoluciones. Esta herramienta permite realizar estudios de aprovechamiento de recursos con fines de abastecimiento, evaluación de la capacidad de asimilación de vertimientos y descargas a los cauces, estudios ambientales y ecológicos, interacciones con el desarrollo social y económico, comportamiento de corrientes ante eventos extremos, entre otros. Constituye una herramienta útil para la toma de decisiones en estudios a nivel de prefectibilidad.
- Se actualizaron los perfiles de los macroproyectos ejes prioritarios de la Cátedra para ajustarse a lineamientos de política.
- Se realizaron eventos de socialización discretizados según: **Jornadas Técnicas de Discusión**, espacios abiertos académicos a los cuales se convocó a los diferentes actores regionales para consolidar un intercambio de ideas en torno a semillas puntuales de discusión; **Talleres Regionales**, espacios abiertos para generadores y usuarios de conocimiento del recurso hídrico, interesados en participar en la definición de lineamientos de política, y que fueron motivados gracias a dinámicas de trabajo previamente diseñadas; y **Encuentros Regionales**, consolidados como eventos de socialización de las dinámicas, metodologías y productos tangibles del trabajo colectivo y cooperativo.
- Se entregaron los documentos de actualización del estado del arte en torno a 5 macroproyectos ejes prioritarios y se consolidaron bases de datos de estudios adelantados en cada temática y/o tecnologías disponibles.

En torno a este último logro mencionado, se presenta este documento consolidado, producto de una compilación técnica de los aspectos más relevantes presentados por los grupos de investigación y relacionados con las respectivas temáticas de interés.

1.2. OBJETIVOS

Presentar un documento consolidado de la actividad 'Estado del Arte en el Departamento de Antioquia' en torno a los macroproyectos ejes prioritarios de la Cátedra del Agua. Se pretende incluir los diagnósticos de la situación, los estados del conocimiento y los procesos de apropiación de cada una de las áreas temáticas.

En aquellos macroproyectos que sea factible, se recopilará los estudios relacionados con el tema, existente en las instituciones de la región, y se creará un catálogo (base de datos) con la información obtenida.

Se busca crear vínculos entre los principales actores regionales que inciden en cada una de las áreas temáticas con el fin de canalizar esfuerzos y orientar los mismos hacia trabajos colectivos y cooperativos.

1.3. A FUTURO

Se propone que la ejecución del macroproyecto eje prioritario 'Inventario General de Aguas y sus Calidades en Antioquia' se lleve a cabo a través de 9 sub-proyectos específicos:

- SP1. Mapa completo de cuencas hidrográficas, corrientes superficiales y sus calidades.
- SP2. Mapa completo de aguas subterráneas y sus calidades.
- SP3. Mapa completo de ciénagas, humedales y sus calidades.
- SP4. Recolección, revisión y homogenización de series hidrológicas históricas.
- SP5. Comportamiento estacional histórico de acuíferos.
- SP6. Instalación y puesta en operación de estaciones hidrometeorológicas de registro automático.
- SP7. Montaje de bases de datos hidrometeorológica e hidroquímica para todo el Departamento.
- SP8. Compilación y sistematización de datos sobre calidad de aguas.
- SP9. Proyecto piloto de evaluación sistémica de calidades en una cuenca específica.

Para el caso de 'Métodos Biológicos de Descontaminación', durante el Primer Encuentro Regional del Agua se planteó la posible división en las siguientes temáticas: (a) bacterias metabolizadoras de cationes tóxicos y cancerígenos; (b) bacterias biorremediadoras de petróleo y detergentes; (c) bacterias mamíferas en aguas residuales; y (d) plantas acuáticas oxigenadoras y para tratamiento de aguas residuales, entre otros.

Para el caso de 'Crecidas, Torrentes y Asentamientos Humanos', se propone la ejecución de 5 sub-proyectos específicos:

- SP1. Compilación de evidencias.
- SP2. Formulación de teoría básica.
- SP3. Identificación de áreas de riesgos hidrológicos.
- SP4. Instrumentación de cuencas hidrográficas.
- SP5. Consolidación del Sistema de Alerta Temprana.

Para el caso de 'Interacciones Suelo-Agua-Vegetación', se propone la ejecución de 5 sub-proyectos específicos:

- SP1. Compilación y análisis.
- SP2. Identificación, estudio y caracterización de coberturas vegetales hidrofíticas y xerofíticas.
- SP3. Agua y fotosíntesis: dinámica en Antioquia.
- SP4. Construcción de modelos dinámicos.
- SP5. Manejo integral de cuencas.

Finalmente, para el caso de 'Uso Eficiente y Ahorro del Agua', se propone plantear innovaciones tecnológicas apropiadas en los sectores del Departamento correspondientes a Servicios Públicos Domiciliarios, Energía, Industria, Agropecuario e Institucional. Como subsectores se considerarán en prioridad los relativos a Agua Potable y Saneamiento Básico, Generación Hidroeléctrica, Textil, Jugos y Bebidas, Café, Banano, Frigoríficos, Minería, Agroindustria, Químico, Cemento, Pulpa y Papel, y Hotelería. Para cada uno de ellos se deberá realizar las siguientes acciones:

- (a). Descripción tecnológica de la actividad.
- (b). Diagramas de operaciones y procesos.
- (c). Determinación de índices de consumo, reutilización, vertimiento y contaminación de aguas.
- (d). Comparación de índices con valores de referencia.
- (e). Requerimientos tecnológicos y análisis de viabilidad de innovaciones.
- (f). Compilación y difusión de recomendaciones.

2. INVENTARIO GENERAL DE AGUAS Y SUS CALIDADES

El proyecto 'Inventario General de Aguas y sus Calidades en Antioquia' desarrolló su Primera Fase durante el año 1998. Los resultados quedaron plasmados en el estudio "Inventario y Balances Hidrológicos de Antioquia. Fase I: Mapa Digital de Cuencas Hidrográficas y Redes de Drenaje de Antioquia. Catálogo de Estudios de Recursos Hidráulicos y Cantidad de Agua", el cual constituyó la primera realización concreta del programa 'Cátedra del Agua', y el punto de partida académico y científico para estudios posteriores. En este documento se presentan los resultados obtenidos por el proyecto en su Segunda Fase: en primera instancia, (a) la actualización del Catálogo de Estudios de Cantidad y Calidad del Recurso en el Departamento de Antioquia, su consulta y la forma de introducir información; en segundo lugar, (b) el diagnóstico del estado de la información hidroclimática en la región enfocando el análisis a la calidad de la información, su distribución espacial y su accesibilidad para el uso en proyectos de investigación; y finalmente, (c) las conclusiones y reflexiones en cuanto a las tendencias en la medición y distribución de la información hidroclimática en Antioquia.

2.1. CATÁLOGO DE ESTUDIOS DE CANTIDAD Y CALIDAD DEL RECURSO

El Catálogo de Estudios de Cantidad y Calidad del Agua en el Departamento de Antioquia está constituido por una Base de Datos (BD) de proyectos y estudios de cuantificación, diagnóstico y aprovechamiento del recurso hídrico en la región, que se encuentran en las diferentes bibliotecas, centros de documentación y archivos del Departamento.

Los estudios incluidos en la BD fueron recopilados en las siguientes entidades: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (Bibliotecas Central, de la Facultad de Minas y Centro de Documentación del Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos), Universidad de Antioquia (Biblioteca Central y Centros de Investigación), Empresas Públicas de Medellín, Interconexión Eléctrica S.A., CORANTIOQUIA, CORNARE, CORPOURABÁ, Planeación Departamental, Planeación Metropolitana, Instituto Mi Río, IDEAM Seccional Medellín, Universidad de Medellín, Universidad Pontificia Bolivariana, Instituto para el Desarrollo de Antioquia (IDEA), las unidades UMATA de diversos municipios (Fredonia, Venecia, Jericó), Escuela de Ingeniería de Antioquia, Cenicafé, Integral S.A., SEDIC S.A., Mejía y Villegas Ingenieros S.A., HIDRAMSA Ltda., ISAGEN, Centro de Documentación METRO, Universidad EAFIT, Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC), Instituto Politécnico Jaime Isaza Cadavid, Biblioteca Municipal, Dirección de Salud y Planeación del Municipio de Rionegro, Fundación Biblioteca de Itagüí, Planeación Municipal y Subdirección del Medio Ambiente del Municipio de Itagüí, Secretaría de Medio Ambiente y Secretaría de Salud de Sabaneta.

Se incluyen más de **1650 registros** con referencias acerca de temas relacionados con ecología de las plantas, climatología, geología, geohidrología, geomorfología, tectónica, hidrología, erosión, aguas subterráneas, hidrografía, aguas

de superficie, hidráulica fluvial, meteorología, hidrometeorología, ingeniería del suelo, ingeniería estructural, protección de cultivos, topografía, ingeniería ambiental, ingeniería sanitaria y generación de energía.

Este nuevo catálogo constituye una actualización del obtenido en la Primera Fase, el cual permitía la recopilación de **900 registros** y cuya consulta era posible de forma directa utilizando Excel.

Esta actualización, además de constituir una BD más completa, incorpora un sistema de rápido y fácil acceso posible a través del Sitio Web <http://poseidon.unalmed.edu.co/catedraagua/Busquedas.htm>, la consulta sin previas autorizaciones y ningún tipo de sistema operativo específico. Como motor de búsqueda se utiliza PostgreSQL 6.5.3, que funciona gratuitamente para el Sistema Operativo Linux. La interfaz gráfica de los datos se hizo sobre HTML, conectada con PHP Versión 3, facilitando el despliegue eficiente de la consulta.

La información se encuentra organizada mediante 2 tablas de clasificación: la primera de ellas contiene información fundamental de la BD como son los títulos de las referencias, el autor, la fecha de publicación, la biblioteca en la que se encuentran y una breve descripción del estudio. La segunda, relaciona los tipos de estudios con la clasificación universal de temas de la UNESCO. La búsqueda mediante el catálogo es posible realizarla a través de los campos mencionados (véase figura 2.1; para mayor información, se encuentra disponible un Manual de Usuario).

Figura 2.1. Interfaz de búsqueda

Adicionalmente, el Catálogo cuenta con un módulo de ingreso de estudios que permite al usuario adicionar registros que no se encuentren en la base de datos; estos nuevos estudios serán sometidos a revisión y edición antes de ser vinculados de manera definitiva. Este proceso también puede ser llevado a cabo en línea a través de la opción 'Ingreso de Estudios' (véase figura 2.2).

Para este procedimiento, los campos son similares a los descritos anteriormente, exceptuando el primer campo en el cual se refiere al tipo de estudio en que se clasifican los datos que se han recolectado según la UNESCO.

Provisionalmente, la custodia y la administración de la BD es realizada por el grupo de trabajo de Hidrología del Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (el cuidado y mantenimiento de la página estará a cargo de este grupo hasta que se definan la custodia y políticas de manejo en el marco del Convenio Interinstitucional).

Durante el proceso de consecución de los estudios fue posible establecer la cantidad y calidad de la información que se tiene en cada uno de los lugares consultados: en su gran mayoría, la información es de buena calidad; sin embargo, es de anotar que en algunos de los sitios, la búsqueda no es eficiente debido a la falta de centros de documentación, a la inexistencia de bases de datos, o a las políticas adoptadas por algunas instituciones que restringen total o parcialmente el libre acceso a la información.

Figura 2.2. Interfaz de ingreso de nuevos registros

2.2. ESTADO DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA EN ANTIOQUIA

Se hace una evaluación y un diagnóstico de la información hidrológica y meteorológica en el Departamento de Antioquia utilizando la información disponible del grupo de trabajo del Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos para el proyecto Cátedra del Agua.

Se cuenta con información de las siguientes variables climáticas: valores totales de precipitación, caudales medios, máximos y mínimos, temperaturas medias y mínimas, evaporaciones medias, puntos de rocío, tensiones de vapor medias, humedades relativas medias, datos diarios de precipitación, y datos diarios de caudal. Estos registros son obtenidos de diferentes estaciones hidroclimáticas cuya administración está a cargo de algunas entidades estatales y privadas del país, tales como Empresas de Servicio Público, Corporaciones Autónomas Regionales, empresas del sector privado y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (entidad encargada de manejar y controlar toda la información hidrológica que se produce en el país según Decreto 1277 del 21 de junio de 1994).

La última institución mencionada posee un catálogo de todas las estaciones hidroclimáticas que funcionan o han funcionado en el país. Contiene 7363 estaciones (991 en el Departamento de Antioquia para un 13.4%), entre las que se cuentan: pluviográficas (PG), pluviométricas (PM), limnigráficas (LG), limnimétricas (LM), agrometeorológicas (AM), sinópticas (SP-SS), climatológicas (CP-CO), y meteorológicas (ME-MM). Sin embargo, toda la información no está disponible para proyectos de investigación: el IDEAM vende los registros a unos costos relativamente altos para investigadores y estudiantes, además de que no suministra más del 30% de la información de estaciones que existan en un departamento (IDEAM, Acuerdo No.0043 del 21 de mayo de 1998).

Las Empresas Públicas de Medellín, por su parte, restringen la información que consideran estratégica generalmente en las zonas donde se encuentran proyectos hidroeléctricos.

Para el desarrollo de metodologías de diagnóstico de la climatología regional se requiere de información con resolución temporal adecuada (generalmente mensual). Se requiere además que la información sea de buena calidad en términos de longitud de registros, número de estaciones en cada una de las regiones consideradas y, tal vez lo más importante, un porcentaje de datos faltantes bajo y parámetros estadísticos invariantes a lo largo de toda la serie.

2.2.1. Distribución espacial de la información

Con el objetivo de evaluar el estado de la información en los Departamentos de Antioquia y Chocó (específicamente en la región comprendida entre las longitudes 77°40' W y 73°30' W, y las latitudes 5°00' N y 9°00' N), se realizó un estimativo de la cantidad de información disponible, localizando las estaciones disponibles del IDEAM en la región.

Las figuras 2.3 y 2.4 muestran la cantidad y distribución espacial de las estaciones instaladas en Antioquia y sus alrededores.

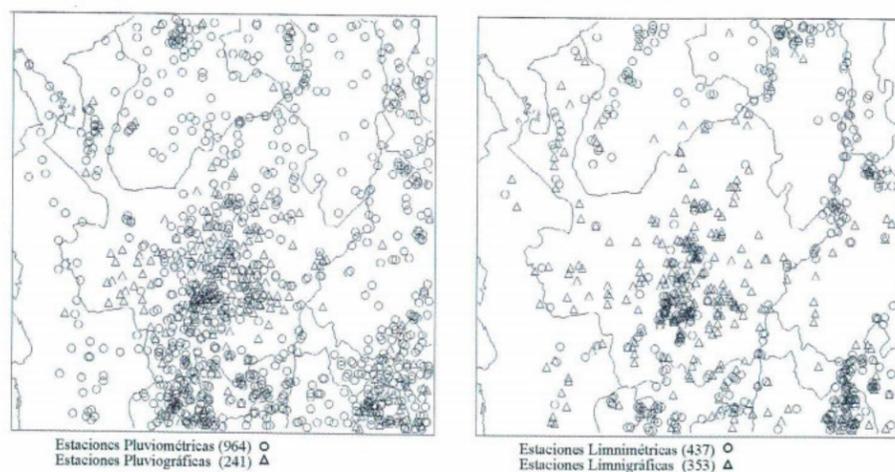


Figura 2.3. Distribución de las estaciones para registro de precipitación (a) y caudal (b)

En las figuras resulta evidente la agrupación de estaciones hacia los centros urbanos (Medellín, Oriente Antioqueño, Urabá) y la carencia de estaciones en regiones como el Chocó, específicamente sobre el río Atrato, donde la dispersión de las mismas en relación con otras zonas es muy alta. Para lograr un entendimiento de la compleja hidroclimatología del país caracterizada por una alta variabilidad espacio-temporal de fenómenos atmosféricos que se presentan sobre una quebrada orografía, se requiere de una densidad de estaciones aún mayor. Este punto genera que los estimativos en regiones con una distribución dispersa de estaciones sean de baja confiabilidad.

Un caso particular de las estaciones de medición lo constituyen las que registran el caudal, dado que cada una de ellas está ubicada a la salida de alguna cuenca hidrográfica. Una adecuada cobertura espacial se puede medir de acuerdo con los rangos de magnitud de áreas cobijados por las estaciones. Generalmente en nuestro país se encuentran estaciones de caudal sin el reporte del área de la cuenca asociada y entonces la información de la serie de caudales puede perder parte de su uso potencial (para la obtención de esta característica morfométrica, es necesario procesar los mapas cartográficos de la cuenca). Además, usualmente no se instrumentan las cuencas pequeñas (menores que 100 km²).

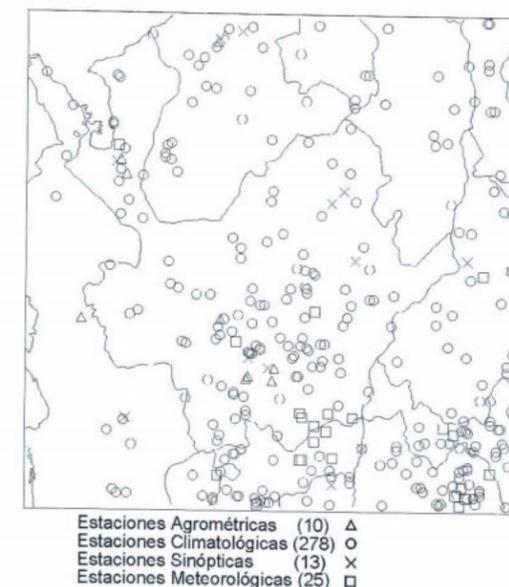


Figura 2.4. Distribución de otras estaciones hidroclimáticas

Para ilustrar lo mencionado anteriormente, se presenta en el figura 2.5 el número de estaciones por rangos de área, discretizado en potencias de 10. En la región se cuenta con 551 estaciones entre limnimétricas y limnigráficas, pero sólo 312 (56.62%) tienen reporte sobre el área de la cuenca. Además, de esas 312 estaciones, 2 tienen menos de 10 km² (0.64%) y 57 tienen entre 10 y 100 km² (18.27%).

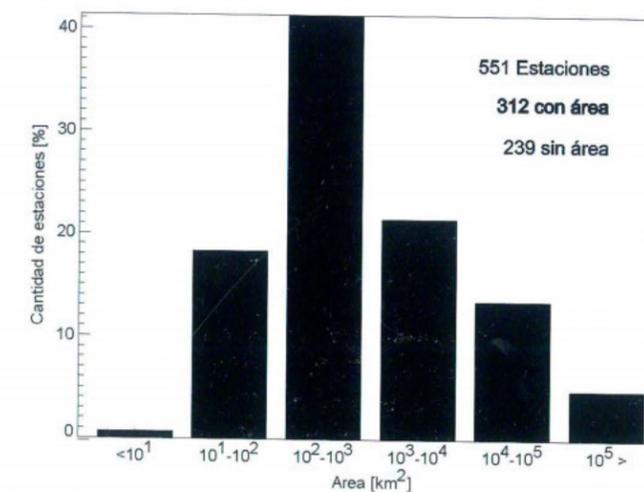


Figura 2.5. Estaciones de caudal por rangos de áreas para la región considerada

Esta situación revela la motivación de las decisiones sobre la instalación de estaciones limnigráficas. Aunque la distribución del número de cuencas de acuerdo con el área es geométrica, con una razón superior a la unidad (alrededor de 2), el hecho de que la distribución de las cuencas instrumentadas tenga un máximo en cuencas intermedias es notorio y requiere interpretación. La deficiencia de cuencas pequeñas instrumentadas se explica probablemente porque la instalación de los instrumentos obedezca a la identificación de proyectos de aprovechamiento y no a una mirada regional, que diseñe la red de medición con criterios económicos, ambientales, hidrológicos y estadísticos. Es claro que no es posible por razones prácticas instrumentar las decenas de miles de cuencas con áreas menores a 100 km². También es claro que los proyectos de aprovechamiento posibles a desarrollar en esas cuencas, en general, no aportan suficiente excedente económico para justificar la inversión en instrumentación. Sin embargo, de éstos hay y habrá muchísimos y es necesario caracterizar sus hidrologías adecuadamente. De manera semejante, las crecientes producidas por pequeñas cuencas de montaña son responsables de buena parte de los grandes desastres con pérdidas de vida, infraestructura y cultivos. Este panorama es más grave si se considera la dependencia de los distintos factores hidrológicos con la escala de las cuencas. Claramente, en Colombia necesitamos una reingeniería de la red de medición.

El análisis por regiones refleja una situación aún más crítica. En la tabla 2.1. se presenta el reporte del número de estaciones por rango de áreas discretizado por regiones en el Departamento. En la figura 2.6 se presentan los histogramas que muestran el número de estaciones por rango de áreas (tomando el 100% como el número de estaciones con área) en cada región. La característica común de todas las regiones es la ausencia de cuencas instrumentadas con menos de 10 km² de extensión, excepto en la región denominada cuenca del Nechí, que cuenta con sólo dos.

Tabla 2.1. Estaciones de caudal por rangos de área para algunas regiones en Antioquia

Región	Rangos de áreas [km ²]					
	<10	10-10 ²	10 ² -10 ³	10 ³ -10 ⁴	10 ⁴ -10 ⁵	10 ⁵ <
Atrato	0	3	11	11	4	0
Nare	0	10	12	3	0	0
Urabá	0	5	8	2	0	0
Magdalena	0	19	39	23	9	7
Cauca	0	3	28	1	15	0
Nechí	2	17	21	16	2	0

La cuenca del río Atrato cuenta con 32 estaciones, 29 de ellas con reporte de área. La cuenca del río Nare tiene 63 estaciones para medir caudales, pero solamente 25 de ellas (39.7%) tienen reportada el área. La región de Urabá tiene 21 estaciones, de las cuales 15 (71.4%) tienen área reportada. La región de la cuenca del Magdalena (sin considerar la cuenca del Nare) tiene 200 estaciones y sólo 97 de ellas reportan área (48.5%). Esta región tiene la particularidad de contar con 7 estaciones con más de 100.000 km², todas ellas ubicadas en el Bajo Magdalena, cerca de la confluencia con el río Cauca. En la cuenca del río Cauca (sin tener en cuenta el Nechí) existen 72 estaciones para medir caudales, de las cuales 47 tienen área (65.2%). En el histograma correspondiente a esta región es clara la sesgada distribución debida a la presencia de un río con un área tan grande como la del Cauca frente a cuencas mucho más pequeñas nacidas en las montañas antioqueñas.

La cuenca del Nechí es una de las regiones mejor instrumentadas del Departamento. Cuenta con 82 estaciones para registrar caudales, de las cuales 58 tienen reportada el área (70.7%). De todas las regiones, es la que presenta un histograma mejor equilibrado entre áreas grandes y pequeñas. Sin embargo, carece de una buena cantidad de estaciones en pequeñas cuencas hidrográficas que bien podrían ser las quebradas afluentes al río Medellín. En estas corrientes usualmente se realizan estudios hidrológicos y en la mayoría de los casos se recurre a metodologías indirectas para el análisis de caudal, aplicando métodos foráneos sin posibilidad de validación. Es el caso del Decreto Número 339 de mayo 22 de 1990, expedido por la Alcaldía de Medellín, que exige la aplicación de metodologías foráneas que no se han validado aún por falta de instrumentación.

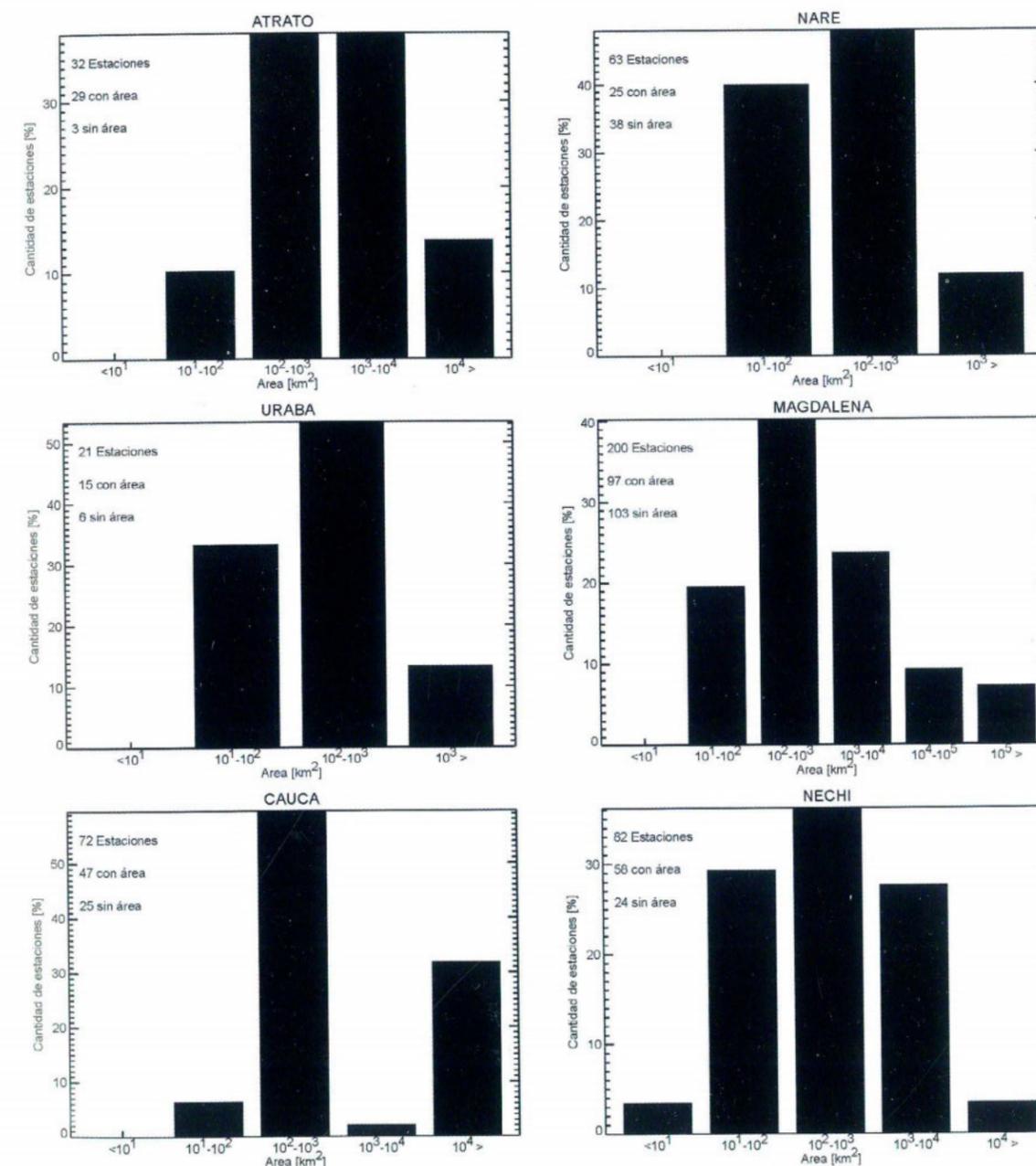


Figura 2.6. Estaciones de caudal por rangos de áreas en algunas regiones del Departamento de Antioquia

Otro de los problemas más significativos es el retiro de algunas estaciones hidrometeorológicas. En las figuras 2.7 y 2.8 se muestra la distribución espacial de las estaciones que permanecían en funcionamiento hasta el año 1996 (el catálogo está actualizado hasta esa fecha). Si se realiza de nuevo el análisis anterior, se observará que la cobertura por estación es mucho menor y la cantidad de estaciones retiradas es alta. Por ejemplo, existían 964 estaciones pluviométricas, de las cuales 574 estaciones aún operaban a la fecha mencionada, lo que quiere decir que se ha retirado casi un 40% de las estaciones de precipitación. Un caso similar ha sucedido con todas las estaciones hidrometeorológicas.

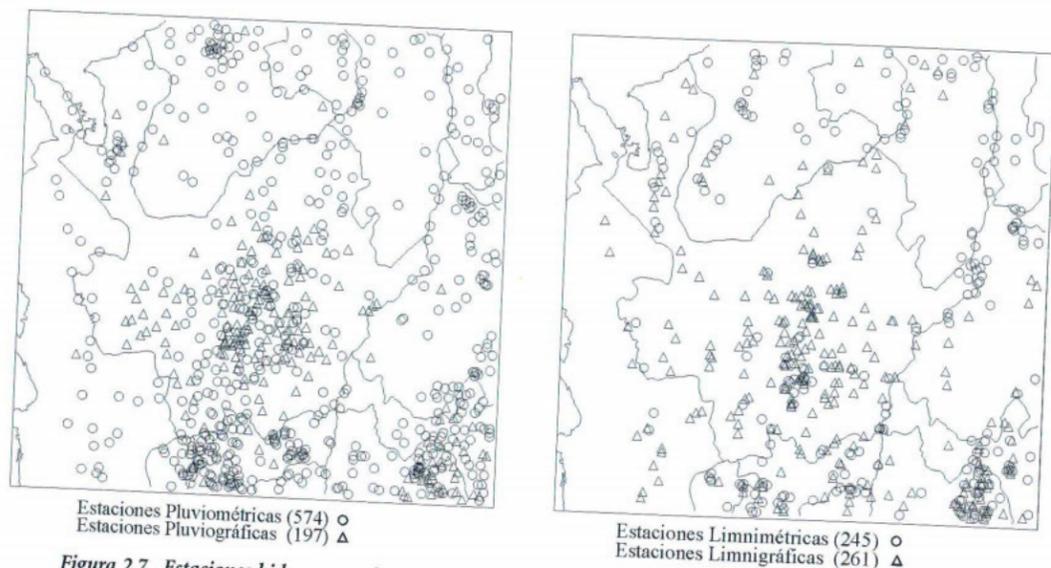


Figura 2.7. Estaciones hidrometeorológicas que permanecen en operación en el Departamento de Antioquia para registros de precipitación (a) y caudal (b)

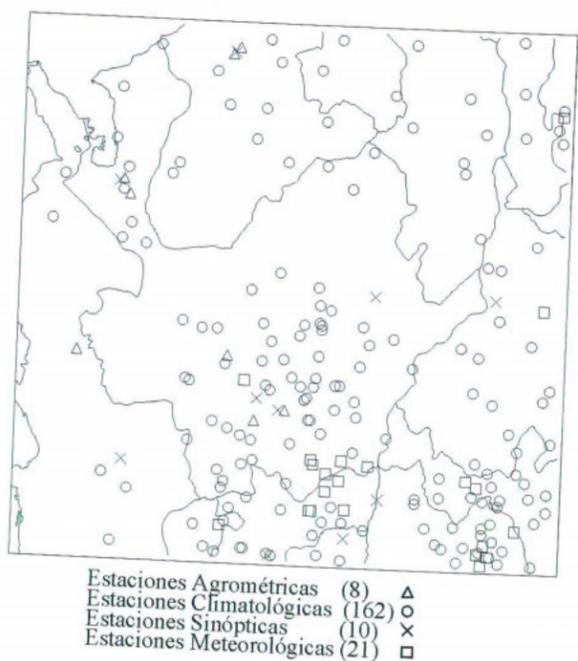


Figura 2.8. Estaciones hidrometeorológicas que permanecen en operación en el Departamento de Antioquia

2.2.2. Calidad de los registros hidrológicos

Para realizar la evaluación de la calidad de los datos hidrológicos, las estaciones hidrometeorológicas fueron clasificadas según su longitud de registro y localizadas sobre el mapa de la región. Esto permitió la generación de histogramas que relacionan el número de estaciones y la longitud de las series, y la posterior localización espacial con círculos de diferente diámetro (asociados con la longitud de los registros). Un análisis similar fue llevado a cabo para la detección de datos faltantes.

Por razones de espacio, en este documento únicamente se presenta el análisis para el caso de los registros de caudal medio. El documento de actualización del estado del arte presenta una discusión más completa, en el sentido de que incluye además las series de caudal máximo, caudal mínimo, caudal diario, precipitación total mensual, precipitación diaria, temperaturas media y mínima, humedad relativa, punto de rocío, evaporación y tensión de vapor.

Se cuenta con 101 estaciones de caudal medio mensual, cuya longitud promedio de registros es de 25 años y varía entre 3 y 65 años. Sin embargo, como se observa en el histograma de la figura 2.9(a), 70 estaciones (69.3%) tienen menos de 30 años de registros y sólo 12 de las estaciones disponibles (11.9%) tienen más de 40 años. En el mapa de la figura 2.9(b), el diámetro del círculo es un indicativo de la longitud del registro. Con triángulos se representan las estaciones con menos de 15 años de registros (18.0-17.8%) y en círculos las demás. A pesar del buen número de estaciones con más de 15 años, es notable la concentración de las mejores estaciones en la cuenca del río Porce y a lo largo del río Magdalena; el cañón del río Cauca, la cuenca del río Atrato, Urabá y el Caribe presentan estaciones con longitudes de registros de regulares a malas; y existen regiones como el Nordeste Antioqueño y la parte baja de la cuenca del río Penderisco de las que no se dispone información de caudales medios.

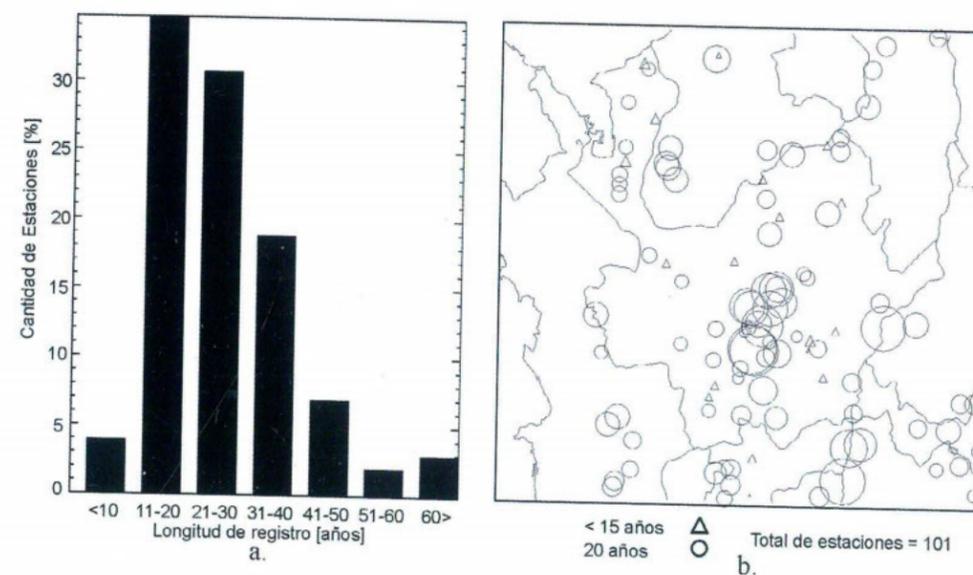


Figura 2.9. Longitud de registros y localización de estaciones de caudal medio

En la figura 2.10(a) se presenta el histograma de frecuencias para el porcentaje de datos faltantes en los registros de caudal medio. Es frecuente en las estaciones encontrar (en las series reportadas) períodos de registro sin datos; estas falencias posiblemente responden al retiro de estaciones, a cambios de sitios de instalación, o a daños presentados en los equipos de medición. Muchas veces se presentan brinco, o cambios en la media y la varianza de los

registros, lo que indica mala calibración de la estación o simplemente el cambio no reportado. Los datos de caudal medio mensual con los que cuenta el proyecto, presentan pocos datos faltantes, más del 80% de las series de esta variable tienen menos del 3% de datos faltantes, 22 de ellas están completas y 57 estaciones restantes tienen datos faltantes en sus registros.

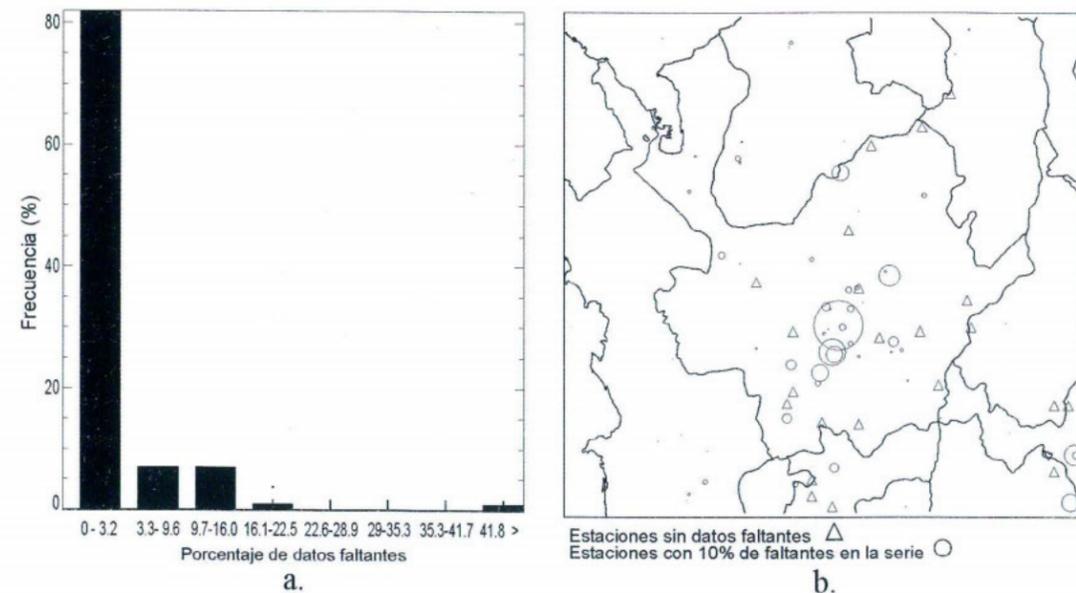


Figura 2.10. Porcentajes de datos faltantes de estaciones de caudal medio

2.3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones generales.

Existe una buena cantidad de estudios y de archivos relacionados con el recurso hídrico en el Departamento de Antioquia. Sin embargo, la mayoría de ellos se concentran en la capital y sus alrededores, mientras que en los municipios más alejados la información está bastante reducida. Pese a las limitaciones en la distribución espacial, la cantidad de documentos es grande y tiende a aumentar; de allí que el catálogo sea una herramienta útil y que su importancia sea creciente con el tiempo.

En Antioquia la cobertura de estaciones hidroclimáticas es baja y su distribución espacial es desequilibrada, concentrándose alrededor de los principales núcleos urbanos y zonas de influencia de proyectos hidroeléctricos, mientras que en vastas áreas de nuestra geografía aún no se cuenta con estaciones. El problema es agravado por las políticas de distribución de información por parte de los entes reguladores (venta de registros, consideración de información estratégica, venta parcial), lo que impide la exploración científica y el desarrollo del conocimiento.

Las estaciones han sido ubicadas como producto de la necesidad o la facilidad y no siguiendo a una estrategia para mejorar el conocimiento de la variabilidad espacio-temporal de la información hidroclimática de mayor influencia en la región. La red actual es producto de las circunstancias y no de un adecuado diseño. Es por ello que se hace necesario un diseño eficiente de la red de medición de variables hidrometeorológicas.

La cobertura espacial de las estaciones de precipitación y caudal para el Departamento es irregular. Las zonas mejor instrumentadas son el Valle de Aburrá y el Oriente Antioqueño, cerca de los embalses, donde las estaciones son más numerosas y de mejor calidad. Sin embargo, cuando se pierde el interés económico en la región, resulta frecuente retirar la estación. El número de estaciones de caudal en el rango de áreas más pequeñas es insuficiente (prácticamente nulo), lo que impide un adecuado desarrollo de los modelos hidrológicos diseñados para estos tamaños de cuenca. Los ríos más importantes de la región están instrumentados con una aceptable calidad de sus registros.

Las estaciones que registran otras variables hidrológicas (temperatura, evaporación, punto de rocío, entre otras) indudablemente son muy pocas. Para Colombia esta situación es grave ya que nuestra dinámica hidroclimática está fuertemente determinada por las condiciones del relieve, que determinan vertientes en las cordilleras con características muy distintas entre sí. La pobre cobertura espacial de las estaciones disponibles dificulta el adecuado desarrollo de modelos regionales para la estimación distribuida de estas variables en las zonas donde no se tiene información, a pesar de la buena calidad de las series.

Recomendaciones.

Para un funcionamiento eficiente del catálogo digital y para la actualización permanente de la base de datos, el Convenio Interinstitucional de la Cátedra del Agua deberá definir el hospedaje, el cuidado, el mantenimiento y las políticas de manejo del sitio en Internet.

Se requiere que las distintas entidades que trabajan con el agua en la región se fortalezcan en la formación y modernización de centros de documentación y que ellas, a través de estos centros, se comprometan con la actualización del catálogo. Se puede aprovechar el espacio de la Cátedra para conformar una red de centros de documentación de las entidades participantes y facilitar el acceso al material bibliográfico entre las entidades signatarias. Se deben buscar convenios y agendas de trabajo para compartir información con otras entidades involucradas con la gestión del agua para potenciar la investigación en temas relacionados con los macroproyectos ejes prioritarios. Es importante buscar que en la región el conocimiento se ponga al servicio de todos, pues el conocimiento respecto al recurso hídrico hace parte del interés por el bien común y no puede quedar reservado para atender intereses estratégicos de entidades particulares.

Desde la Cátedra del Agua y desde todas las instituciones, es importante hacer un llamado al IDEAM para que suministre la totalidad de la información disponible de las variables hidroclimáticas; la reserva de la información por parte de una entidad del estado no tiene ninguna justificación.

A la luz de la racionalidad económica es fácil demostrar que para la Nación los ingresos netos que recibe el IDEAM producto de la facturación (a entidades estatales en su mayoría) por la venta de información hidrológica, son significativamente inferiores a los costos y sobrecostos (en múltiples actividades y en todo el territorio nacional) que se incurren por no poder contar oportunamente con toda la información hidrológica disponible, como resultado de la política de distribución del IDEAM. Ahora, ni que hablar de los costos ambientales y sociales que se derivan de la planeación y la gestión de los recursos naturales con base en información incompleta. Además del tropiezo que significa para el avance de la investigación la no disponibilidad de la información, ya que se dificulta el entendimiento de la dinámica de las variables hidroclimáticas y su relación con otros elementos del entorno. La información que produce el IDEAM es vital para el planeamiento y la gestión de los recursos naturales en el país.

En el contexto de la Cátedra se debe buscar el espacio para establecer una red de información en la que todas las entidades del convenio puedan compartir información de distinto tipo (agrológica, demográfica, hidrológica, meteorológica, epidemiológica) y de interés común para el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales.

La Cátedra, como convenio interinstitucional, debe buscar los mecanismos para convocar a las entidades estatales que producen información hidroclimatológica para que contribuyan con esta información a una mejor gestión del agua y demás recursos naturales en la región.

Desde la Cátedra es importante apoyar a las instituciones que producen información hidrológica para que sus estaciones, además de contar con instrumentos modernos, tengan una operación adecuada para que reporten datos de buena calidad.

2.4. INVENTARIO HÍDRICO

2.4.1. Variables macroclimáticas

Temperatura media. Para la obtención de mapas promedios mensuales y promedio anual de temperatura en la región en estudio, se empleó la técnica de interpolación basada en la Triangulación con Deriva. Se ha encontrado que el comportamiento de la temperatura del aire en superficie está fuertemente condicionado por la altura sobre el nivel del mar en la región tropical, en una relación prácticamente lineal. Es por esta razón que se ha seleccionado la topografía como la deriva considerada para la estimación de la variable climática mediante la técnica de interpolación propuesta.

Los mapas mensuales se obtuvieron multiplicando el mapa de porcentajes de cada mes por el mapa de temperatura anual. Los mapas de porcentajes se construyeron al interpolar la temperatura media del mes en cuestión expresada como porcentaje de la temperatura media anual de todas las estaciones.

Para la implementación de la técnica de interpolación se cuenta con registros mensuales de 14 estaciones de CORNARE y 58 estaciones del IDEAM. El mapa de temperatura media anual obtenido se muestra en la figura 2.11.

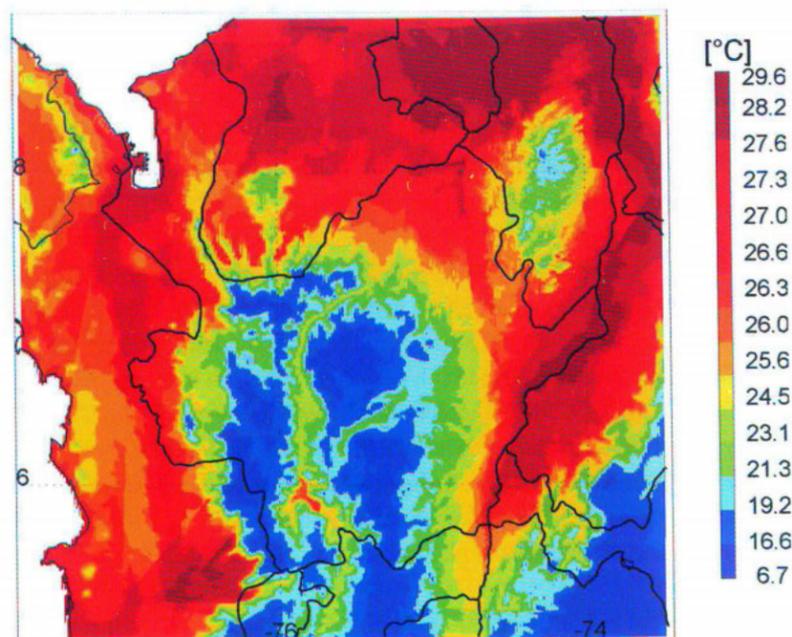


Figura 2.11. Mapa de temperatura media anual.
Técnica de interpolación: Triangulación con Deriva.

Se obtuvieron mapas anual y mensual de temperatura aplicando la regionalización propuesta por CENICAFÉ (Chávez y Jaramillo, 1998), en la cual se asume una relación lineal entre la temperatura y la altura sobre el nivel del mar, de acuerdo con la región geográfica de interés (Andina, Atlántica, Pacífica y Oriental). Las expresiones de regionalización fueron obtenidas a partir de la información de 1002 estaciones en todo el país (626 en la región Andina, 239 en la región Atlántica, 46 en la región Pacífica y 91 en la región Oriental).

Se obtuvieron además mapas a partir de los datos consignados en la base de datos GEWEX (Meeson et al., 1995 y Sellers et al., 1995), de donde se tomaron valores mensuales de temperatura del aire a una altura de 2 m sobre la superficie del terreno. Se seleccionó la región de Colombia entre 90°W-60°W y 15°N-10°S (resolución espacial 1°x1°), para el período comprendido entre Enero/1987 y Diciembre/1988.

Se cuenta además con mapas de temperatura del suelo obtenidos de la base de datos del GEWEX (temperaturas del suelo por debajo de 50 cm de profundidad y por encima de 7 cm de profundidad).

Presión atmosférica. Esta variable se obtuvo empleando la información recopilada por Eslava (1995), quien realizó un estudio de inventario de las estaciones meteorológicas en las que se tienen registros de esta variable. Se recopiló en total 68 estaciones de las cuales, luego de un proceso de homogenización y depuración, se seleccionaron 53 para la obtención del mapa de presión atmosférica. Con los registros de las estaciones y la altura sobre el nivel del mar de cada una de ellas, se analizó una regresión lineal en la cual se aplicó el logaritmo natural a la presión atmosférica, obteniéndose la relación $P = 1009.28 \exp(-H/8631)$, donde P está expresada en hPa y H en m. El coeficiente de correlación ascendió a 0.9999.

Además, a partir de los datos consignados en la base de datos GEWEX, se obtuvieron valores de la presión atmosférica sobre la superficie con una resolución espacial de 1°x1°, para la región comprendida entre 90°W-60°W y 15°N-10°S. La variable de interés se encuentra disponible para valores mensuales, con los cuales se calcularon los promedios multimensuales y anuales.

Punto de rocío. Se obtuvo un mapa de punto de rocío promedio anual a partir de la expresión $T_d = 24.4268 - 0.005286 H$ (coeficiente de ajuste 0.9678). Esta ecuación se obtuvo al considerar una relación lineal entre la temperatura de punto de rocío y la altura sobre el nivel del mar (H), empleando 35 estaciones del IDEAM y CENICAFÉ. Los mapas mensuales se obtuvieron multiplicando el mapa de porcentajes de cada mes por el mapa de punto de rocío anual. Estos mapas de porcentajes se construyeron al interpolar la temperatura de punto de rocío del mes en cuestión expresada como porcentaje de la temperatura de punto de rocío anual de todas las estaciones.

Se cuenta además con un mapa de temperatura de punto de rocío a dos metros sobre la superficie, obtenido a partir de la base de datos del GEWEX, para una resolución espacial de 1°x1°.

Radiación. Se analizaron las siguientes variables macroclimáticas: (a) flujo neto de radiación de onda corta (bases de datos GEWEX y LANGLEY -Darnell, 1995-, información disponible en promedios multimensuales y anuales); (b) flujo neto de radiación de onda larga (GEWEX y LANGLEY); (c) flujo neto total (bases de datos 'Surface Radiation Budget Data Set' -Darnell, 1995-, GEWEX -1°x1°- y LANGLEY -2.5°x2.5°-, en promedios mensuales y promedio anual).

La radiación es una variable que generalmente se mide mediante sensores remotos. Desafortunadamente los registros satelitales disponibles presentan una resolución bastante gruesa para la escala que se manejó en el estudio. Por lo tanto se procedió a estimar la radiación mediante el procedimiento propuesto por Morton (1983) y se validó

con respecto a los registros sensados por el GEWEX. Para la aplicación de esta metodología, se requirió de información de brillo solar, precipitación, temperatura media, punto de rocío y topografía. Este procedimiento, empleado en el proyecto Balances Hidrológicos de Colombia (UNALMED-COLCIENCIAS-UPME, 1999), se describe detalladamente en Morton (1982) y en los anexos del documento de actualización.

Teniendo como base la información mencionada anteriormente, se generaron los mapas de radiación neta anual y mensuales.

Se analizaron además: (d) brillo solar (información mensual de brillo solar promedio diario de 56 estaciones del Manual de Radiación Solar en Colombia -Rodríguez y González, 1992- y de 10 estaciones de CORNARE, interpolando mediante la técnica de Kriging ordinario); (e) albedo superficial (información de la base de datos de LANGLEY, para una resolución espacial de 2.5°x2.5°); y (f) otras variables de interés (insolación, radiación de onda larga descendente, radiación de onda corta neta en el tope de la atmósfera, entre otras).

Humedad relativa. Se calculó en función de las presiones de vapor real y de saturación, ambas obtenidas a partir de las temperaturas de punto de rocío y ambiental, respectivamente, gracias a la ecuación de Clausius-Clapeyron aproximada al intervalo de temperaturas observadas en la región.

Vientos. Se presentan mapas de viento de varias fuentes de información. Una de ellas es el GEWEX (Meeson et al., 1995 y Sellers et al., 1995). La fuente primaria es el ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts). Los datos están disponibles cada 6 horas y permiten la obtención de los promedios multimensuales, multianual y anual. La información corresponde al período comprendido entre enero de 1987 y diciembre de 1988, para los límites espaciales -90°W a -60°W y -10°S a 15°N. Los datos están presentados en una resolución espacial de 1°x1° en m/s como unidad de medida. Se poseen mapas de componentes zonal y meridional del viento a 10 m de la superficie, componentes zonal y meridional del esfuerzo superficial del viento, y rugosidad (definida como la altura a la cual la velocidad del viento es nula debido a los efectos de la vegetación).

Existe información adicional a partir del reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996). Los mapas se obtienen con registros mensuales que abarcan el período 1979-1998 para una resolución espacial es de 2.5°x2.5°. Las unidades de medida son m/s. Aunque la resolución de esta información es demasiado gruesa, es bastante coherente. Sin embargo, es difícil de mejorar su calidad en cuanto a la resolución espacial. Se tienen disponibles mapas de componentes zonal y meridional del viento a 925 mb, y componentes zonal y meridional a 10 m de la superficie.

Nubes. A partir de las bases de datos GEWEX y LANGLEY, se obtuvieron mapas de diferentes variables relacionadas con las nubes, a saber: cantidad de agua, porcentaje de nubosidad, espesor y presión media en la parte superior, para la primer base de datos mencionada, y forzamiento de onda corta, forzamiento de onda larga, forzamiento total y porcentaje de nubosidad, para la segunda base de datos mencionada.

Precipitación. Se analizaron en primera instancia los mapas del Estudio Nacional de Aguas (Colombia-DNP, 1984) que fueron elaborados en una escala 1:500.000 para todo el país con excepción de las zonas de Orinoquía y Amazonía. Se analizó además el mapa de precipitación que realizó el geógrafo francés Remy Oster (1979) para el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, a partir de la información de 2500 estaciones pluviométricas (1500 en operación en el año 1975).

Se analizó la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en el territorio y los principales mecanismos generadores y moduladores de algunas de las características de la hidrología del país (Corriente de Chorro del Chocó, Complejos Convectivos de Mesoescala, Ondas Tropicales del Este, Oscilación de Madden-Julian, Zona de

Convergencia Intertropical y fenómeno ENSO). Se seleccionó la zona comprendida entre 5°-9° N y 75°30'-77°40' W para una resolución espacial de 30" de arco (aproximadamente píxeles de 924 m x 924 m) utilizando registros puntuales de precipitación (303 estaciones pluviográficas, pluviométricas y climatológicas con registros mensuales) y los mapas realizados en estudios anteriores. Para garantizar la homogeneidad de registros, se utilizó el período común 1970-1990 de 140 estaciones. Se utilizó el método de Kriging con Deriva (campos de apoyo) y el método de Triangulación con Deriva para la interpolación espacial. En la figura 2.12 se presenta el mapa de precipitación media anual estimado para el Departamento. De manera similar, se generaron los mapas de precipitación media mensual para la región (que permiten observar el paso de la Zona de Convergencia Intertropical ZCIT), pero por razones de espacio no se presentan en este documento consolidado.

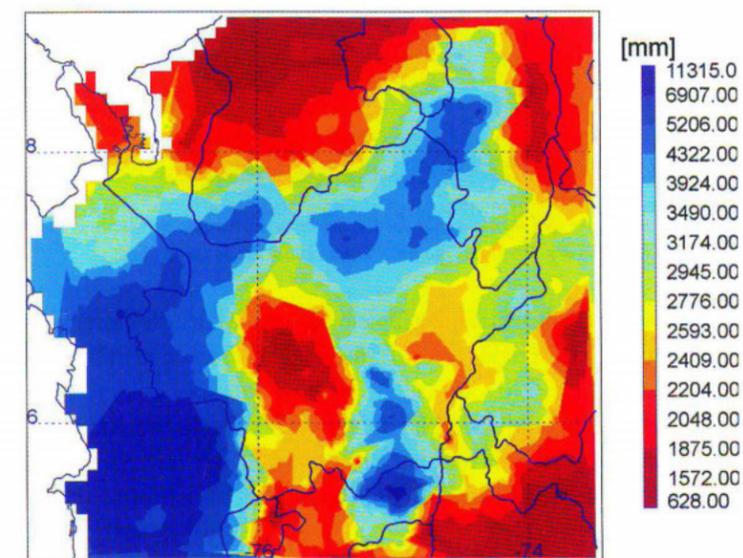


Figura 2.12. Mapa de precipitación media anual.

Técnica de interpolación: Triangulación con Deriva usando el mapa de precipitación del Estudio Nacional de Aguas (1984).

El documento aborda además un completo análisis de la intensidad máxima de las lluvias en Antioquia, tema de particular interés en el estudio de caudales máximos en cuencas pequeñas, mediante una exploración de la teoría de escalamiento aplicado a curvas IDF en la región.

Evaporación. Los mapas que se tienen disponibles de esta variable climática (tanto potencial como real) fueron estimados para una resolución espacial de 30" de arco a partir de información puntual utilizando 14 metodologías diferentes (algunas brindan sólo estimativos anuales): ecuaciones de Cenicafé, Turc, Turc Modificado, Thornwaite, Coutagne, García-López, Meyer, y del Factor Regional, así como los métodos de Morton, combinado aerodinámico y de balance de energía (Penman), combinado aerodinámico y de balance de energía con aproximación de Priestley y Taylor, Penman-Monteith, Jiang-Islam, Kazama-Sahoo. En la figura 2.13 se presenta el mapa de evapotranspiración real media anual del Departamento obtenido mediante el método del Factor Regional (Choudhury, 1999) basado en el balance hídrico de largo plazo.

Otras variables. De la base de datos GEWEX se obtuvieron variables relacionadas con la vegetación para una resolución espacial de 1°x1° y valores fijos y mensuales (Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada NDVI, fracción de la radiación absorbida por la vegetación en el proceso de fotosíntesis, índice total de área de hojas, rugosidad, clasificación de vegetación mediante datos de satélite -radiación infrarroja reflectada y radiación visible reflectada-, entre otras).

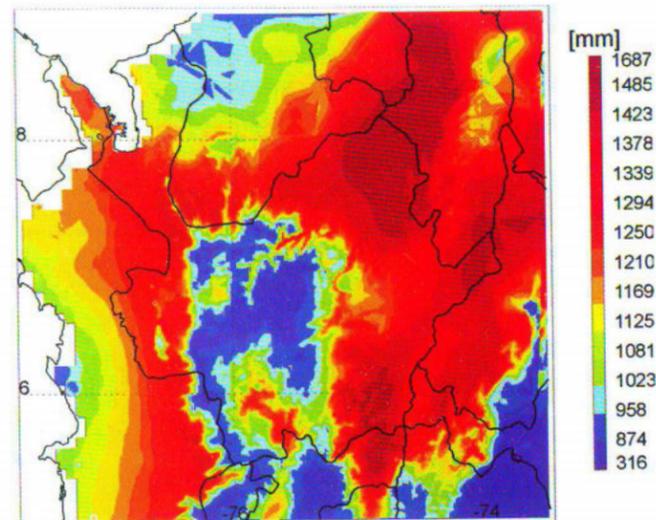


Figura 2.13. Mapa de evapotranspiración real media anual del Departamento obtenido mediante el método del Factor Regional (Choudhury, 1999) basado en el balance hídrico de largo plazo.

El documento de actualización presenta además un completo análisis de cuencas hidrográficas a partir de diferentes modelos digitales de terreno: (a) para todo el Departamento de Antioquia se utilizó una topografía digital de resolución espacial 30" de arco; (b) se incluyeron bases de datos del mundo y Colombia para resoluciones de 1° y 60", respectivamente; (c) se presentaron MDTs de las subregiones Valle de San Nicolás, Valle del Río San Juan (Suroeste Antioqueño), y Valle de Aburrá, cada uno con resolución 100 m; y (d) finalmente, con miras a ilustrar el análisis a nivel de microproyectos, se incluyó la cuenca de la Quebrada Chachafruto en el Oriente Antioqueño para una resolución de 10 m.

Se analizó el balance hídrico de largo plazo, el ciclo anual hidrológico y el modelo de tanques para su estimación. Se analizaron las metodologías 'Regionalización de Características Medias', 'Multiescalamiento' y 'Racional Probabilístico', para el análisis de caudales máximos. Para el caso de eventos mínimos, se analizó la metodología de Regionalización de Parámetros y el método de la Curva de Recesión, y se presentaron mapas de rendimientos mínimos (media y desviación estándar) para el Departamento y para diferentes períodos de retorno.

2.4.2. Conclusiones

El proyecto 'Balances Hidrológicos y Atlas Digital de Antioquia' reúne y consolida parte de la información hidrológica y climatológica del Departamento. Usando técnicas depuradas y modernas, se obtuvieron resultados nuevos y satisfactorios de la distribución espacial de las variables hidroclimáticas para toda Antioquia. La escala de trabajo 30" de arco proporciona herramientas de ayuda en la planificación y el manejo de cuencas hidrográficas mayores de 2000 km².

Se diseñó un sistema de información geográfica (Atlas Digital de Antioquia) implementado en HidroSig Java, que incluye algoritmos de alta calidad y puede ser ejecutado en diferentes sistemas operativos.

La base de datos que se despliega, aunque fue construida con información cuya cobertura de estaciones hidroclimatológicas es baja y su distribución espacial es desequilibrada, concentrándose alrededor de los principales núcleos urbanos y algunas zonas de influencia de proyectos hidroeléctricos, constituye un fuerte avance en el

entendimiento del clima y la hidrología de la región antioqueña. Disponiendo de toda la información del IDEAM y EPPM, los resultados mejorarían considerablemente en calidad y permitirían un mayor conocimiento del clima y la hidrología, y por supuesto, contribuirían significativamente a la planificación y administración de este recurso.

La precipitación es altamente influenciada por condiciones orográficas, por diferentes fenómenos locales y macroclimáticos que a diferentes escalas afectan su dinámica. De allí que sea fundamental el entendimiento y la consideración de los procesos físicos en la determinación de la variabilidad espacial. En el estudio se consideró importante la utilización de técnicas de interpolación que, además de los valores de las estaciones de medición, permiten introducir el criterio de expertos que han analizado la distribución espacial y la han plasmado en mapas preexistentes. Los métodos utilizados presentan estimativos satisfactorios de los mapas distribuidos de precipitación media anual y su distribución mensual.

En el análisis de precipitaciones máximas, se obtuvo una ecuación para el cálculo de las curvas IDF en un rango de alturas entre los 1000 y los 3000 msnm, soportada en la teoría de escalamiento simple para duraciones de lluvias entre 1 y 24 horas. Aunque esta herramienta constituye un aporte invaluable para el diseño de múltiples obras de ingeniería en la región, se sugiere trabajar más aún en rangos inferiores a 1h donde la teoría de escalamiento múltiple parece ajustarse mejor.

Con respecto a la evapotranspiración, la mayoría de los mapas obtenidos muestran tendencias similares tanto en la evaporación potencial como real. Los mapas que dependen de variables básicas (temperatura y precipitación) aportan una idea general acerca del orden de magnitud de la evapotranspiración. Esto debido a que indirectamente representan las disponibilidades de energía y de agua, supliendo los requerimientos para una adecuada estimación de esta componente del balance hidrológico. Por otra parte, los métodos que implementan otras variables relacionadas con la vegetación, condiciones aerodinámicas y radiativas, permiten conocer en detalle la variabilidad espacial de la evaporación.

No es posible detectar comportamientos característicos de la evapotranspiración; tampoco se observa una relación clara con el ciclo anual de precipitación, ya que en la dinámica de la evapotranspiración influyen muchas otras variables que, a su vez, presentan variaciones anuales que aún no han sido debidamente estudiadas.

Poder estimar la disponibilidad promedio de agua en un río en su estado natural, tiene importancia en lugares que carecen de registros y se convierte en un elemento fundamental para la planeación y el manejo del recurso. Para esto se calcularon y validaron los caudales medios multianuales aplicando la ecuación del balance hidrológico a largo plazo en 69 cuencas instrumentadas, obteniendo un error promedio del 25%. El error en la estimación es menor para las cuencas más grandes.

El caudal medio mensual fue estimado a partir del modelo de tanques, que involucra parámetros de vegetación y del suelo. Esta técnica ayudó, no sólo a una mejor cuantificación del caudal medio multianual en cualquier cuenca con un error promedio del 19%, sino que también mejoró el estimativo de su variabilidad anual. Además, permitió estimar otras variables importantes en hidrología y en diseño como son el caudal superficial, sub-superficial, la evapotranspiración real y la cantidad de agua en el suelo, todas de gran importancia en ganadería y agricultura.

Para una operación más eficiente de los sistemas de aprovechamiento de recursos hídricos es necesario determinar la disponibilidad de agua en períodos de climatología crítica, por lo que es fundamental conocer cuál es el impacto de los fenómenos macroclimáticos en la hidrología de Antioquia. En el trabajo se confirma una influencia muy marcada del fenómeno ENSO en la dinámica de los caudales y la precipitación en una escala interanual.

Además, se encontró una relación significativa con el gradiente de temperaturas del mar entre las regiones Norte y Sur del Océano Atlántico Tropical.

En algunas subregiones del Departamento, las características medias de los caudales máximos no escalan de manera lineal con el área de drenaje, pero los valores de la media y la desviación estándar estimador para los caudales máximos se ajustan bien a los valores reales debido a la inclusión del parámetro tomado a partir de la resta entre la precipitación y la evaporación promedio en la cuenca en su ajuste. El Método de Multiescalamiento presenta limitaciones vinculadas con la apreciación anterior. Debido a que trabaja con el área como parámetro de escala, ignora la variabilidad climática que se presenta al interior de la región considerada. Se plantea entonces enfocar la metodología para trabajar con el caudal medio multianual como parámetro de escala, dado que esta variable contiene valiosa información sobre el tamaño de la cuenca y la componente climática. Otro método más sencillo de aplicación, como es el caso del Método Racional Probabilístico, restringe su rango de aplicabilidad en cuanto al tamaño de las cuencas.

Los resultados derivados del análisis de caudales máximos tienen aplicaciones directas en el campo de la ingeniería. La buena estimación de caudales máximos con métodos de regionalización permite obtener resultados preliminares de obras que involucren las crecientes para su diseño sobre cuencas grandes.

El método de regionalización para la estimación de caudales mínimos proporcionó buenos resultados. Al igual que otros estudios, se encontró que para todos los períodos de retorno existe linealidad entre el caudal mínimo y el área de la cuenca, como muestran los resultados para los exponentes de las ecuaciones, y que existe linealidad entre el caudal mínimo y la componente climática obtenida a partir de la resta entre la precipitación y la evaporación promedio sobre la cuenca. Todo esto permite relacionar linealmente los caudales mínimos y los caudales medios en una cuenca.

Los resultados de este trabajo pueden ser útiles para la planificación y el manejo de recursos hídricos en el ámbito departamental, y tienen aplicación en proyectos preliminares de interés en distintos sectores como la ganadería, la agricultura y la salud. Además pueden servir de apoyo a proyectos de investigación en temas como el estudio de la biodiversidad, la fijación de carbono, los suelos, entre otros. Se limita su utilización en escalas regionales y departamental y no se recomienda su uso al nivel de microcuenca.

Para las escalas de cuencas subregionales y microcuencas, sólo se presenta el procesamiento del modelo de elevación digital. **Se espera que este primer bosquejo se convierta en la primera piedra para la construcción de un sistema de información hidrológica para la gestión integral del agua en la región.**

Para ello es necesario el concurso y la cooperación de todos los actores regionales relacionados con el recurso hídrico en la región, mediante la instrumentación de cuencas piloto, capitalizando el análisis y capacidad de los sensores remotos, completando la base de datos de registros, mejorando los análisis, basándose en las preguntas aquí formuladas y en las restricciones de las metodologías implementadas. Es indispensable implementar metodologías de trabajo que incluyan el análisis cuantitativo de la calidad de las corrientes en todo el dominio de las microcuencas y para ello tener en cuenta las captaciones y los vertimientos. La incorporación de las variables de calidad de agua requiere de la definición de estrategias de medición, procesamiento y análisis de información, así como de la implementación, calibración de modelos de calidad acoplados a modelos hidrológicos y la continua incorporación de datos y resultados al sistema de información.

3. MÉTODOS BIOLÓGICOS DE DESCONTAMINACIÓN

El documento de actualización del estado del arte del macroproyecto eje prioritario 'Métodos Biológicos de Descontaminación' contiene, en su primera parte, la descripción del conjunto de actividades desarrolladas, seguida de una síntesis de las principales tendencias en el tratamiento de aguas residuales. Se presenta además un resumen del estado actual del tratamiento de aguas residuales en Colombia y en Antioquia; éste último se consigna finalmente en el inventario de sistemas de tratamiento biológico para el Departamento.

3.1. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES REALIZADAS

Las actividades desarrolladas en el proyecto se agrupan en cuatro frentes de trabajo, los cuales se discriminan a continuación:

- Búsqueda bibliográfica, identificando artículos claves relacionados con el estado del arte en el tema 'Métodos Biológicos de Descontaminación de Aguas Residuales'.
- Identificación del estado actual del tratamiento de aguas residuales en Colombia.
- Identificación de las políticas trazadas por las Autoridades Ambientales del Departamento de Antioquia sobre el recurso agua.
- Inventario de los Sistemas de Tratamiento Biológico de Aguas Residuales en el Departamento de Antioquia.

3.1.1. Revisión bibliográfica

El proceso de búsqueda de información incluyó la revisión de diferentes bases de datos, todas referidas al tratamiento biológico de las aguas residuales en el ámbito mundial y tratando de establecer las tecnologías de mayor aplicabilidad.

Dentro de la búsqueda realizada por el equipo de trabajo, se revisó la base de datos CURRENT CONTENT (que incluye títulos de diversas publicaciones internacionales), en sus tres modalidades (ingeniería, ciencias de la tierra y ambientales, y química y afines), para el período 1998-2000. Se buscaron las siguientes palabras clave: *biological wastewater treatment, biological treatment, wastewater treatment, anaerobic treatment y aerobic treatment*.

También fueron revisadas dos colecciones directamente relacionadas con el tratamiento de aguas residuales: *Water Science and Technology y Water Research*. Se analizó revista por revista para todos los números publicados en los años 2000 y 2001.

De la revisión realizada se seleccionaron 10 artículos internacionales relacionados con el estado del arte del tratamiento de aguas residuales por medio de microorganismos. En los anexos del documento de actualización se presenta la identificación de los artículos seleccionados y un corto resumen de su contenido, así como un resumen de las principales características de los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales.

3.1.2. Estado del tratamiento de aguas residuales en Colombia y Antioquia

A partir de información secundaria, ofrecida fundamentalmente por el Inventario Nacional del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico del Ministerio de Desarrollo Económico y por el Anuario Estadístico de Antioquia de 1998, se identifica la situación del tratamiento de las aguas residuales en Colombia y en Antioquia.

3.1.3. Inventario de sistemas en Antioquia

Ficha para recolección de información y sistemas inventariados. Para la recolección de información de los sistemas de tratamiento de aguas residuales a nivel doméstico e industrial, se utilizó un formato consignado en los anexos del documento de actualización, el cual fue construido a partir de la revisión bibliográfica. El formato incluye la siguiente información: año de construcción del sistema de tratamiento, estado actual (en funcionamiento o fuera de servicio), localización del sistema, diseñador y constructor de la obra, tipo de reactor construido y diseñado, volumen de agua a tratar y su valor de Demanda Química de Oxígeno (DQO), pre-tratamiento, temperatura de operación, carga aplicada, tiempo de retención hidráulica, porcentaje de remoción de DQO, postratamiento, uso del agua tratada, cantidad de biogás producido, tratamiento de lodos y, uso y disposición de lodos.

Para 43 sistemas de tratamiento, se diligenció la ficha mencionada y se agrupó la información en una base de datos en formato de hoja de Excel, el cual se anexa en su totalidad en el documento de actualización completo del estado del arte.

Contactos realizados. Para obtener información relacionada con los sistemas de tratamiento biológicos existentes en el Departamento de Antioquia, se contactaron las Autoridades Ambientales de la región, Empresas Públicas de Medellín y algunas empresas privadas.

3.2. ESTADO DEL ARTE

Para discutir brevemente el estado del arte en lo referente a la tecnología de tratamiento biológico de aguas residuales, se plantean tres niveles de trabajo: generación de aguas residuales, tratamiento de aguas residuales y reutilización de efluentes.

En el primer nivel, se insiste en la necesidad de utilizar en forma racional el recurso hídrico, minimizar pérdidas y flujos de residuos líquidos, y reutilizar las aguas residuales que lo permitan directamente sin tratamiento, como es el caso de las denominadas "aguas grises", que se utilizan como agua de riego para jardines.

En el segundo nivel, relativo al tratamiento de aguas residuales, se identifican los siguiente hechos importantes:

- Existe un desarrollo importante de la tecnología anaerobia, específicamente en países en desarrollo, como es el caso de México y Brasil. Se viene popularizando el uso de sistemas de digestión anaerobia, tanto los denominados por sus siglas en inglés UASB (reactores anaerobios de flujo ascendente y manto de lodos) o los

FAFA (filtros anaerobios de flujo ascendente). Sin embargo, la tendencia actual se orienta a utilizar sistemas mixtos, en los cuales se mezclan las tecnologías aerobias y anaerobias, rompiendo el antiguo esquema de enfrenamiento de ambas tecnologías.

- Una de las discusiones más polémicas en la actualidad está relacionada con los sistemas descentralizados de recolección y tratamiento de aguas residuales vs. los sistemas centralizados. Los sistemas centralizados han sido criticados especialmente por los altos costos de los sistemas de colección y transporte de aguas residuales, la inflexibilidad de los mismos, el sobre-diseño a partir de proyecciones a largo plazo de la población, y la correspondiente sub-utilización de la infraestructura construida. Por su parte, los sistemas descentralizados apuntan a coleccionar y tratar las aguas residuales de una pequeña porción de la ciudad, entregando los efluentes para reutilización, cerrando de manera más flexible los ciclos de uso y re-uso del agua.
- El trabajo interdisciplinario es una necesidad sentida en los nuevos enfoques de gestión del tratamiento de aguas residuales. Se requiere de grupos humanos interdisciplinarios que cubran además de la tecnología de tratamiento, el conocimiento microbiológico del proceso y las implicaciones sociales y culturales de las actividades de tratamiento, reutilización y re-uso del agua.
- Por último, se destacan como las tecnologías con mayor desarrollo en la actualidad las siguientes: bio-reactores de membrana, combinaciones anaerobio-aerobio por baches, aireación extendida, filtros oxidativos con soportes de carbón activado y uso de poblaciones bacteriales modificadas genéticamente.

Por último, en el tercer nivel, relacionado con el re-uso del agua tratada, se presentan importantes avances en países que tienen limitaciones en cantidad y calidad de aguas superficiales. Para el re-uso se han identificado seis factores claves: económico, financiero, técnico, regulatorio, organizacional y psicológico. El factor psicológico es fundamental para la instalación, operación y sostenibilidad a largo plazo de un sistema de re-uso. La educación sobre estándares de calidad y la presentación de experiencias exitosas son pasos esenciales para que las comunidades acepten el re-uso de aguas residuales tratadas.

3.3. ESTADO DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Colombia, debido a su localización y topografía, es un país privilegiado en recursos hídricos, especialmente en aguas superficiales. Presenta una precipitación media anual de 3000 mm, 3 veces la media de la tierra y un rendimiento de escorrentía de 6 veces la media de la misma. A pesar de esta riqueza, el deterioro del recurso avanza a pasos agigantados: en 1996, 1318 ríos y quebradas se utilizaban como cuerpos receptores de vertimientos de aguas residuales y diariamente se descargaban a cuerpos de agua 2.300 toneladas de materia orgánica, 1.800 originadas en los residuos domésticos y 500 por parte del sector industrial.

La situación colombiana y antioqueña en lo que respecta al tratamiento de aguas residuales es muy similar. Si se analiza la información de los municipios que poseen algún sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas, y se compara con el total de municipios existentes tanto en Colombia como en Antioquia, la situación es dramática (véase tabla 3.1). Sólo el 14.4 % de los municipios colombianos poseen algún tipo de tratamiento de aguas residuales domésticas; para Antioquia la cifra es más crítica: sólo el 10 % de los municipios cuentan con algún sistema. Para el Valle de Aburrá debe tenerse presente que Empresas Públicas de Medellín opera actualmente la Planta de Tratamiento de San Fernando, que presta servicio al sur del Valle de Aburrá (Municipios de Itagüí, Envigado, Sabaneta y La Estrella).

Tabla 3.1. Situación municipal del tratamiento de aguas residuales en Colombia y Antioquia

Dominio geográfico	Municipios con algún sistema de tratamiento de aguas residuales	Total municipios	% de municipios con tratamiento respecto al total
Colombia (1996) ¹	154	1068	14.4
Antioquia (1998) ²	13	125	10.4

(1) Inventario Nacional del Sector de Agua potable y Saneamiento Básico, Ministerio de Desarrollo Económico.
 (2) Anuario Estadístico de Antioquia, Planeación Departamental.

3.4. INVENTARIO DE SISTEMAS EN ANTIOQUIA

De 44 sistemas de tratamiento de aguas residuales que fueron inventariados, 27 sistemas (61%) tratan aguas residuales domésticas y 17 (39%) aguas residuales industriales. El estado actual de los sistemas se discrimina en la tabla 3.2.

AGUA RESIDUAL	ESTADO ACTUAL				Total
	Funcionando	Parada	Para construir	En arranque	
Doméstica	14	7	6		27
Industrial	16			1	17
Total	29	7	6	1	44

Vale la pena resaltar la situación de sistemas 'parados' en lo que respecta al tratamiento de aguas residuales domésticas: se identificaron 7 sistemas construidos y que no se encuentran en operación actualmente, que corresponden al 26 % de los sistemas administrados por municipalidades y un 16 % de todos los sistemas. Estos datos muestran la debilidad que tienen los municipios frente a la operación y el mantenimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

La distribución de los sistemas por tecnología utilizada en el Departamento de Antioquia se presenta en la figura 3.1: de un total de 44 sistemas, se encuentran instaladas 4 unidades de lodos activados, 13 reactores anaerobios de flujo ascendente y manto de lodos UASB, 6 filtros anaerobios de flujo ascendente FAFA, 3 UASB+FAFA, 6 sedimentadores de alta tasa, 2 lagunas de oxidación, 2 lagunas facultativas, 1 combinación de lagunas, 1 tanque Imhoff, 1 pozo séptico+FAFA, 1 unidad de biodiscos, 2 filtros percoladores, y 2 pozos sépticos. Sobresale la tecnología anaerobia, con una aplicación entre UASB, FAFA y combinaciones de ambas en un 50% de los sistemas.

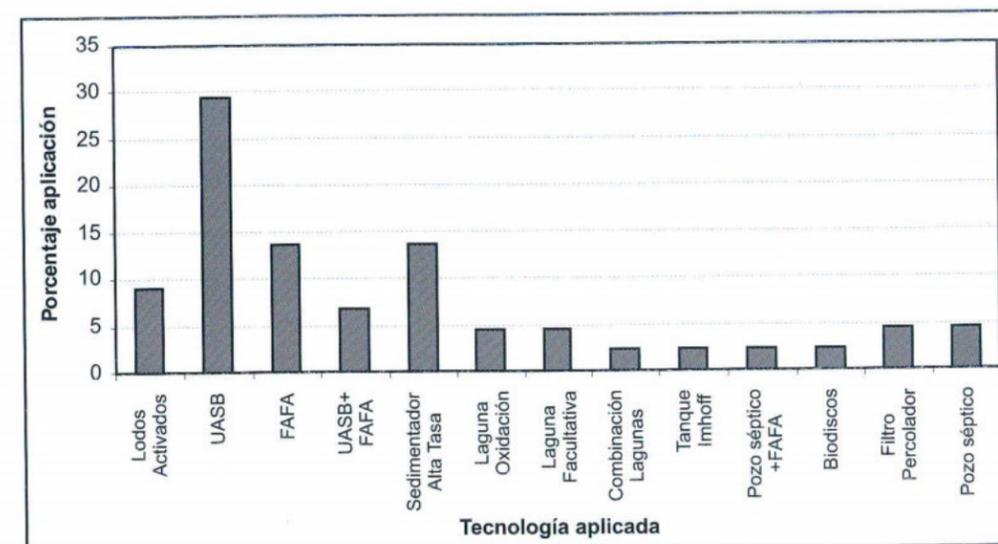


Figura 3.1. Tecnologías de tratamiento biológico empleadas

En la figura 3.2 se discriminan los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales por tipo de industria: de un total de 17 sistemas inventariados, se encontró 1 unidad para el tratamiento de aguas efluentes de procesos industriales de textiles, 2 para procesos químicos, 8 para mataderos, 1 para industrias de alimentos, 2 para lácteos, 1 para pulpa de papel, 1 para corrugado, y 1 para criaderos. La actividad industrial de sacrificio de ganado, cerdos y aves es la que presenta un número mayor de sistemas: representa un 47% del total de sistemas inventariados en la industria.

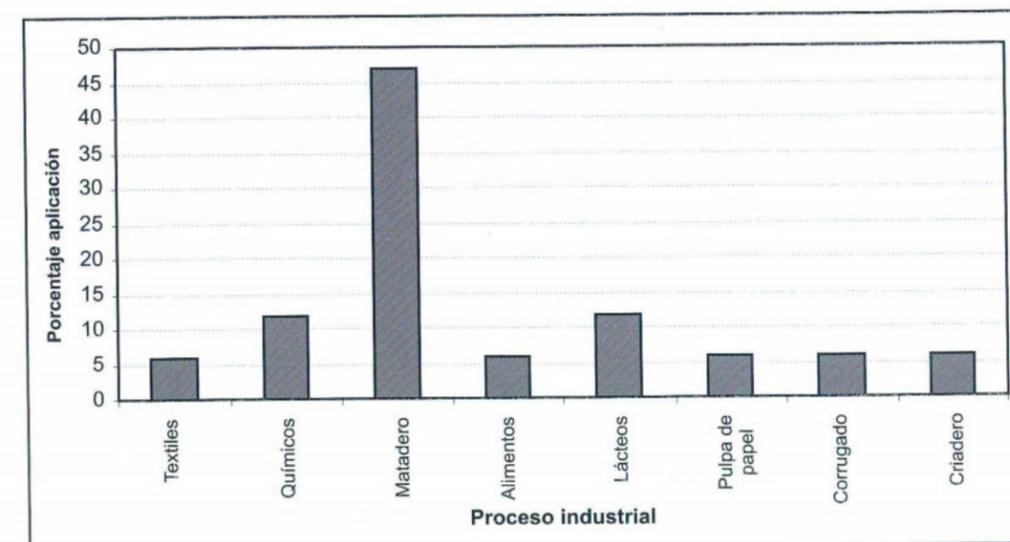


Figura 3.2. Sistemas de tratamiento por industria

3.5. CONCLUSIONES

- Tanto en el ámbito colombiano como en el antioqueño es urgente la definición de políticas y estrategias para aumentar la cobertura en el tratamiento de aguas residuales. Un aspecto muy importante es el fortalecimiento de la capacidad de los municipios para operar y mantener los sistemas de tratamiento construidos.
- Se debe procurar la utilización conjunta de tecnologías aerobias, anaerobias y fisicoquímicas, buscando optimizar los procesos y rompiendo con la tradicional discusión de que tecnología presenta mayores ventajas.
- El re-uso de las aguas tratadas es un aspecto clave a trabajar en el futuro, especialmente en las regiones que presentan serias limitaciones en las reservas de aguas superficiales: en Antioquia, la región del Occidente presenta esta situación.
- Deben evaluarse los sistemas descentralizados de manejo de aguas residuales, como alternativa a los sistemas convencionales de alcantarillado; para esto se requiere de estudios técnicos, económicos y financieros.
- Las Universidades, Institutos y Centros de Investigación, deben trabajar como equipos interdisciplinarios en las nuevas tecnologías de tratamiento de aguas residuales: bio-reactores de membrana, combinaciones anaerobio-aerobio, combinación de metanogénesis y nitrificación, y modificación genética de bacterias conformando consorcios microbiales más eficientes.

Como se mencionó en el numeral 3.1.1 de revisión bibliográfica, en el documento completo del macroproyecto eje prioritario 'Métodos Biológicos de Descontaminación', se presentan los resúmenes de los 10 artículos internacionales seleccionados y relacionados con el estado del arte del tratamiento de aguas residuales por medio de microorganismos. En este documento consolidado únicamente se presentan las referencias de los textos mencionados:

MONROY, O. FAMÁ, G. MERAZ, M. MONTOYA, L. MACARIE, H. (2000). *Anaerobic digestion for wastewater treatment in México: State of the technology*. Water Research. Vol. 34, N° 6, pp. 1803-1816.

VAN LIER, J. B. TILCHE, A. AHRING, B. K. MACARIE, H. MOLETTA, R. DOHANYOS, M. HULSHOFF POL, L. W. LENS, P. VERSTRAETE, W. (2001). *New perspectives in anaerobic digestion*. Water Science and Technology. Vol. 43, N° 1, pp. 1-18.

LAZAROVA, V. CIRELLI, G. JEFFREY, P. SALGOT, M. ICEKSON, N. BRISAUD, F. (2000). *Enhancement of integrated water management and water reuse in Europe and the Middle East*. Water Science and Technology. Vol. 42, N° 1-2, pp. 193-202.

WILDERER, P. A. SCHREFT, D. (2000). *Decentralized and centralized wastewater management: a challenge for technology developers*. Water Science and Technology. Vol. 41, N° 1, pp. 1-8.

TSADARAKIS, K. P. MARA, D. D. HORAN, N. J. ANGELAKIS, A. N. *Municipal treatment plants or wastewater in Grecia*. Water Science and Technology. Vol. 41, N° 1, pp. 41-48.

MISEREZ, K. PHILIPS, S. VERSTRAETE, W. *New biology for advanced wastewater treatment*. Water Science and Technology. Vol. 40, No. 4-5, pp. 137-144.

FABY, J. A. BRISAUD, F. BONToux, J. *Reutilization of the wastewater in French and technologies for the treatment the same*. Water Science And Technology. Vol. 40, N°. 4 -5. pp. 37-42.

KOZARISZCZUK, M. WENZEL, W. KRAUME, M. SZEZYK, U. (2000). *Microbiology and chemical engineering - new possibilities for interdisciplinary cooperation in the development of small anaerobic wastewater treatment plants*. Water Science and Technology, Vol 41, No. 1, pp. 17-20.

JEFFERSON, B. LAINE, A. L. JUDD, S. J. STEPHENSON, T. (2000). *Membrane bioreactors and their role in wastewater reuse*. Water Science and Technology. Vol 41, No 1, pp. 197-204.

AKCA, L. SAMSUNU, A. (2000). *Performance evaluation of small treatment systems in Turkey*. Water Science and Technology, Vol 41, No 1, pp. 49-52.

En un segundo anexo se presentan además conceptos generales de las tecnologías de tratamiento biológico más empleadas: **tratamiento biológico aerobio** (lodos activados, lagunas aireadas, filtros percoladores, contactores biológicos rotativos RBC y estanques de estabilización) y **procesos anaerobios** (reactor UASB, proceso anaeróbico de contacto, filtros anaerobios, lechos expandidos/fluidizados, reactores anaeróbicos de película fija y flujo ascendente DSSF, y reactores híbrido).

La base de datos, con la información de los 44 sistemas de tratamiento de aguas residuales inventariados, está disponible en formato Excel.

4. CRECIDAS, TORRENTES Y ASENTAMIENTOS HUMANOS

El documento de actualización pretende: (a) recopilar información de hechos referidos a Crecidas, Torrentes y Asentamientos Humanos ocurridos en Antioquia, en las entidades relacionadas con esta temática (SIMPAD, DAPARD, Instituto Mi Río, Ingeominas, Departamentos de Planeación, Corporaciones Autónomas Regionales y Universidades); (b) crear un catálogo (o base de datos) con la información recopilada; (c) realizar un análisis con miras a determinar las zonas más vulnerables, los desastres de mayor ocurrencia, las principales causas, las jurisdicciones más involucradas, entre otros; (d) conocer el manejo y las políticas regionales para la prevención y atención de desastres; y (e) crear lazos entre el mayor número posible de entidades relacionadas con desastres o estudios hidrológicos en Antioquia para que se cuente con una información compartida, estandarizada y completa.

4.1. METODOLOGÍA

4.1.1. Búsqueda y recopilación de información

Se realizaron visitas a las instituciones relacionadas con el manejo de cuencas y la prevención y atención de desastres en Antioquia (entidades oficiales del orden nacional, departamental y municipal, Autoridades Ambientales, Universidades, y Empresas Prestadoras de Servicios Públicos). Se recogió información en los centros de documentación y se contactaron los funcionarios directamente relacionados con el tema para conocer las políticas y competencias de cada institución.

4.1.2. Análisis y síntesis de información

Se consolidó una base de datos con los trabajos escritos que contienen información sobre eventos y estudios de cuencas. Cada trabajo está descrito por diferentes aspectos característicos que permiten su clasificación y posterior análisis de información.

La información relacionada con aspectos técnicos, legales y operativos de las instituciones encargadas del manejo del agua permite presentar un esquema comparativo de la situación actual del macroproyecto.

4.1.3. Propuestas de procesos de apropiación

La situación actual de la región, sus principales fortalezas y debilidades, y las recomendaciones para un manejo adecuado fueron presentadas en los Comités Técnicos de la Cátedra del Agua, en el Encuentro del Agua del Eje Cafetero y en el Tercer Encuentro Regional del Agua.

4.2. RESULTADOS

4.2.1. Instituciones contactadas

Se contactaron 14 instituciones para el desarrollo del documento de actualización, las cuales se especifican en la tabla 4.1 anexa.

Tabla 4.1. Instituciones contactadas

TIPO DE INSTITUCIÓN	INSTITUCIÓN
Autoridad Ambiental	Comare Corantioquia, Centro de documentación
Autoridad Ambiental, Ente Planificador	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
Institución de Educación Superior	Universidad Nacional, Biblioteca Efe Gómez Universidad Nacional, Biblioteca Facultad de Minas Escuela de Ingeniería de Antioquia, Biblioteca Universidad de Medellín, Biblioteca Universidad EAFIT, Biblioteca
Empresa de Servicios Públicos	Empresas Públicas de Medellín, Biblioteca
Entidad oficial del orden nacional	INGEOMINAS, Biblioteca
Entidad oficial del orden municipal	Instituto Mi Río Instituto Mi Río, Centro de documentación Planeación Metropolitana Secretaría de Obras Públicas Municipales de Medellín
Prevención y atención de desastres, nivel departamental	Dapard
Prevención y atención de desastres, nivel municipal	Simpad

4.2.2. Base de datos

Como resultado de la búsqueda de información se recopilaron **138 trabajos** que están organizados en una base de datos (<http://fluidos.eia.edu.co>), y que entrega información de: título, tipo de estudio, autor, editor, fecha de publicación (año), páginas, lugar (jurisdicción, cuenca, río o quebrada), observaciones, código, biblioteca y tipo de publicación. Un resumen de la base de datos desarrollado según el tipo de estudio, se presenta en la tabla 4.2 anexa.

TIPO DE ESTUDIO	NO. DE TRABAJOS	DESCRIPCIÓN
Base de datos	1	Inventario de desastres realizado por Ingeominas para el departamento de Antioquia desde 1916 hasta 1997.
Bibliografía:	1	Trabajo disponible en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional, que trata de información bibliográfica relacionada con el control de avenidas y crecidas.
Educación ambiental en prevención de desastres	12	Trabajos preparados por instituciones cuya función principal es la prevención y atención de desastres (SIMPAD, DAPARD), dependencias del Estado (Gobernación de Antioquia, Departamentos de Planeación), instituciones privadas de atención (Cruz Roja) e instituciones educativas.
Estudio de Cuencas	6	Los trabajos tratan específicamente del levantamiento de cuencas hidrográficas del municipio de Medellín por zonas, preparados por el Departamento Administrativo de Planeación Metropolitana.

TIPO DE ESTUDIO	NO. DE TRABAJOS	DESCRIPCIÓN
Estudio de cuencas, estudio hidrológico	4	Desarrollados en la Facultad de Minas, donde se evalúan aspectos teóricos de la hidrología, aplicándolos y evaluándolos en cuencas del Departamento.
Estudio de cuencas, estudio de quebradas, estudio geológico	4	Se recogieron cuatro estudios, dos de ellos desarrollados en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional en dos cuencas del norte y oriente del Departamento, donde se tratan aspectos geológicos de la cuenca, en relación con sus aspectos hidrológicos y del cauce; los dos restantes fueron desarrollados en la Universidad de Medellín donde se estudia la geología, geomorfología e hidráulica de dos cuencas en el Valle de Aburrá.
Estudio de quebradas	4	Dos de ellos desarrollados por la Alcaldía de Medellín, donde se evalúan las quebradas de algunos sectores de la ciudad; y dos trabajos realizados en la Universidad de Medellín; el primero corresponde a un modelo para el estudio de quebradas aplicado a una cuenca del área urbana del Municipio de Medellín, y el segundo presenta una breve reseña sobre las quebradas del municipio mencionado, detallando especialmente las de la zona nororiental de la ciudad.
Estudio de quebradas, estudio hidráulico	7	5 de ellos desarrollados en la Universidad de Medellín y uno en la Universidad Nacional: se presentan soluciones a problemas hidráulicos de tres quebradas del Valle de Aburrá, una corriente en el oriente del Departamento y una en el norte, a partir del cálculo de caudales; el otro trabajo, desarrollado por la Alcaldía de Medellín, presenta un resumen de caudales calculados para 30 quebradas afluentes del río Medellín.
Estudio geológico, estudio hidrológico, estudio de cuencas	2	Desarrollados en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional, donde se relacionan aspectos geológicos con un estudio hidrológico y el comportamiento de dos cuencas del norte y oriente del Departamento.
Estudio geológico, identificación de zonas de amenaza	1	Desarrollado en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional que determina las zonas de amenaza geológica en una cuenca del Municipio de Medellín.
Estudio geotécnico, estudio de quebradas	1	Desarrollado en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional, donde se determina la zonificación geotécnica de una quebrada de la zona urbana del Municipio de Medellín.
Estudio hidrogeológico	1	Desarrollado en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional para tres municipios del oriente del Departamento, que busca determinar las condiciones hídricas de las diferentes unidades geológicas del oriente antioqueño.
Estudio hidrológico	3	Dos de ellos corresponden a estudios hidrológicos generales del Valle de Aburrá: el primero desarrollado en 1952 en la Facultad de Minas y el siguiente en 1969 para Empresas Públicas de Medellín; el trabajo adicional fue desarrollado en la Universidad Nacional para la Secretaría de Obras Públicas Departamentales sobre la hidrología del Departamento de Antioquia.
Fenómeno de El Niño	1	Realizado por Secretaría de Agricultura para la mitigación de efectos del fenómeno El Niño en Antioquia.
Estudio hidrológico, estudio de quebradas	6	Cuatro de ellos corresponden a estudios hidrológicos de quebradas del municipio, agrupadas por zonas y contratados por la Alcaldía; un estudio, desarrollado en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional; y un trabajo desarrollado en la Universidad de Medellín sobre la aplicación de metodologías no convencionales en la estimación de parámetros hidrológicos de una cuenca del oriente y tres cuencas del norte del Departamento.

TIPO DE ESTUDIO	NO. DE TRABAJOS	DESCRIPCIÓN
Estudios en atención de desastres, estudio de cuencas	1	Realizado en el Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional, sobre las características, tratamiento y manejo de las cuencas torrenciales, haciendo referencia especial a la cuenca del río Tapartó en el suroeste del Departamento.
Estudio hidrológico, estudio hidráulico, estudio de quebradas	24	Desarrollados en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional y la Universidad de Medellín: 18 corresponden a cuencas del Valle de Aburrá y 6 a cuencas del oriente del Departamento; la estructura general de los trabajos comprende un estudio hidrológico de la cuenca y el cauce determinando sus características geométricas y geomorfológicas; recolección de datos de variables climáticas y meteorológicas, principalmente relacionados con la precipitación; cálculo de caudales pico para diferentes periodos de retorno mediante modelos hidráulicos establecidos (Snyder, Racional, Williams y Hann, S.C.S.); y propuestas técnicas y cálculos de estructuras hidráulicas útiles para la evacuación de los caudales estimados.
Estudios en atención de desastres	7	3 de ellos corresponden a artículos en publicaciones conjuntas no referidos a una zona específica; 2 corresponden a estudios de eventos hidrológicos en el suroeste del Departamento, recogidos en el DAPARD; 2 trabajos restantes desarrollados en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional para el análisis de inundaciones en el Valle de Aburrá y caracterización de la gestión ambiental en situaciones post-desastre para el suroeste del Departamento.
Identificación de zonas de amenaza	3	2 de ellos desarrollados en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional, de identificación de amenazas en dos cuencas del Valle de Aburrá; el trabajo restante fue desarrollado por Corantioquia y contiene la identificación de las principales amenazas por eventos naturales en los 79 municipios de la jurisdicción.
Identificación de zonas de riesgo	2	Uno desarrollado en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional sobre la zonificación de riesgos para una cuenca del Valle de Aburrá; el otro trabajo, desarrollado por la Secretaría de Desarrollo Comunitario del Departamento, identifica los principales riesgos (de todo tipo) para un municipio del norte.
Identificación de zonas de riesgo, estudio geotécnico, estudio de cuencas	1	Desarrollado en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional sobre zonificación geotécnica y de zonas de riesgo de una quebrada del Municipio de Medellín.
Mapas geológicos, identificación de amenazas	1	Desarrollado en la Universidad Pontificia Bolivariana sobre formaciones geológicas y de amenazas por deslizamiento e inundación para 5 quebradas del Municipio de Medellín.
Informe técnico de emergencias	11	7 de ellos fueron realizados en Corantioquia: contienen los informes técnicos de las visitas a los municipios para evaluación de situaciones de emergencia (agrupados por regionales); 3 fueron elaborados en el Fopreve sobre situaciones de emergencia por avalancha en tres municipios del oriente, suroeste y Urabá antioqueño; el trabajo restante contiene un reporte de situaciones de emergencia en Medellín en el año de 1988, desarrollado por la Secretaría de Desarrollo Comunitario del Municipio.
Planificación de cuencas	3	2 de ellos contienen Planes de Ordenamiento y Manejo de microcuencas de la zona suroriental del Municipio de Medellín, desarrollados por el Instituto Mi Río; el trabajo restante fue desarrollado por Cornare y contiene el Plan de Manejo de una microcuenca del Oriente Antioqueño.

TIPO DE ESTUDIO	NO. DE TRABAJOS	DESCRIPCIÓN
Planificación de quebradas	8	6 desarrollados por el Departamento Administrativo de Planeación Metropolitana sobre la identificación de puntos críticos y retiros de las quebradas del Municipio de Medellín; un trabajo desarrollado por el Instituto Mi Río sobre acciones a mediano y largo plazo a ejecutar en las quebradas; y un restante desarrollado por Hidramsa Ltda. sobre reglamentación de la llanura de inundación de la quebrada La Mosca, en el oriente del Departamento.
Políticas de ordenamiento	3	Uno de ellos contiene el acta de una sesión del Concejo de Medellín sobre el desarrollo y manejo de las cuencas hidrográficas del Municipio (1989); otro de los trabajos contiene reflexiones sobre el concepto de los desastres dentro del Ordenamiento Territorial, desarrollado por la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional; el trabajo restante contiene las memorias del 2º Seminario Ciudad y Medio Ambiente desarrollado por la Alcaldía de Medellín en conjunto con otras entidades del orden municipal.
Planificación del territorio	1	Desarrollado por la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional sobre la relación entre los desastres y la población, haciendo énfasis en el caso de Medellín.
Planificación del territorio, políticas de prevención de desastres	1	Desarrollado por el SIMPAD sobre la prevención de desastres como elemento constitutivo de la planificación.
Políticas de prevención de desastres	11	2 de ellos desarrollados por el SIMPAD sobre los lineamientos para la elaboración de un Plan Estratégico de prevención y atención de desastres en Medellín; tres fueron hechos mediante contratación (Alcaldía de Medellín) y buscan la planeación y manejo integral de políticas de prevención y atención de emergencias en la ciudad; un documento propuesto por la Dirección Seccional de Salud sobre la conformación de un Departamento de Prevención y Atención de Desastres; dos trabajos realizados por el Fopreve acerca de la identificación y prevención de desastres a nivel nacional; un trabajo desarrollado en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional sobre prevención de desastres en el Altiplano del Oriente Antioqueño en relación con las políticas de gestión y ordenamiento territorial; el último trabajo corresponde a las memorias del I Congreso Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, organizado por el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres.
Riesgo hidrológico	7	2 de ellos son documentos informativos realizados por el Fopreve sobre desastres hídricos e inundaciones; 1 elaborado por la Alcaldía de Medellín sobre evaluación de riesgo hidrológico en la ciudad; 1 desarrollado por el Simpad que contiene la descripción del proyecto hidrometeorológico para la comuna nororiental de Medellín; 1 propuesta de red de alertas hidrometeorológicas para el Valle de Aburrá hecha por el Himat; 1 trabajo correspondiente a una ponencia en el Seminario Nacional de Políticas, Silvicultura y Protección Forestal sobre la efectividad de la vegetación boscosa para el control de eventos hidrológicos; y finalmente, 1 publicación de revista que contiene algunas reflexiones sobre crecidas e inundaciones.

Además se recopiló información de prensa donde se reportan amenazas, ocurrencias y atención de desastres naturales. En esta recopilación se obtuvieron 97 artículos, provenientes de El Colombiano, El Envigadeño, El Mundo, El Tiempo y Vivir en el Poblado (<http://fluidos.eia.edu.co>). Los artículos con fecha anterior al año 2000 fueron encontrados en el Centro de Documentación del Instituto Mi Río; los del año 2000 fueron recopilados en la Escuela de Ingeniería de Antioquia (durante este año se recopilaron 66 artículos).

Durante la última parte del trabajo se recogió información sobre las funciones de las instituciones encargadas del manejo del agua en el Departamento. En el documento de actualización completo de este macroproyecto eje prioritario se presenta una tabla que relaciona la institución, el tipo de función y su jurisdicción.

4.3. ANÁLISIS

4.3.1. Localización de estudios

En términos generales, las zonas cuyas cuencas, quebradas y cauces, han sido estudiadas con más detalle en Antioquia según la recopilación de la base de datos, se ilustran en la figura 4.1.

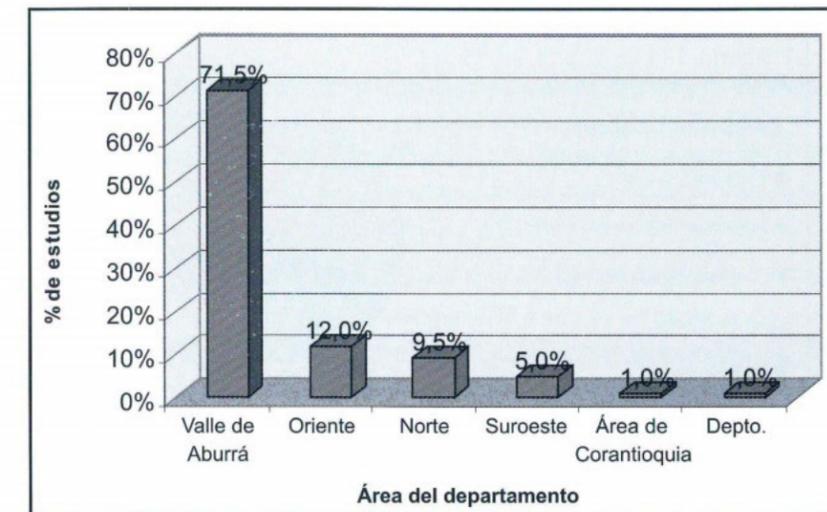


Figura 4.1. Distribución geográfica de trabajos

4.3.2. Temas más tratados

Según la clasificación de la base de datos, los tipos de estudio más representativos para Antioquia se presentan en la figura 4.2. El 29% que se reporta como otros corresponde al conjunto de los tipos de estudio menos abordados; es decir, con un porcentaje de trabajos inferior al 5%.

4.3.3. Número de estudios por municipio

En esta parte del trabajo se hace una comparación entre la cantidad de eventos de inundaciones en los municipios de Antioquia (tomados del inventario de desastres desarrollado por el DAPARD) y los estudios recogidos en la base de datos. No se incluye el Municipio de Medellín por tener muchos más eventos y estudios que los demás municipios. Se esperaría que el número de estudios fuera como mínimo igual al número de desastres ocurridos en cada municipio. Los resultados de esta comparación (para los municipios con información), se presentan en la figura 4.3. Los datos de desastres y el número de estudios por municipio se incluyen en los anexos del documento completo del macroproyecto eje prioritario de interés.

4.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones generales.

- Aunque existen instituciones en Antioquia responsables del manejo y mantenimiento de cuencas y quebradas, no hay una definición clara y precisa de sus competencias.
- Existen varias instituciones encargadas de la prevención, atención y recuperación de desastres en el Departamento. Pero, ¿cómo interactúan para desarrollar una labor coordinada y técnica, que permita conocer la historia de eventos?

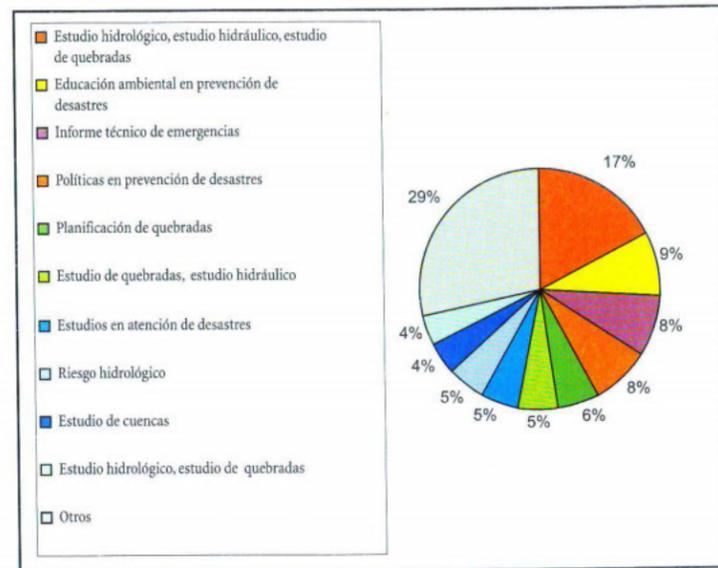


Figura 4.2. Tipos de estudio desarrollados en Antioquia

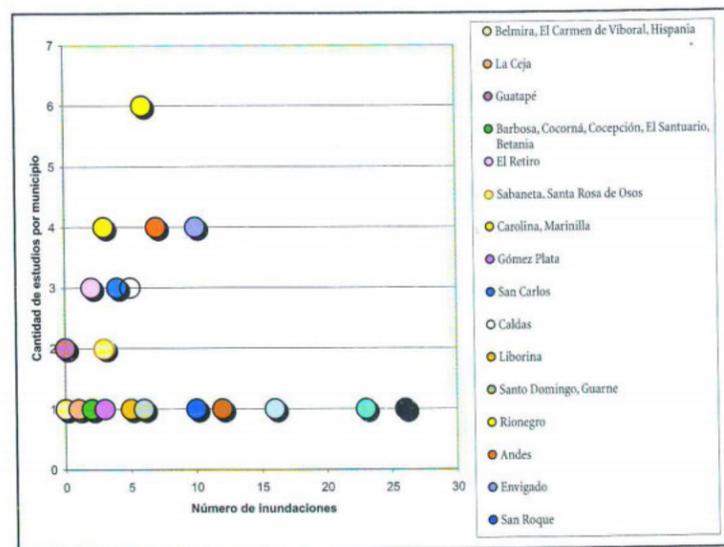


Figura 4.3. Cantidad de estudios por municipio en Antioquia vs. Número de inundaciones

- Para el caso del Municipio de Medellín, no hay claridad sobre cual es la institución encargada de delimitar y manejar los retiros a las corrientes superficiales.
- En algunas de las instituciones visitadas no existen centros de documentación sistematizados y mucha información se pierde fácilmente pues no se tiene documentación técnica de soporte.
- Aunque se han hecho esfuerzos aislados para desarrollar bases de datos, no se cuenta con una base unificada para el registro de eventos.
- Los trabajos desarrollados se encuentran muy concentrados en zonas específicas de Antioquia.
- No existe un equilibrio entre el número de eventos y el número de estudios desarrollados en las cuencas de Antioquia.
- Sobre el tema 'Crecidas, Torrentes y Asentamientos Humanos' existe un creciente interés por parte de las Corporaciones Autónomas Regionales, el sector académico se ha vinculado directamente con estudios relacionados con el tema y existen metodologías establecidas para el estudio de quebradas.

Observación.

De acuerdo con el planteamiento del problema presentado por la Cátedra del Agua en el Primer Encuentro Regional del Agua, el 26 de noviembre de 1997, el objetivo principal de este macroproyecto debía ser "establecer y divulgar en el medio las medidas y prácticas más convencionales para prevenir o atenuar los daños de catástrofes" e "identificar las áreas de riesgos hidrológicos en el Departamento de Antioquia, construyendo los mapas de amenazas y vulnerabilidades correspondientes a dichas zonas".

Después de dos años de exploración desde finales de 1999, hasta el día de hoy no se ha cumplido a cabalidad con los objetivos de aquellos comienzos. La causa, una enorme deficiencia en los sistemas de gestión; es decir, en las instituciones involucradas con el proyecto, para apoyar en el cumplimiento de los objetivos. Ejemplos de las deficiencias del sistema de gestión pueden encontrarse en: (a) la falta de un inventario sistematizado de desastres; (b) la ausencia de un sistema de información bibliográfica en algunos centros de documentación; (c) la falta de políticas claras de actuación entre los organismos nacionales, gubernamentales, regionales y municipales; (d) la falta de recursos económicos; y en general, (e) una falta de compromiso por la ausencia de concientización, por impotencia o por negligencia.

Sin embargo, a pesar de esas deficiencias, se llevó a cabo un trabajo de iniciación del proyecto que deberá despejar el camino futuro en procura del cumplimiento de los objetivos inicialmente planteados, vigentes aún.

Reflexión*.

'Hacia un manejo integrado de las corrientes superficiales para la ciudad'

Hacemos recuerdo de esa sensación de estudiante de ingeniería de querer saberlo todo, de querer aprender lo que como humanidad hemos venido desarrollando. Mirándolo así, se trataba de aprender a hacer las cosas tal y como debían hacerse, tal y como venían haciéndose. Y sin querer ser irreverentes con nuestros colegas ni desconsiderados con nuestro sistema de organización política y administrativa los invitamos a reflexionar acerca de nuestra idea de ciudad. Realmente desconocemos dónde se origina nuestra actual forma de distribución urbana. Miremos un poco las consecuencias de lo que hemos venido construyendo, tengamos muy presente la expresión manejo integrado y preguntémosnos si lo que hemos querido hacer es integrarnos al medio natural o por el contrario aislarnos de él, porque reconociendo la importancia del agua como elemento en la vida de todo organismo, deberíamos preocuparnos por el mantenimiento de su condición natural y no sólo eso, pensemos en lo que puede significar el movimiento del agua para nuestro ser pensante, ¿no creen ustedes que la misma movilidad de sus

* Reflexión tomada textualmente del Documento de Actualización del Macroproyecto Crecidas, Torrentes y Asentamientos Humanos, presentado por la Escuela de Ingeniería de Antioquia en noviembre de 2001.

corrientes son motor para la movilidad de nuestros pensamientos?. El agua no sólo es importante como elemento físico, también cumple una función espiritual. Ahora pongámonos en la tarea de revisar lo que hemos venido haciendo para el mantenimiento de estas cualidades físicas y espirituales del agua. Para las primeras necesitaríamos realmente conocer los mecanismos que utiliza el agua en la formación de cauces y llanuras y saber además cómo podemos utilizarla y entregarla luego en un estado casi natural. Sin embargo, no hemos sabido tener esto en cuenta porque a los mecanismos geomorfológicos hemos preferido canalizarla y a veces hasta encerrarla en conductos subterráneos; en cuanto a su uso, la hemos utilizado para disponer nuestros desechos y esto último lo hemos hecho más desde nuestras ciudades que en los mismos campos; no alcanzamos a comprender porqué al campesino se le obliga a construir estructuras de tratamiento como condición para prestarle el suministro del agua potable, mientras que en las ciudades se cobra para disponer esos desechos en las mismas fuentes de agua, ¿no parece paradójico que la tecnología de tratamiento se aplique más en el campo que en las ciudades? Y ahora analicemos nuestras acciones desde lo espiritual. Situémonos en un lugar completamente estático donde nada fluye, donde no hay un movimiento de los elementos fluidos, no hay agua y el aire está quieto, ni la hoja de un árbol se puede mover, ni un grano del suelo puede ser arrastrado, ¿Qué podríamos sentir en ese lugar? Y vamos a un sitio de cascadas exuberantes donde agua y aire se entremezclan, donde de una aparente suavidad en las alturas resulta una fuerza descomunal en los fondos, o sencillamente, imaginémosnos frente a una simple corriente de agua, igual que sucede con el movimiento de la llama en la chimenea, podríamos permanecer todo el tiempo observando y contemplando sus movimientos. Pero resulta que hemos decidido privarnos de esa contemplación, hemos definido unos pobres delineamientos para el curso de las aguas mediante canalizaciones rectas y profundas o en otros casos hemos decidido perder de vista al agua mediante aquellas conducciones subterráneas. Entonces, según lo expuesto hasta aquí no podríamos hablar de haber hecho un manejo integrado de las corrientes superficiales para la ciudad; sin embargo, podemos recuperar lo perdido y deshacer lo hecho y podemos pensar desde nuestros corazones cómo sería la ciudad que quisiéramos tener y cómo podríamos manejar el recurso que el elemento agua nos proporciona.

Desde la experiencia vivida durante la elaboración del documento de actualización del tema de la Cátedra del Agua identificado como "Crecidas, Torrentes y Asentamientos Humanos" se nos ocurre sugerir lo siguiente: Necesitamos como punto de partida revisar la significación que tenemos del agua como elemento (en verdad no sobraría hacerlo con los elementos aire y suelo). Luego de esta revisión introspectiva vendría la conexión de nuestras ideas con su ejecución. Cualquiera de ustedes podrá estar pensando lo difícil que puede ser la formulación, programación, planificación y la ejecución de esas ideas cuando por nuestras ciudades pasan cada cierto tiempo, por periodos realmente breves, distintas administraciones. Pero esto no debe ser impedimento, vamos a atrevernos a formular una acción que dé continuidad a nuestras ideas y que las vitalice con el tiempo: en la medida que hagamos del agua un elemento cultural, sobrevivirán nuestras ideas. Y no se piense ahora que se trata tan sólo de enseñar en las escuelas a modo de suplir nuestras deficiencias culturales como se ha hecho con la educación sexual, las lenguas francesa e inglesa, la drogadicción o la ecología. No, la cultura no sólo se hace en las escuelas, la cultura debe emanar de nuestros gobernantes, dirigentes, ingenieros, médicos, economistas, artistas, empleados, vendedores, impregnando todo el pueblo. La cultura es el garante de un trabajo continuo, coherente, direccionado. Este trabajo lo hemos querido iniciar desde la Cátedra del Agua. Pero además la cultura no hace escogencia entre espectador o actor, más bien la cultura pervive gracias a ese dualismo. Es también lo que se ha pretendido cultivar desde la Cátedra mediante la relación Universidad-Empresa. Una vez hagamos conciencia de esa significación del agua, cuánto podría ayudarnos en su conocimiento la construcción biográfica de cada cauce que la alberga, de cada planicie que la recibe en ocasiones. La más terrible sorpresa que nos ha dado este trabajo que hoy presentamos ha sido sin duda la de sentirnos huérfanos de una historia regional del agua, una sorpresa que acabó definitivamente con aquella sensación de estudiante de creer que todo estaba correctamente definido.

Lectura: **Juan Fernando Barros**, Escuela de Ingeniería de Antioquia.
En Tercer Encuentro Regional del Agua, noviembre 23 de 2001.

5. INTERACCIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN

Las interacciones Suelo-Agua-Vegetación, aparentemente simples, evidencian una enorme complejidad: en ellas están involucrados muchas variables que se relacionan entre sí de manera bidireccional y por lo tanto los resultados de tales interacciones resultan de difícil predicción. Así, cada una de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo de una determinada área influye en los componentes del ciclo hidrológico, dependiendo de las características morfológicas, anatómicas y fisiológicas de la vegetación presente en dicha área. Y a su vez, el tipo de vegetación está influenciado por las condiciones hídricas y edáficas de un área específica.

El entendimiento y la predicción de las interacciones entre estos tres componentes del ambiente son importantes ya que permiten disponer de criterios técnicos y científicos para la selección de la cobertura más apropiada para la conservación de los suelos y la regulación hídrica. Se podrá observar en el documento, que aún existen controversias en diversos aspectos relacionados con el tema, las cuales dificultan la toma de decisiones en torno al establecimiento de coberturas vegetales protectoras y/o productoras.

Se espera que este texto sirva para motivar a las personas de las distintas instituciones involucradas e interesadas en el uso sostenible de los recursos naturales y que puedan adelantar o apoyar proyectos de investigación, de tal manera que se tengan avances significativos relacionados con el estudio de las Interacciones Suelo-Agua-Vegetación. Es importante que este proceso de profundización en el tema sea cubierto de manera articulada, coherente y sistemática, para que pueda constituirse en una herramienta útil para la planeación de proyectos de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas.

Con este trabajo se pretende: (a) recopilar información existente en las entidades que de alguna manera están relacionadas con esta temática (Universidades, Corporaciones Autónomas Regionales y Centros de Investigación); (b) elaborar un catálogo (o base de datos) con la información recopilada; (c) realizar un análisis a partir de los datos que conforman el catálogo, de manera que puedan determinarse las zonas y los ecosistemas del Departamento más y menos estudiados, y los temas específicos que se hayan tratado con mayor amplitud, profundidad y rigor; y (d) crear vínculos entre las entidades que han desarrollado estudios en el tema en el Departamento de Antioquia para que cada una de ellas tenga acceso a información completa.

Aunque en el catálogo no se reportan trabajos desarrollados en otras zonas fuera del Departamento, en el análisis de resultados se consideran algunos realizados en el país para determinar el estado de avance del tema en la región. Si bien en la base de datos se incluye una descripción de los aspectos metodológicos de cada estudio, el interés principal radica en los resultados de cada uno de ellos.

El documento de actualización incluye únicamente los estudios finalizados, publicados y disponibles al público. No se reportan aquellos que se encuentran en proceso de desarrollo.

5.1. METODOLOGÍA

5.1.1. Recopilación de información

Se recopiló la información relacionada en los centros de documentación de las universidades e instituciones que lo han desarrollado en el Departamento y se consignó en una base de datos que puede ser consultada a través del sitio (<http://fluidos.eia.edu.co>). Adicionalmente, se diseñó una encuesta que se envió a dichas instituciones para recopilar la información que no se encuentra disponible en el centro de documentación y para conocer los conceptos con respecto a los vacíos y el estado de desarrollo del tema en Antioquia.

5.1.2. Análisis y síntesis de la información recopilada

Se realizó un análisis de la información recopilada en los centros de documentación y a través de las encuestas que permitió identificar los estudios sobre el efecto que tiene el tipo de cobertura vegetal en las condiciones hídricas y edáficas de un ecosistema y el desarrollo de la vegetación en áreas del Departamento con diferentes características físicas. A partir de este análisis se determinaron las regiones, las coberturas vegetales y los temas específicos más estudiados.

Adicionalmente, se identificaron las principales fortalezas y debilidades del Departamento que permitieron la formulación de los lineamientos para el trabajo futuro.

5.1.3. Procesos de divulgación

La información recopilada y sintetizada se presentó en el Encuentro del Agua del Eje Cafetero y en el Tercer Encuentro Regional del Agua.

5.2. RESULTADOS

5.2.1. Desarrollo de la base de datos con la información disponible para el Departamento

- a. **Centros de documentación visitados.** Se visitaron los centros de documentación de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (Bibliotecas Efe Gómez y de la Facultad de Minas), de Empresas Públicas de Medellín, de la Universidad Eafit, de Cornare y de Corantioquia.
- b. **Número de proyectos.** A partir de las visitas a los centros de documentación, se ha elaborado una base de datos con los proyectos desarrollados a nivel departamental sobre el tema, que contiene los siguientes campos: Título, Tema específico, Autor, Fecha, Sitio, Biblioteca, Código, Resumen. Se recopilaron 41 registros de estudios que incluyen proyectos de investigación, monografías y programas de gestión y ordenamiento desarrollados por las Autoridades Ambientales.
- c. **Temas específicos de los proyectos.** A partir del análisis del contenido de los trabajos incluidos en la base de datos, se han agrupado en las siguientes categorías:
 - Suelos-vegetación: incluye 23 trabajos encontrados en las bibliotecas de la Universidad Nacional Sede Medellín, Universidad Eafit y Empresas Públicas de Medellín.

- Agua-vegetación: incluye 15 trabajos encontrados en los centros de documentación de la Universidad Eafit, Efe Gómez de la Universidad Nacional Sede Medellín y Empresas Públicas de Medellín.
 - Suelo-Agua-Vegetación: esta categoría incluye 3 trabajos encontrados en la Biblioteca de Empresas Públicas de Medellín y Efe Gómez de la Universidad Nacional Sede Medellín.
- d. **Resultados de cada tema específico.** A continuación se presenta un resumen de los principales resultados obtenidos en cada una de los temas específicos enunciados anteriormente.

SUELOS-VEGETACIÓN. Es el tema más tratado según la recopilación bibliográfica. Se ha clasificado en varias categorías que dependen del sitio donde se desarrolló o del tipo de trabajo. Los resultados más importantes en este tema específico son:

- **Recopilación bibliográfica:** se hace un análisis de la relación entre el tipo de cobertura vegetal, su densidad y altura con la susceptibilidad a la erosión de los suelos donde está establecida; se concluye que las mejores condiciones contra la erosión corresponden a las coberturas de menor altura y mayor densidad (Gómez, 1998).
- **Recuperación de suelos degradados:** se han desarrollado estudios para determinar la recuperabilidad de suelos degradados por minería, especialmente en la zona del Bajo Cauca (municipios de Caucaasia, El Bagre, Zaragoza) y en el Magdalena Medio (Municipio de Puerto Nare). Se ha determinado que el establecimiento de especies leguminosas, como *Acacia mangium*, contribuye al mejoramiento de las condiciones de fertilidad del suelo, tanto por el aporte de materia orgánica como por la fijación de nitrógeno. Se reporta también un trabajo realizado en el occidente del Departamento (municipio de Santa Fe de Antioquia) para la recuperación de suelos degradados por sobrepastoreo, mediante el establecimiento de Nim (*Azadirachta indica*); al cabo de dos años, se evidenció un mejoramiento en las condiciones microclimáticas y una disminución del potencial erosivo.
- **Piedras Blancas:** es tal vez la zona más trabajada del Departamento. En ella se han obtenido resultados especialmente en trabajos relacionados con la evaluación de propiedades físicas y químicas del suelo bajo diferentes coberturas vegetales. Los resultados más relevantes se presentan a continuación:

Al comparar las variaciones de las propiedades físicas y químicas de suelos bajo coberturas de vegetación natural y plantaciones de *Pinus patula* de diferentes edades, se muestra que las menores variaciones se presentan en la vegetación natural, y se presenta un desmejoramiento en las condiciones del suelo a medida que aumenta la edad de la plantación forestal, hasta que se estabiliza en plantaciones de edad avanzada que ya han cumplido su ciclo de crecimiento (Castro, 1987).

Se hizo una comparación de la pérdida de suelo entre varios coberturas, entre ellas, cultivos, rastrojo alto, pino pátula, ciprés, pasto, pasto enmalezado, rastrojo bajo y robledal, usando suelo desnudo como patrón. Se estableció que la menor pérdida de suelo se presenta en las coberturas boscosas, especialmente en roble y pino, aunque los resultados están también influenciados en gran medida por condiciones diferentes a la cobertura vegetal (Castaño, 1999).

Relación entre la hidrofobicidad de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas bajo cobertura de pino pátula y la acumulación de litter (hojarasca que se deposita en el suelo). No se encontró relación estadística entre ambas variables, pero se estableció relación entre el espesor de la capa hidrofóbica de suelo y el espesor

de la capa de acículas sobre él. Éste es un fenómeno que no se distribuye continuamente en el campo y afecta únicamente las propiedades y características relacionadas con la humedad del suelo (Jaramillo, 1992; Castillo y Gómez, 1995; Abril y Ortiz, 1996).

Se realizaron ensayos de establecimiento de *Acacia melanoxylon* en suelos con diferencias de topografía y humedad. Aunque existen algunas diferencias en el crecimiento, en general es una especie que se adapta fácilmente tanto a suelos fértiles como degradados y es útil como fijadora de nitrógeno (Gómez y Santiago, 1992).

Se referencia un trabajo que busca mostrar la importancia de la microflora del suelo, realizando ensayos en suelos agrícolas (rábano) y forestales (pino pátula) en Piedras Blancas. Se encontró que en el suelo forestal hay un descenso de las poblaciones bacteriales con respecto a la condición inicial del suelo y que al adicionar microorganismos en ambos suelos (forestal y agrícola) la mejor respuesta de la vegetación se presenta en suelos forestales (Gómez y Gómez, 1979).

Se presenta un trabajo que muestra la relación entre la vegetación y la estabilidad de las orillas de la quebrada, haciendo un inventario de vegetación y del estado del cauce a lo largo de todo su recorrido. Se hacen recomendaciones para el establecimiento de coberturas y especies apropiadas para los estados de deterioro de las orillas del cauce (Arboleda, 1993).

- **Suroeste Antioqueño:** en esta zona, especialmente en el Municipio de Fredonia, se desarrolló un trabajo para determinar las propiedades de crecimiento de *Cordia alliodora* en suelos con diferentes condiciones de nutrientes, cultivos que están asociados a plantaciones de café (Giraldo y Escobar, 1979).
- **Páramo de Belmira:** el trabajo desarrollado en esta zona relaciona las coberturas vegetales con las características geomorfológicas y de suelo, mediante fotointerpretación y mediciones de campo. Como resultado importante, se encontró un nuevo reporte dendrológico para Antioquia.

AGUA-VEGETACIÓN. Dentro de este tema los trabajos se han dividido en varios subtemas, de acuerdo con su alcance y ubicación. A continuación se presentan los resultados específicos para cada una de las clasificaciones:

- **Revisión bibliográfica:** dentro de esta clasificación se incluyen trabajos cuyo objetivo sea la recolección de información secundaria referida a la relación entre las coberturas vegetales y el ciclo hidrológico, además de artículos de revista que hablan sobre el mismo tema sin referirse a un sitio específico donde se desarrolló el trabajo. Los trabajos y conclusiones más sobresalientes de este grupo son:

Revisión sobre la influencia de la cobertura vegetal sobre los parámetros del ciclo hidrológico (Córdoba y Peñafiel, 1987).

Desarrollo de un modelo de montaje de una cuenca experimental que tenga en cuenta todos los factores, efectos y elementos que interactúan en una cuenca hidrográfica (Velásquez, 1982).

Efecto de la reforestación (en general cambio de la cobertura vegetal) en el caudal de una cuenca. Se puede afirmar según este artículo que la reforestación no es la solución infalible a los problemas de disponibilidad de agua en las cuencas, debido a que el componente arbóreo presenta tasas de intercepción y evapotranspiración mayores que otras coberturas de menor área foliar (Álvarez, 1996).

Existen evidencias teóricas y observaciones que demuestran que el efecto de la deforestación radica en la reducción de los caudales medios y aumento de los extremos, con los consecuentes efectos en inundaciones y aumento de temperatura superficial, entre otros (Poveda y Mesa, 1995).

Existe una guía académica que presenta un estudio sobre la climatología y las características que hacen posible la conexión de las coberturas vegetales (especialmente forestales) y la atmósfera (Giraldo, 1989).

Un trabajo que buscó determinar mediante revisión bibliográfica la relación entre algunas prácticas forestales y la calidad del agua en la cuenca donde está establecida la plantación forestal (Vélez, 1983).

- **Piedras Blancas:** a continuación se reseñan los principales estudios y resultados de los trabajos realizados en el sector de Piedras Blancas:

Estimación de la evapotranspiración en varias coberturas (coníferas y latifoliadas) utilizando dos métodos (Penman y Penman-Monteith). Se encontraron resultados similares en consumo de agua por parte de la vegetación (bosques de coníferas asociados con latifoliadas) para ambos métodos (Duque, 1993).

Se estimó la escorrentía mediante el método del número de curva y se encontró que éste no es completamente confiable en la zona andina pues las condiciones y supuestos del método no han sido completamente comprobados (Mejía, 1993).

Se trató de establecer la relación entre el aumento de la reforestación y la producción de aguas en la cuenca de Piedras Blancas, pero los análisis estadísticos no mostraron cambios significativos anuales en los caudales promedio, ni en los máximos, ni en las descargas. Sin embargo, los resultados no son completamente confiables pues se presentaron incongruencias en las observaciones (Ramírez, 1971).

- **Municipio de Guadalupe (cerca al embalse de Troneras):** a continuación se presentan los principales resultados de los estudios realizados en el municipio:

Se midió y se comparó la interceptación de tres coberturas forestales (Pino, ciprés y bosque natural), obteniendo que la mayor interceptación se presentó en la cobertura de pino, seguida por la cobertura de bosque natural y por último la cobertura de ciprés; este resultado está sesgado por factores como la densidad de plantación, el área basal y otros que pueden determinar la cantidad de precipitación interceptada por cada cobertura (Tobón, 1989).

A partir de un estudio de comparación entre coberturas vegetales (bosque natural, plantación forestal de coníferas y pastos) y su relación con los elementos del balance hídrico, se concluyó que la zona con vegetación natural presenta las mejores condiciones en términos de regulación de caudales, calidad típica del agua y producción de sedimentos (Velásquez, 1984).

- **Municipios de Medellín e Itagüí:** se realizó un diagnóstico ambiental y de vegetación de una microcuenca compartida entre ambos municipios. Entre los resultados del estudio se resalta la necesidad de conservar la vegetación natural en las cabeceras de las quebradas, que actúa como reguladora de escorrentía superficial, disminuyendo la ocurrencia de procesos erosivos y hechos catastróficos asociados a inundaciones causados por exceso de aguas de escorrentía (Morales, 1980).

SUELO-AGUA-VEGETACIÓN. Esta categoría incluye estudios que relacionan tanto las condiciones edáficas como hidrológicas del sitio. Dentro de esta categoría los resultados más importantes son:

Se realizó un trabajo en dos microcuencas de Piedras Blancas, para determinar el balance hídrico bajo tres coberturas vegetales representativas (bosque natural secundario, plantaciones de ciprés y plantaciones de pino), además de determinar la humedad del suelo en las coberturas. Los resultados obtenidos mostraron que en una de las microcuencas estudiadas no existe diferencia significativa en la humedad del suelo entre coberturas, mientras que en la otra microcuenca, la humedad del suelo de la parcela de vegetación natural fue mayor que las otras dos coberturas (Giraldo, 1991).

Se evaluó la producción de sedimentos bajo diferentes coberturas vegetales (rastreo alto, plantación de ciprés, pastos y suelo desnudo) en el corregimiento de San Antonio de Prado (Municipio de Medellín). Se encontró que existe una diferencia muy alta en la pérdida de suelo (producción de sedimentos) entre terrenos con algún tipo de cobertura vegetal y suelos desnudos: en suelos con asociaciones de coberturas se presentaron los menores valores de pérdida de suelo, especialmente en las parcelas de vegetación natural y plantación forestal asociada con pastos; en las parcelas de vegetación natural se presentaron los mayores valores de escorrentía y a la vez las menores tasas de pérdida de suelo, demostrando la alta capacidad de amarre de la cobertura boscosa natural (Galvis y Posada, 1996).

Un trabajo que consiste en una evaluación de la vegetación asociada a las márgenes de una microcuenca en el oriente cercano y un ensayo de establecimiento de especies propias de dicha cuenca en las zonas desprovistas de vegetación (Giraldo, 1990).

5.2.2. Encuesta dirigida a investigadores y gestores de proyectos

Se desarrolló una encuesta que sirvió de apoyo al trabajo de recolección de información para la base de datos. Permitió identificar los principales problemas, los vacíos del conocimiento y las personas e instituciones que son reconocidas en la región por su trabajo, tanto de investigación como de gestión en el tema. Los principales resultados que se recogieron del proceso de distribución se especifican a continuación:

- Número de encuestas enviadas.** Por intermedio de la Cátedra del Agua, se enviaron cerca de 20 encuestas a personas e instituciones que de alguna manera pueden abordar el tema dentro de su actividad: Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional, Departamento de Suelos de la Universidad Nacional, Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional, Universidad Católica de Oriente, Universidad Eafit, Cornare, Corantioquia, Corpourabá, Cenicafé, ISA e Instituto Mi Río.
- Número de encuestas recibidas.** Se recibieron seis encuestas correspondientes al Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional, Eafit, Cornare, Cenicafé y Universidad Católica de Oriente.
- Avance del conocimiento.** De las encuestas recibidas, sólo cuatro de ellas respondieron este punto para el Departamento de Antioquia; otra de ellas lo respondió para el Departamento de Caldas (Cenicafé). De las respuestas para nuestra región, dos instituciones consideran que el tema está poco desarrollado (desarrollo incipiente), una considera un conocimiento avanzado y otra considera el tema en desarrollo; para el Departamento de Caldas, se considera que se encuentra en desarrollo.
- Preocupaciones más importantes.** Para este punto, no sólo se incluyen las preocupaciones identificadas en las encuestas, sino también aquellas planteadas en el Encuentro Regional del Agua del 26 de noviembre de 1997:

- El mal manejo de las cuencas hidrográficas en lo referido al uso de la tierra, convirtiéndolas en zonas de pastoreo, propiciando la destrucción de los bosques naturales y de las reservas de agua en estos ecosistemas.
 - La determinación del consumo de agua de los diferentes tipos de vegetación.
 - El conocimiento de los movimientos del agua en los diferentes tipos de suelo.
 - Conocer el papel vital que cumple el bosque o las demás coberturas vegetales en la regulación del agua.
 - Aporte de sedimentos a los cauces por labores de aprovechamiento forestal.
- e. **Principales vacíos del conocimiento.** Los principales vacíos del conocimiento identificados en la encuesta para el Departamento son:
- Evaluación cualitativa y cuantitativa del funcionamiento hidrológico de coberturas vegetales con especies de coníferas y coberturas latifoliadas en las diferentes etapas de las plantaciones (establecimiento y maduración).
 - Estudios relacionados con el consumo del agua asociado a las tasas de crecimiento de las especies más usadas en plantaciones forestales.
 - Estudios acerca de especies vegetales apropiadas para el manejo de áreas críticas en cuencas hidrográficas.
 - Delimitación correcta de retiros a fuentes hídricas que garanticen al menos rendimientos mínimos de las cuencas.
 - Estudio de la influencia de las coberturas vegetales sobre las condiciones de humedad del suelo.
 - Estudio del movimiento del agua en el suelo y tiempos de transición del agua por el suelo durante el ciclo hidrológico.
 - Diagnóstico de impactos ambientales de efluentes de yacimientos minerales; manejo de lixiviados en rellenos sanitarios y reciclaje o reuso de aguas residuales.
 - Cálculo de las cuentas del agua para el Departamento, mediante la aplicación de un modelo digital que incluya entradas al sistema, transferencias internas y salidas por extracciones primarias para aplicar la Ley 373.

5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.3.1. Temas tratados en los trabajos recopilados

De acuerdo con los resultados de los estudios consultados, no es posible establecer conceptos unánimes con respecto a la influencia de las coberturas vegetales sobre algunos parámetros del ciclo hidrológico y de las propiedades del suelo. Si bien en la mayoría de los estudios se consideran los ecosistemas boscosos como la cobertura que brinda los mejores efectos en cuanto a protección de suelos y regulación de caudales, se tienen opiniones fundamentadas en estudios en otros lugares, en las que se afirma que la reforestación puede disminuir los caudales dado el consumo de agua por parte de los árboles.

Con relación al efecto de las coberturas en los parámetros del ciclo hidrológico, hay resultados que contradicen lo reportado en la literatura. Estas contradicciones se explican en primer lugar por el hecho de que los estudios utilizan diferentes métodos para estimar los parámetros, lo que dificulta las comparaciones; en segundo lugar, existen varios factores que inciden en el comportamiento de un determinado parámetro, bien sea del ciclo hidrológico o del suelo. Entre estos otros factores que no dependen de la especie vegetal en particular, se pueden mencionar los siguientes: la densidad de la plantación, el área basal, la edad, el manejo silvicultural, la presencia de epífitas, la estratificación vertical, la intensidad de la precipitación, la temperatura y otros factores climáticos y geomorfológicos.

Se desarrollaron varios trabajos sobre el grado de protección contra la erosión de distintas coberturas vegetales. Según los resultados obtenidos, algunos estudios concluyen que la mejor protección se presenta en el bosque natural seguido de las plantaciones forestales, pastos y suelo desnudo; otro estudio reportó mayor protección contra la erosión en coberturas boscosas (asociación de pino y roble) comparado con cobertura de cultivo agrícola y rastrojo bajo. Contrario a esto, otro autor afirma que el mayor grado de protección contra la erosión se da en coberturas de poca altura y alta densidad, dada la capacidad de amarre de sus raíces.

Con relación a la recuperación de áreas degradadas, existe un consenso general acerca de los beneficios de las especies leguminosas debido a factores como el gran aporte de materia orgánica, la capacidad de fijación de nitrógeno de las bacterias asociadas a ellas y su buena adaptación a condiciones adversas.

5.3.2. Regiones más estudiadas del Departamento

Según la ubicación de los trabajos incluidos y agrupados en la base de datos, las zonas más estudiadas se presentan en la figura 5.1 anexa.

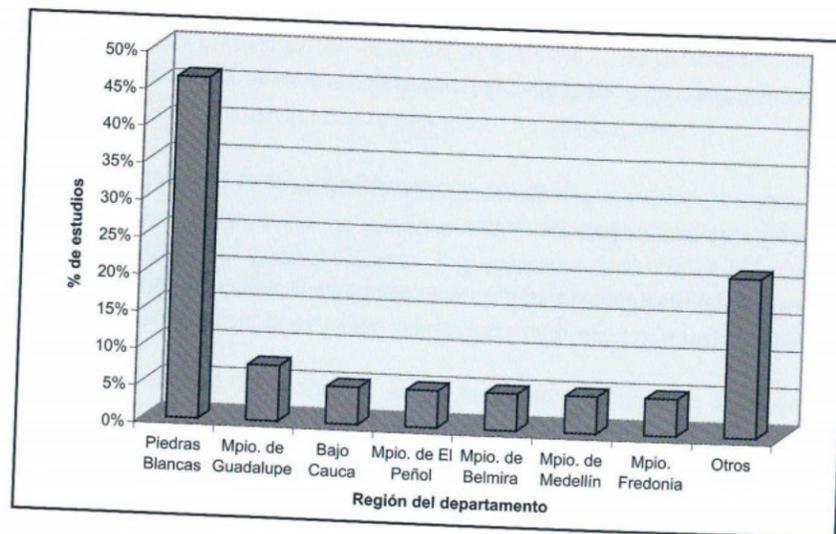


Figura 5.1. Distribución de estudios en el Departamento

5.3.3. Análisis de coberturas vegetales

Las coberturas vegetales que han sido más estudiadas en relación con los suelos y el agua se ilustran en la figura 5.2.

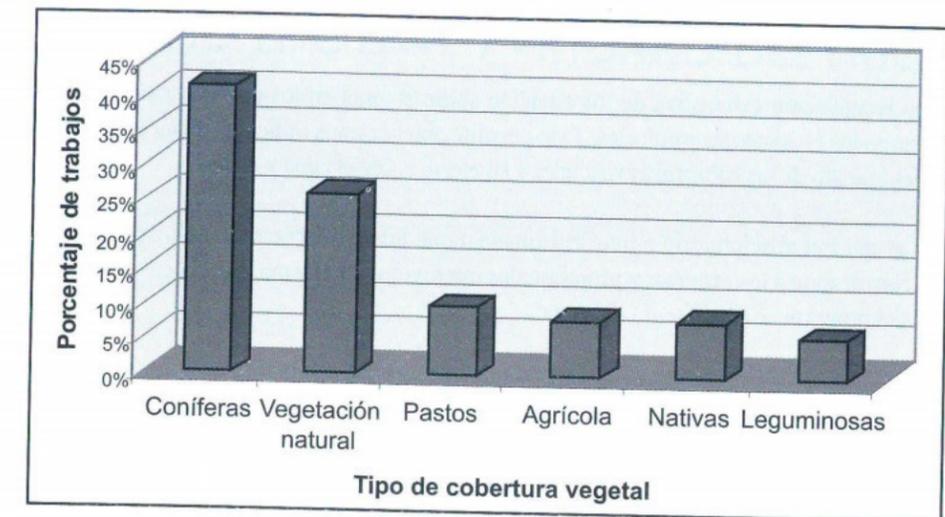


Figura 5.2. Estudios según el tipo de cobertura vegetal

5.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

La mayoría de estudios no abordan el tema integrando los tres componentes suelo, agua y vegetación, sino que lo hacen de manera parcial; es decir, tratan el efecto de distintas coberturas vegetales sobre uno o varios parámetros del ciclo hidrológico o sobre algunas propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo.

No se ha desarrollado el número suficiente de estudios para cubrir el área total del departamento, o al menos áreas y ecosistemas representativos de cada región.

No se tiene clara la incidencia de cada cobertura vegetal específica sobre las condiciones hídricas y edáficas de los terrenos donde están establecidas, dificultando el proceso de selección correcta de la cobertura apropiada para cada área específica.

La mayoría de los trabajos realizados se concentran en coberturas de plantación forestal con especies exóticas (principalmente coníferas), dejando un vacío de conocimiento en el comportamiento de las coberturas de vegetación natural o de plantaciones de especies nativas.

Existe un conocimiento adelantado acerca de la recuperación de áreas degradadas por procesos de minería; los resultados de trabajos desarrollados en varias áreas del Departamento han establecido las especies y procedimientos indicados para hacerlo, aunque es posible adelantar aún más en estas técnicas.

Hasta ahora no se han establecido normas basadas en estudios técnicos para la determinación de áreas de retiro a fuentes hídricas apropiadas para la conservación de los recursos.

Recomendaciones.

Desarrollar una recopilación exhaustiva de información sobre el tema en los ámbitos nacional e internacional, haciendo énfasis en los ecosistemas tropicales. Esto permite obtener unos indicadores para establecer diferencias entre el comportamiento de las coberturas vegetales y su efecto sobre el agua y el suelo.

Conformar un grupo interdisciplinario e interinstitucional que lidere el desarrollo del tema en Antioquia. Esto puede hacerse convocando a los expertos y profesionales interesados en el tema, para la creación de un subcomité técnico dentro del programa de la Cátedra del Agua.

Iniciar estudios que permitan incluir en el proyecto del Mapa Digital de Antioquia información sobre la cobertura vegetal y las condiciones edáficas, de tal manera que se pueda hacer uso de esta herramienta para el análisis integrado de estos tres componentes.

Formular y desarrollar proyectos de investigación de una manera coordinada y sistematizada en los temas específicos, coberturas vegetales y zonas del departamento menos estudiadas.

Establecer microcuencas piloto ubicadas en las distintas zonas de vida del Departamento donde se lleve a cabo un seguimiento de las características hídricas y edáficas durante el desarrollo de las coberturas vegetales, desde las etapas de establecimiento hasta su maduración.

Programar eventos de divulgación y actualización en el tema, tales como foros, seminarios y cursos de extensión en los que se cuente con la participación de expertos nacionales e internacionales.

6. USO EFICIENTE Y AHORRO DEL AGUA

El agua es un elemento fundamental sobre tres aspectos del bienestar humano: la producción de alimentos, la salud y la estabilidad política y social. La gestión del recurso deberá tender a evitar situaciones conflictivas debidas a escasez, sobreexplotación y contaminación, mediante medidas preventivas que procuren un uso racional y de conservación.

La conceptualización de la conservación del recurso agua debe entenderse como un proceso que cruza a varios sectores, por lo que las estrategias de gestión deben considerar varios factores: económico, social, biológico, político, entre otros.

El documento de actualización del macroproyecto eje prioritario 'Uso Eficiente y Ahorro del Agua' pretende determinar la situación actual de la demanda de agua en el departamento y cuantificar sus principales usos, evaluar las tecnologías y políticas enfocadas en los factores anteriormente mencionados, así como determinar los vacíos de información y las acciones necesarias para superarlos.

Como objetivos específicos se tienen: (a) determinar los índices de consumo aproximados para los sectores doméstico, industrial y agropecuario en el Departamento, para compararlos con datos internacionales; (b) determinar las tecnologías para ahorro y reuso de agua aplicables en la región; (c) evaluar posibles potenciales de ahorro, basados principalmente en las características del entorno; y, (d) plantear algunos parámetros de acción para la gestión y uso sustentable del agua en Antioquia.

6.1. DEMANDA DE AGUA EN EL DEPARTAMENTO

En el desarrollo del proyecto se investigó sobre los distintos consumos del recurso dados en el ámbito global y local con el fin de darle cumplimiento a uno de los objetivos establecidos al inicio del trabajo. La metodología implementada consistió básicamente en el levantamiento de información secundaria, principalmente la disponible en centros gubernamentales como el Anuario Estadístico de Antioquia, o en entidades relacionadas con el manejo de recursos naturales como las Corporaciones Autónomas Regionales, el IDEAM y las empresas prestadoras de servicios públicos. En cuanto a los índices internacionales se buscó información en Internet, bibliotecas y centros de documentación para ser clasificada de acuerdo con los requerimientos del estudio de ahorro y uso eficiente del agua.

Para obtener mayor claridad en los niveles de demanda se dividió la utilización del recurso en cuatro sectores: doméstico, industrial, agropecuario y generación hidroeléctrica, los cuales agrupan la gran mayoría de usuarios del agua, haciendo énfasis en los más representativos para nuestra región. A continuación se presenta la definición de cada uno de estos sectores donde se indica la forma como han sido abordados para el desarrollo del estudio:

- *Sector doméstico:* se evaluaron los niveles de consumo residencial de la población (necesidades básicas de alimentación e instalaciones hidrosanitarias) y se incluyeron hospitales, centros comerciales, hoteles, restaurantes, aeropuertos, cárceles y demás entidades que ofrecen servicios a la comunidad.
- *Sector industrial:* consumo de todos los establecimientos que realizan algún tipo de transformación de materias primas.
- *Sector agropecuario:* todas las actividades de campo relacionadas con la agricultura y la explotación pecuaria; este sector es bastante representativo para el Departamento por la misma variedad climática de la región (permite numerosos desarrollos agropecuarios) y porque el recurso hídrico constituye un elemento fundamental para su desempeño.
- *Generación Hidroeléctrica:* representa un importante renglón en la economía del Departamento, además de que la demanda de agua es considerable. Es importante aclarar que, a pesar de que el proceso de generación eléctrica no implica ningún cambio físico ni químico del recurso, causa un evidente cambio en la disponibilidad.

En la figura 6.1 se presentan los porcentajes en los sectores industrial, generación hidroeléctrica, agropecuario y domiciliario. Se estimó una demanda aproximada para el departamento de **12.730 millones de metros cúbicos anuales** aproximadamente (valor estimado a partir de fuentes secundarias y primarias). En Antioquia se utiliza el 85,8% de la demanda de agua para la generación de energía eléctrica y sólo el 0,7% es utilizado por el sector industrial. Lo anterior concuerda con dos hechos fundamentales: en primer lugar, según el Diagnóstico Energético de Antioquia (Botero, 2000), el Departamento produce el 30% de la energía eléctrica de todo el país (en Colombia se consumen anualmente 40.000 GWh/año aproximadamente); en segundo lugar, la concentración industrial está ubicada principalmente en el Área Metropolitana y en algunas poblaciones del Oriente Antioqueño, el resto del Departamento se caracteriza por actividades agropecuarias o mineras. Otro dato importante es la participación del 1,7% del sector domiciliario en la demanda total, valor congruente con el 5% que plantea el IDEAM en las memorias del 'Seminario de Servicios Públicos Domiciliarios, Tratamiento de Aguas y Oportunidades de Negocios' (Sociedad de Ingenieros Químicos UPB y Empresas Públicas de Medellín, 1998). En este trabajo se plantea que un 68% del recurso hídrico es utilizado en el país para el consumo agropecuario, valor que no concuerda con el 11,8% que se encontró para la región en el año 2000 según los datos obtenidos por el Grupo de Investigaciones Ambientales de la UPB y la Cátedra del Agua.

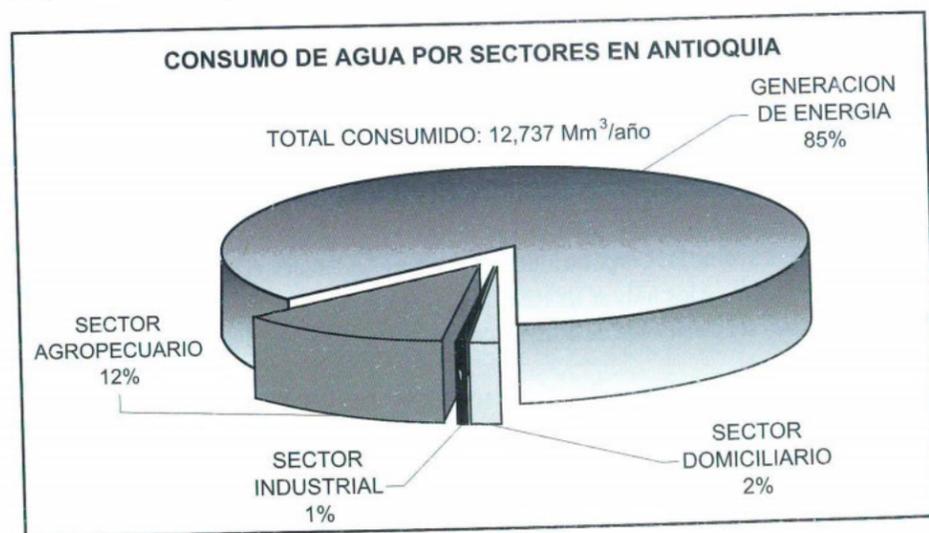


Figura 6.1. Consumo de agua por sectores en Antioquia

El documento de actualización presenta además una tabla comparativa de los porcentajes y las demandas de agua en el mundo, pero por razones de espacio no se presenta en este informe consolidado.

6.1.1. Sector doméstico y terciario

Dentro de este sector se reconocen dos grupos de consumidores: el subsector residencial, dentro del cual se incluye el uso del agua en asentamientos urbanos y rurales requerido para satisfacer las necesidades básicas de los individuos; y el subsector terciario y de servicios donde se incluyen las entidades que ofrecen un servicio a la comunidad tales como hospitales, instituciones educativas (colegios, escuelas, universidades), hoteles, centros comerciales, aeropuertos, restaurantes, cárceles, entre otras.

Hay dos aspectos a resaltar en este sector: (a) la calidad del recurso exigida por los usuarios (o potabilidad), por el hecho de que gran porcentaje del agua utilizada es destinada al consumo humano; y, (b) la certeza de las magnitudes utilizadas, debido a la constante medición de consumos por parte de las entidades encargadas de la prestación de servicios a usuarios, a fin de recuperar su valor económico.

Metodología. Para determinar la demanda de agua en el sector residencial, se recurrió a fuentes como el Anuario Estadístico de Antioquia, al Departamento de Estadística de la Gobernación, a algunas Empresas Prestadoras del Servicio Público, y al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. En esta parte no se utilizó ningún modelo de cálculo, ya que toda la información estaba en las fuentes citadas anteriormente y no se requirió inferir ningún dato.

Demanda de agua en el sector residencial. El sector residencial en Antioquia utilizó **175 millones de metros cúbicos** en el año 2000, valor que equivale al 1,4% de toda la demanda de agua del Departamento. En la tabla 6.1 se presentan los valores respectivos en cada una de las sub-regiones, de las cuales cabe resaltar que en el Valle de Aburrá se utiliza el 76,4% del agua demandada para uso residencial, siguiendo en orden descendente el Oriente Antioqueño (7,7%) y los municipios del Nordeste (3%). Este valor en el Valle de Aburrá es alto si se tiene en cuenta que el DANE ha estimado que en el Área Metropolitana de Medellín se ubica el 55 % de la población de Antioquia, la cual está consumiendo más del 75% de agua para uso doméstico (datos suministrados por el Departamento de Estadística de la Gobernación de Antioquia).

Tabla 6.1. Demanda de agua en el sector residencial para el Departamento de Antioquia

	DEMANDA RESIDENCIAL (ESTRATO) en miles m ³ /año						SUB-TOTAL ¹	%
	1	2	3	4	5	6		
VALLE DE ABURRA (2)	8.408,4	43.719,5	49.362,9	14.372,1	11.650,0	6.332,4	133.845,3	76,4%
BAJO CAUCA	812,9	1.294,8	395,7	33,8	0,7	-	4.531,9	2,6%
MAGDALENA MEDIO	693,2	737,6	292,8	35,5	1,0	-	2.757,9	1,6%
NORDESTE	321,5	1.075,5	1.078,7	18,8	-	-	5.264,4	3,0%
NORTE	69,3	840,6	423,7	54,7	-	-	5.007,4	2,9%
OCCIDENTE	264,3	530,2	726,5	48,9	30,0	-	1.600,0	0,9%
ORIENTE	87,0	2.108,4	3.976,8	400,0	209,7	-	13.471,9	7,7%
SUROESTE	671,5	1.847,3	2.335,8	183,7	53,9	7,1	5.099,2	2,9%
URABÁ	414,0	1.026,5	1.773,9	385,6	8,6	-	3.608,5	2,1%
TOTAL DPTO.	11.742,0	53.180,2	60.366,7	15.533,1	11.954,0	6.339,5	175.186,5	100,0%

¹ El valor total no coincide con los parciales, porque algunos municipios no especifican el consumo por tipo de servicio y estrato. Fuente: Departamento de Estadística de la Gobernación de Antioquia, e IDEAM.

Conocer el estado de la demanda para los estratos económicos es importante para seleccionar las prioridades de capacitación en una eventual campaña de educación sobre ahorro y uso eficiente del recurso hídrico. En la figura 6.2 se presenta el uso que hacen del agua los diferentes estratos socioeconómicos: se puede observar claramente que el estrato 3 demanda el 38%, seguido por el estrato 2 con un 33%. Basados en los datos anteriores y el valor del porcentaje de participación del Área Metropolitana presentado en la tabla 6.1, se concluye que en los estratos 2 y 3 del Valle de Aburrá se utiliza el 54% del recurso hídrico destinado para fines domésticos; es decir, alrededor de 95 millones de metros cúbicos anuales.

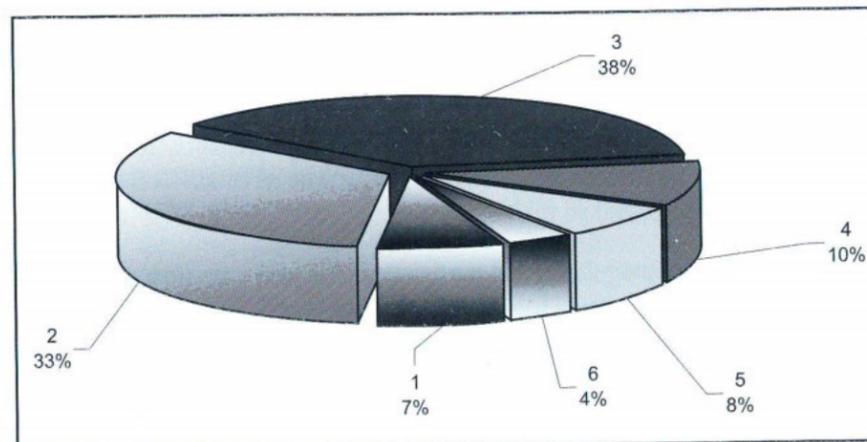


Figura 6.2. Porcentaje de utilización por estrato del agua de uso residencial.
Fuente: Anuario Estadístico de Antioquia, 1999.

Demanda de agua en el sector terciario y de servicios. Este sector utilizó **36,6 millones de metros cúbicos** en el año 2000, valor equivalente al 0,3% de toda la demanda de agua del Departamento. En la tabla 6.2 se presentan los valores respectivos en cada una de las subregiones del Departamento: en el Valle de Aburrá se utiliza el 84,6% del agua demandada para uso del sector terciario y de servicios, siguiendo en orden descendente el Oriente y el Bajo Cauca Antioqueño con (3,3%), y las otras subregiones en un rango entre (1,9 y 0,7 %).

Tabla 6.2. Demanda de agua en el sector terciario y de servicios para el año 2000 en el Departamento de Antioquia

SUBREGIONES	COMERCIAL	SERVICIOS	TOTAL	%
	miles m /año	miles m /año	miles m /año	Particip.
VALLE DE ABURRA	14.530,3	16.445,4	30.975,6	84,6%
BAJO CAUCA	1.068,4	154,1	1.222,5	3,3%
MAGDALENA MEDIO	198,7	213,4	412,1	1,1%
NORDESTE	139,6	119,0	258,6	0,7%
NORTE	270,8	181,1	451,9	1,2%
OCCIDENTE	153,5	147,0	300,5	0,8%
ORIENTE	770,0	440,8	1.210,8	3,3%
SUROESTE	505,9	593,0	1.098,9	3,0%
URABA	427,7	267,6	695,3	1,9%
TOTAL DPTO.	18.065,0	18.561,4	36.626,4	100,0%

Fuente: Departamento de Estadística de la Gobernación de Antioquia.

6.1.2. Sector agropecuario

Aunque en el ámbito global el sector agropecuario generalmente presenta los mayores consumos (superado en ocasiones por consumos industriales, en particular en países en los cuales la industria es altamente desarrollada), en el Departamento de Antioquia la producción hidroeléctrica sumada a la industrial demandan el mayor porcentaje del recurso normalmente empleado, dejando en un segundo lugar las actividades agropecuarias consideradas.

El mayor consumo del recurso hídrico en este sector a nivel internacional está asociado al regadío de cultivos. Las condiciones geográficas, favorecidas por las condiciones de humedad del suelo y los altos niveles de precipitación del Departamento posibilitan la producción agrícola sin distritos importantes de riego y disminuyen los gastos característicos de la actividad. No obstante la explotación agrícola tiene gran demanda del recurso para satisfacer las condiciones de productividad y mantener amplios volúmenes de producción como los dados en la región.

Un segundo aspecto es el gasto asociado a la explotación pecuaria. El aprovechamiento de las distintas razas animales con el fin de satisfacer necesidades alimenticias y de productos varios de origen animal, requiere de volúmenes importantes de agua. El consumo pecuario está relacionado con la alimentación y el aseo de los animales, y los requerimientos para el mantenimiento de infraestructura.

A diferencia del sector domiciliario, donde se tiene un control intenso sobre los niveles de consumo, el sector agropecuario no presenta las mismas facilidades de contabilización de los gastos: la gran mayoría de usuarios no poseen algún tipo de medición, que finalmente permitiría la estimación del total del recurso invertido en sus actividades.

Metodología. Para el levantamiento de los datos sobre la demanda de agua en el sector agropecuario en Antioquia se buscó información en la Secretaría de Agricultura, las Corporaciones Autónomas Regionales y los centros de documentación (información secundaria).

Modelo de cálculo. Para determinar el consumo de agua por hectárea sembrada en el Departamento se utilizaron los valores sobre necesidades de agua de los cultivos más representativos, multiplicando este consumo unitario por la producción total reportada. En el documento de actualización se presenta, de manera más extensa, la metodología de cálculo.

Sector agrícola. Cada producto agrícola requiere de cierta cantidad de agua desde su plantación hasta su consumo o comercialización. En muchos de los casos esta agua se obtiene por precipitación, conducción por gravedad o sistemas de riego. Según el IDEAM, Antioquia es un Departamento rico en lluvias, lo cual genera que el riego se presente en porcentajes inferiores a un 10%. En la tabla 6.3 se presentan los productos más representativos en el Departamento (89% de toda la producción agrícola inscrita en la Secretaría de Agricultura).

Los principales productos como el banano, el plátano y el café, tienen los consumos más elevados. El banano y el plátano principalmente por sus altos niveles de producción, aunque su consumo individual (375 m³/ton) sea bajo dentro del grupo de productos. El café, por el contrario, presenta niveles de producción más bajos que el banano y el plátano, pero evidencia altos requerimientos de agua para su desarrollo vegetativo (2.500 m³/ton).

Existen otros productos influyentes en el desarrollo agrario por ser de típico consumo en nuestra región: el frijol, la caña, el maíz, el chócolo y el arroz; la producción de dichos productos hace que su producción exija una cantidad importante de recurso hídrico.

Tabla 6.3. Consumo de agua de los principales productos agrícolas de Antioquia

Cultivo	Ton ¹	m ³ /ton ²	Consumo total ² de agua (Mm ³ /año)	%
Aguacate	5852,5	92	0,53	0.04%
Arracacha	1920	1005	1,93	0.13%
Arroz	38251,6	570,6	21,82	1.50%
Arveja	1100	1005	1,11	0.08%
Badea y granadilla	253	218	0,055	0.00%
Banano	1225591	375	459,6	31.64%
Café	99416,7	2500	248,54	17.11%
Caña de azúcar	142975,7	620	88,64	6.10%
Chócolo	39724	1200	47,67	3.28%
Frijol	29346,5	1005	29,5	2.03%
Habichuela	1976	1005	1,98	0.14%
Maíz	57624	1700	97,96	6.74%
Mango	23052,6	153,8	3,55	0.24%
Maracuyá	3025	400	1,21	0.08%
Mora	4987	115,4	0,58	0.04%
Papa	243121	619	150,50	10.36%
Piña	502,4	69,2	0,035	0.00%
Plátano	337429,4	375	126,53	8.71%
Repollo	89600	1005	90,05	6.20%
Tomate	15422,1	1005	15,50	1.07%
Zanahoria	64800	1005	65,12	4.48%
Total	2.426.011		1.452,0	100%

Fuente: 1: Revista de Economía de Antioquia. Aspectos de Coyuntura. Pág. 30.
2: Grupo de Investigaciones Ambientales UPB. Cátedra del Agua.

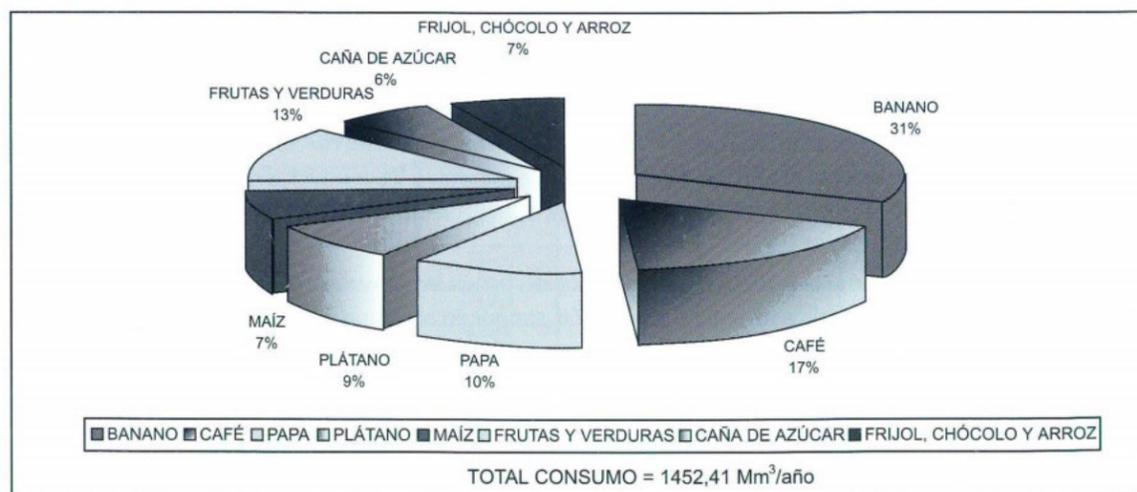


Figura 6.3. Participación de cultivos en el consumo de agua en el agro Antioqueño

Los datos de producción y los de consumo unitarios fueron obtenidos del Anuario Estadístico de Antioquia y de la base estadística del IDEAM. El total del agua demandada en el año 2000 por el sector agrícola asciende a 1452 Mm³/año, convirtiéndose en el segundo sector consumidor de agua del Departamento de los sectores analizados.

Sector pecuario. En la figura 6.4 se presentan los porcentajes de consumo de agua por cada especie animal. El sector bovino, uno de los más importantes de la economía antioqueña, se identifica como gran consumidor de agua: aproximadamente 2/3 partes del total consumido por todas las especies (69%).

La obtención de estos resultados fue posible gracias a la recopilación del número total de especies animales disponible en el Anuario Estadístico de Antioquia y los índices de consumo por especie del Water Encyclopedia. Cabe anotar que en cada especie se asumió un índice promedio de consumo a partir de los índices de cría, levante y engorde.

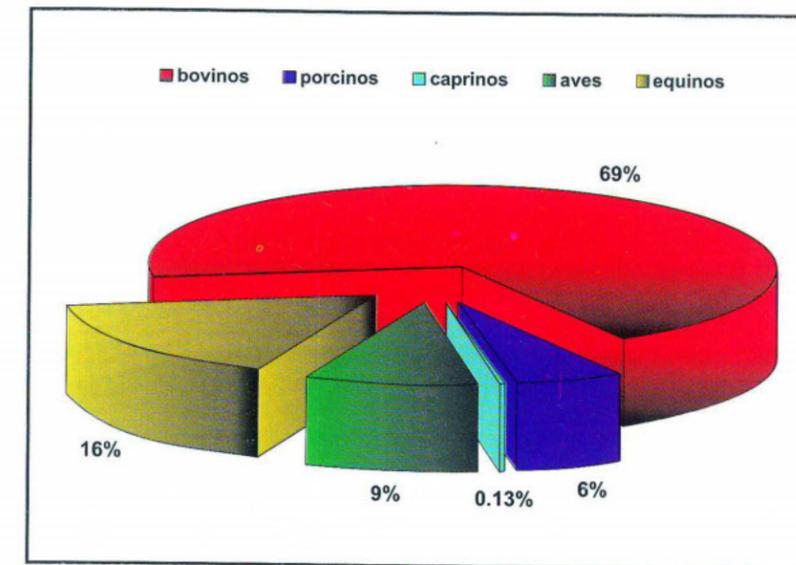


Figura 6.4. Participación del sector pecuario en el consumo de agua del Departamento de Antioquia. Distribución porcentual del consumo de agua por especie animal.

6.1.3. Sector hidroeléctrico

El sector hidroeléctrico puede ser considerado como uno de los sectores más importantes para el análisis de la demanda de agua del Departamento. En Antioquia, las hidroeléctricas representan una de las mayores fuentes de energía primaria de la región (47,3% de participación en el año 1998 frente a 28,4% a partir del petróleo, 15,3% carbón, 8,2% combustible tradicional y 0.8% gas natural; Fuente: Diagnóstico Energético de Antioquia. Plan Estratégico de Antioquia 2000), la generación afecta considerablemente la disponibilidad del recurso por los grandes volúmenes de agua requeridos.

Metodología. Se solicitaron telefónicamente los datos de caudal y potencia generada en dos centrales hidroeléctricas. Se utilizaron los sitios Web de las empresas generadoras para recolectar los registros de caudal, altura de generación y potencia instalada con el objetivo de determinar el índice promedio de consumo de agua por kWh. Se consultó en varios anuarios estadísticos del Departamento la generación de energía desde el año 1994, con el fin de determinar la demanda de agua y su comportamiento en el tiempo.

Modelo de cálculo. En el documento de actualización se presenta el cálculo del Índice de Consumo Industrial Unitario [m³/kWh] (función de la eficiencia, el número promedio de horas al día, el caudal de diseño y la energía firme) para 12 hidroeléctricas importantes del Departamento de Antioquia. A partir de este parámetro y la energía realmente producida (en Anuario Estadístico de Antioquia) se calcula el consumo de agua por la actividad.

Demanda de agua. Se ha estimado que en el año 2000 se utilizaron en Antioquia **10.930 millones de metros cúbicos** de agua para generación de hidroenergía, lo cual representa el 85,8% de toda la demanda de agua del Departamento.

En la figura 6.5 se presenta, en porcentaje, la energía eléctrica consumida por sectores en Antioquia. El sector residencial es el mayor consumidor de energía (47%) seguido, en su orden, por los sectores industrial, comercial y otros, con 37%, 12% y 7%, respectivamente. Estos valores son el punto de partida para determinar los impactos de ahorrar energía en la disponibilidad del recurso hídrico. Por ejemplo, si se considera una disminución del 10% del consumo de energía, el aporte del sector residencial al impacto en la disponibilidad del recurso hídrico sería aproximadamente de 250 millones de metros cúbicos, mientras que en el sector comercial la misma disminución causaría un ahorro de 64 millones de metros cúbicos anuales.

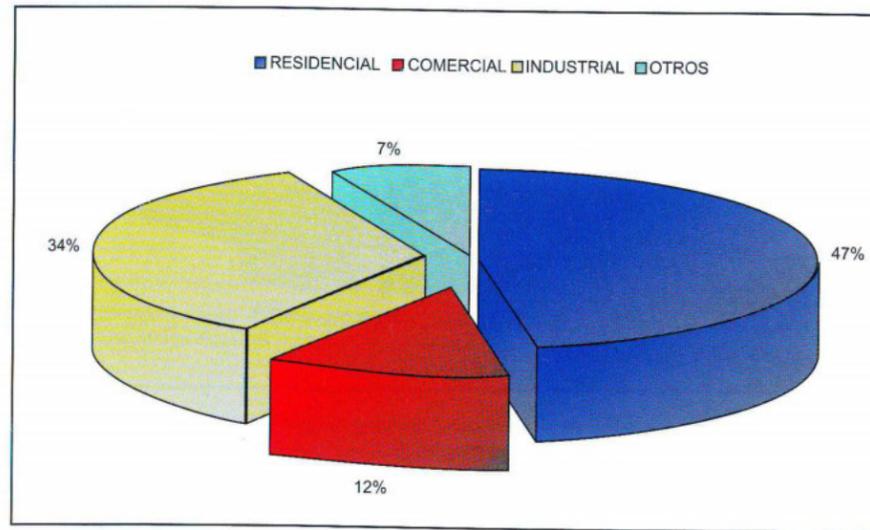


Figura 6.5. Energía eléctrica consumida por sectores en el Departamento de Antioquia

Según el diagnóstico energético de Antioquia, el Departamento estaría en capacidad de duplicar la producción de energía primaria por medio de la construcción de grandes proyectos hidroeléctricos y el incremento en la producción de carbón con la construcción de una central termoeléctrica con capacidad de 300 MW en la región Suroeste. Si se llevan a cabo los proyectos hidroeléctricos Pescadero-Ituango, Cañafisto, Porce III, Nechí y Riachón, la demanda de agua para la producción de energía hidroeléctrica se podría incrementar en un 50%.

6.1.4. Sector industrial

Para el análisis del sector industrial, se identificaron 9 subsectores: (1) alimentos y bebidas, (2) textil, confecciones, cuero y calzado, (3) papel, madera y sus productos, (4) productos y sustancias químicas, (5) cerámica y vítreos, (6) metalmecánica y metalúrgica, (7) plásticos y caucho, (8) equipos y material de transporte, y (9) otras industrias manufactureras.

Metodología. Se recurrió al Anuario Estadístico de Antioquia, al Departamento de Estadística de la Gobernación, a algunas Empresas Prestadoras de Servicios Públicos, y al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. En esta parte del trabajo no se utilizó modelo de cálculo, ya que toda la información estaba en las fuentes citadas anteriormente y no se requirió inferir datos.

Demanda industrial. La demanda medida del sector industrial en el Departamento de Antioquia asciende a **86 millones de metros cúbicos**, contando con los valores que manejan los Acueductos Municipales y algunos datos de captación en fuentes superficiales y pozos de algunas Autoridades Ambientales.

En la tabla 6.4 se presenta los valores de la demanda de agua para uso industrial en cada una de las sub-regiones del Departamento. Según la información obtenida, el Valle de Aburrá utiliza el 99,7% del agua demandada para uso industrial; este valor evidencia la deficiencia en la medición de las captaciones de fuentes de agua de la región en zonas fuera del Área Metropolitana. Se detectaron además problemas en la recolección de la información y en el historial de registros, la gran mayoría de los cuales no están sistematizados.

Tabla 6.4. Demanda de agua en el sector industrial para el Departamento de Antioquia

SUBREGIONES	INDUSTRIAL	MERCED	TOTAL	% Partic.
	miles m /año	miles m /año	miles m /año	
VALLE DE ABURRA	12.957,6	73.227,0	86.184,6	99,7%
BAJO CAUCA	0,0	0,0	0,0	0,0%
MAGDALENA MEDIO	5,2	0,0	5,2	0,1%
NORDESTE	0,0	0,0	0,0	0,0%
NORTE	72,5	0,0	72,5	0,1%
OCCIDENTE	0,0	0,0	0,0	0,0%
ORIENTE	54,6	0,0	54,6	0,1%
SUROESTE	23,1	0,0	23,1	0,0%
URABA	0,4	0,0	0,4	0,0%
TOTAL DPTO.	13.113,4	73.227,0	86.340,4	100,0%

Fuente: Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Departamento de Estadística de la Gobernación.

6.2. ÍNDICES DE CONSUMO

Para el caso específico del uso sostenible del agua en Antioquia, se utilizó la relación entre los parámetros de consumo de agua (unidades de volumen de uso) y las unidades de producción de los procesos en los cuales se utilizan estos volúmenes. Estas cifras son útiles para realizar una comparación entre el estado de utilización de agua en el Departamento y el estado del consumo a nivel internacional. Dentro del estudio se trató principalmente con los índices de consumo por unidad de producción o utilización, los cuales dejan ver la cantidad de recurso empleado para el desarrollo de una determinada actividad; en algunas ocasiones se emplean los índices de productividad, que permiten visualizar como los consumos de producción repercuten sobre el desarrollo económico del Departamento.

6.2.1. Sector doméstico

Índices de Consumo Residencial. En la figura 6.6 se presentan los índices de consumo por usuario por mes para varias ciudades americanas. El valor de 17,8 m³/usuario/mes para el Área Metropolitana de Medellín, corresponde al 37% del índice de Estados Unidos.

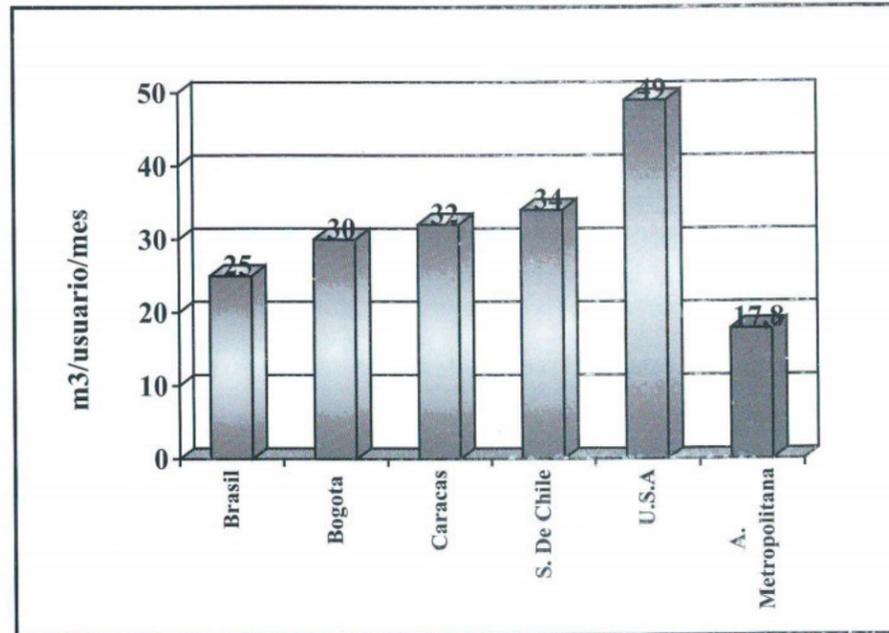


Figura 6.6. Índices de consumo por usuario por mes en varias ciudades americanas

En la figura 6.7 se presentan los índices de consumo per-cápita para todos los municipios ubicados en el Valle de Aburrá; Medellín se encuentra un 13% por encima del promedio del Área Metropolitana (70.5 m³/persona/año). Los datos mostrados tienen en cuenta tanto el consumo residencial como el industrial de cada municipio; como resultado, la demanda por persona por año se incrementa.

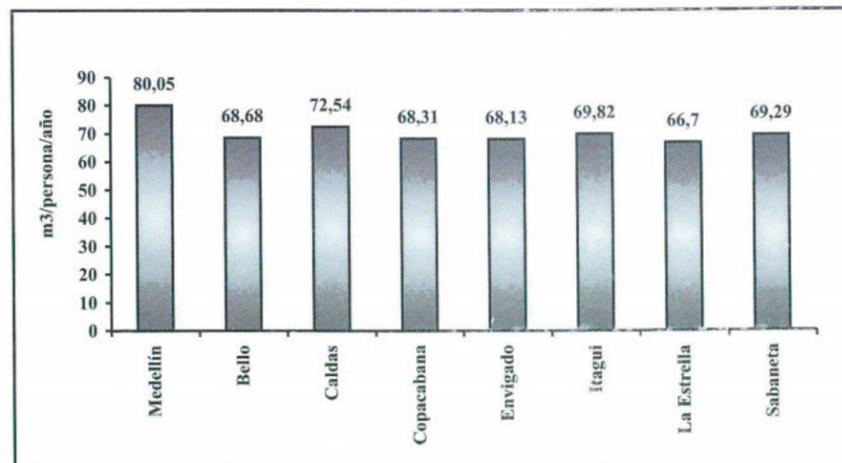


Figura 6.7. Índices de consumo por persona al año en el Área Metropolitana

Los datos de la evolución del índice de consumo por usuario en el Área Metropolitana presentados en la figura 6.8 se constituyen en una fuente de evaluación del uso racional y eficiente del agua: se muestra una reducción en los consumos desde el año 1985 hasta el 2000. Estos ahorros son tan importantes que es posible afirmar que por ejemplo, que para el estrato 2, que la reducción del consumo de agua entre los años descritos es del 36%. El estrato 6 también muestra tal tendencia, pasando de consumir 51,4 m³/usuario/mes en 1985 a consumir 28 m³/usuario/mes. En términos generales, en todos los estratos sociales del Departamento se han reducido los índices de consumo por usuario entre un 36 y un 47% en los últimos 15 años.

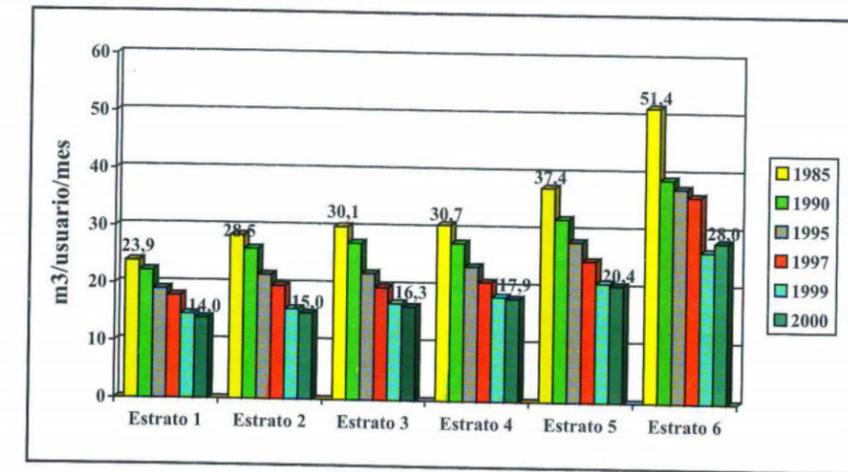


Figura 6.8. Evolución del índice de consumo por usuario en el Área Metropolitana por estrato. Fuente: Empresas Públicas de Medellín.

Aspectos como la implementación de políticas y normas de ahorro del agua, el aumento de las tecnologías para la reducción de consumos y la misma concientización de la sociedad, han tenido influencias en los consumos finales del recurso.

En la figura 6.9 se muestran los consumos de agua de algunos municipios antioqueños por fuera del Área Metropolitana.

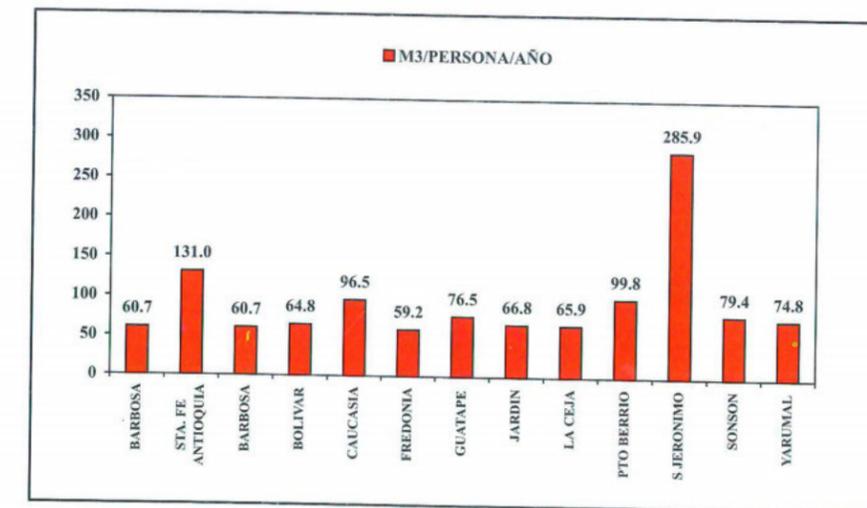


Figura 6.9. Índices de consumo por persona al año en algunos municipios de Antioquia

Se puede afirmar que el consumo es, en la mayoría de las veces, caracterizado por factores como la cultura, el clima, la actividad económica, la actividad turística, entre otros. Para el caso del Oriente Antioqueño, el comportamiento del consumo es 'normal' comparado con el Valle de Aburrá; pero existen casos como los municipios de San Jerónimo y Santa Fe de Antioquia, localizados en el occidente del Departamento, en donde el comportamiento del consumo de agua es elevado, llegando a estar un 193% por encima de la media. En caso de requerirse los consumos per-cápita en cada uno de los municipios antioqueños, se sugiere consultar directamente el documento de actualización.

En la figura 6.10 se presenta una comparación entre los índices de consumo a nivel local e internacional de algunas entidades de servicio. Es importante resaltar que en nuestro medio las entidades educativas tienen un consumo menor respecto al nivel internacional: en los colegios se presenta un consumo 10% menor y en las universidades esta diferencia alcanza hasta el 30% de diferencia de consumo. Es claro que nuestros centros educativos no ofrecen algunas comodidades como en otras latitudes, donde los estudiantes reciben alimentación en las instituciones, y se hospedan y asean al interior de los planteles, además de la completa infraestructura de laboratorios o lugares de apoyo académico cuya operación exige la utilización del recurso con mayor capacidad.

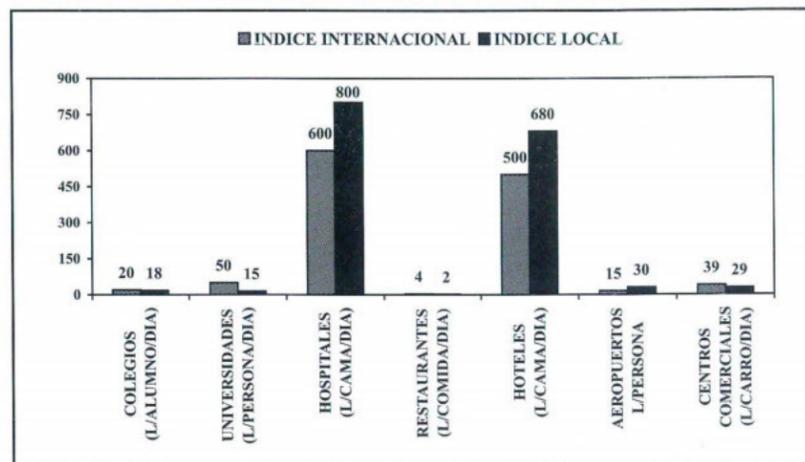


Figura 6.10. Índices de consumo en algunas entidades de servicio

En cuanto a los hoteles, se observa el caso contrario: en el Departamento de Antioquia, la actividad hotelera consume un 26% más que en el ámbito internacional. Las comodidades ofrecidas por los hoteles vinculan al recurso hídrico como elemento importante; este punto se puede minimizar con la implementación de tecnologías de uso eficiente del agua. En el momento de la obtención de los datos, el GIA pudo conocer que el gremio hotelero tiene conocimiento de estos instrumentos de consumo óptimo, pero la aplicación avanza lentamente debido a los costos de los implementos ofrecidos.

Los hospitales reflejan un comportamiento similar: la infraestructura local registra un consumo 25% más alto que los parámetros internacionales, manifestado en una diferencia de 200 litros por cama utilizada en un día.

6.2.2. Sector agropecuario

En la figura 6.11 se presentan los índices de consumo de los productos agrarios explotados en el Departamento de Antioquia. Para su obtención se requirieron las exigencias de agua de cada especie, obtenidas en la Revista Económica de Antioquia Volumen 49 y el rendimiento de cada hectárea de cultivo especificada por el IDEAM.

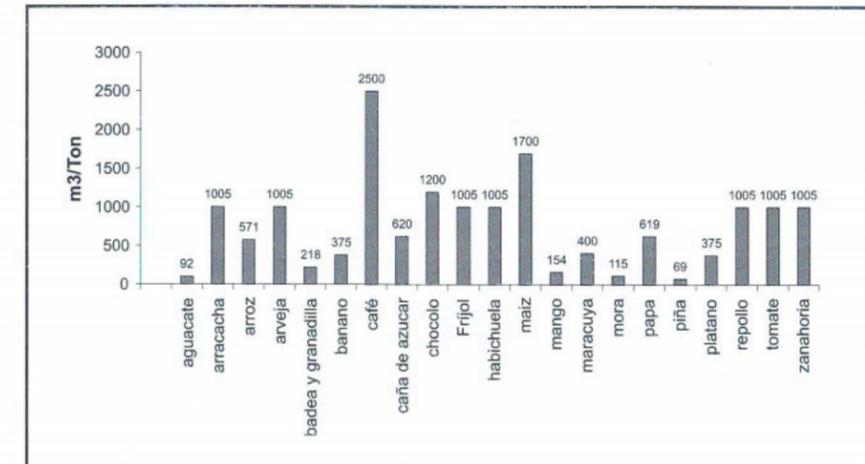


Figura 6.11. Índice de consumo de agua por cultivo en Antioquia.

El promedio de consumo es 763 m³/ton; algunos productos de gran importancia para la región como el plátano, el banano, la papa y la caña, se sitúan por debajo de éste, pero sus altos volúmenes de producción inciden mucho en el incremento de la demanda.

6.2.3. Sector industrial

En la figura 6.12 se ilustran las diferencias de consumo presentadas en el desarrollo de las actividades industriales de nuestra región con relación con las prácticas internacionales. En la gráfica sobresale un índice fundamental para el desarrollo de la economía antioqueña: el sector textil, que presenta un desfase del 41% con respecto al dato global. Falta de tecnología? Los procesos son ineficientes? Se presenta derroche? Se deben tomar medidas para mejorar el consumo en este sector.

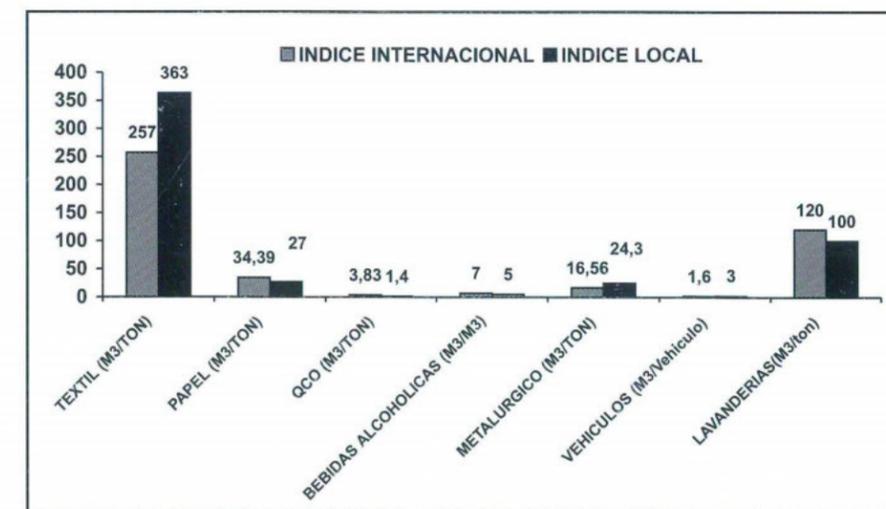


Figura 6.12. Algunos índices de consumo industriales.

El documento de actualización presenta los diagramas de proceso y análisis de consumo para los siguientes sectores considerados: (1) **alimentos y bebidas** (considerando la producción de harina de trigo y de maíz; condimentos y saborizantes; concentrados para animales; panadería, galletería y repostería; y pulpa de frutas, conservas, mermeladas y legumbres enlatadas), (2) **textiles, confecciones, cuero y calzado** (curtiembres; tintorerías y lavado de telas; fabricación de calzado y marroquinería; y fabricación de telas a partir de hilados), (3) **papel, cartón e imprentas** (fabricación de pulpa de papel y cartón papel; y fabricación de artículos impresos), (4) **productos químicos y caucho** (fabricación de productos farmacéuticos y medicamentos; fabricación de diversos productos químicos base para la industria; reencauchado de llantas; y fabricación de productos plásticos), (5) **barro, vidrio y minerales** (fabricación de material abrasivo; pulverización de minerales no metálicos; fabricación de productos de arcilla para la construcción; y fabricación de productos minerales no metálicos), (6) **metalúrgico y metalmecánico** (industrias de fundición de metales ferrosos y no ferrosos; y galvanotécnica), (7) **maquinaria** (operaciones básicas de maquinado; y acabado en pintura).

6.3. PRODUCTIVIDAD ECONOMICA DE AGUA EN EL DEPARTAMENTO

La productividad económica del agua se define como el valor aportado al PIB por cada metro cúbico utilizado en el desarrollo de las distintas actividades. Habitualmente se expresa en $\$/m^3$ y su comportamiento ideal es ascendente en el tiempo. El índice de productividad permite determinar, desde el punto de vista económico, el uso del agua para incrementar el PIB del Departamento; en él se puede apreciar que la utilización del recurso implica un desarrollo para los sectores.

En 1998 la productividad del agua calculada a pesos constantes de 1975 alcanza su máximo valor ($22,7 \$/m^3$), luego de una tendencia ascendente desde el año 1994 donde apenas se situaba en $14 \$/m^3$, lo cual indica un crecimiento alrededor del 38%. Luego del 98 se visualiza una tendencia descendente representada en una disminución del 10% en la productividad. Este comportamiento se ve ilustrado en la figura 6.13.

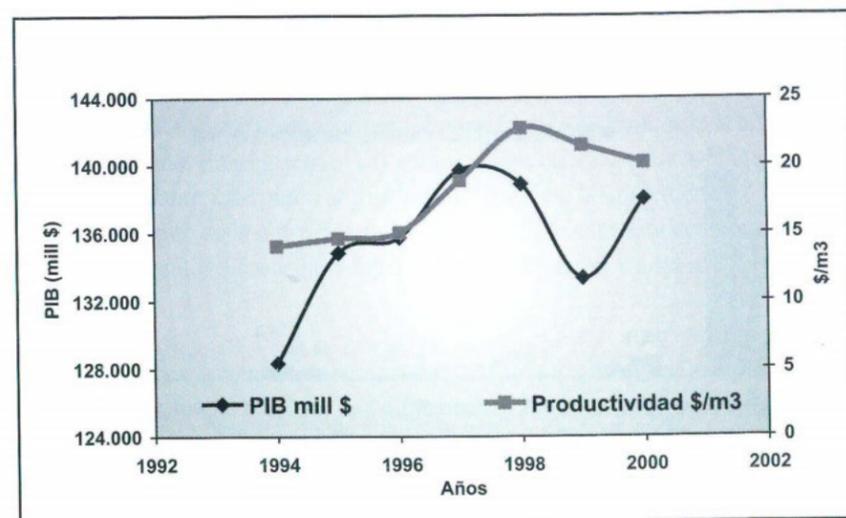


Figura 6.13. Productividad del agua en el Departamento de Antioquia

6.4. TECNOLOGÍAS DE AHORRO Y USO EFICIENTE

El capítulo 'Tecnologías de Ahorro y Uso Eficiente' del documento de actualización del estado del arte aborda las distintas soluciones tecnológicas con las cuales se obtiene una disminución en el consumo del recurso hídrico. El avance en los estudios de los distintos procesos y las actividades en donde el uso del agua ha sido de gran importancia, ha arrojado resultados en cuanto a dispositivos y sistemas de control y actuación con los cuales se obtiene un ahorro en el empleo del recurso y un consumo de mayor eficiencia. La innovación en los equipos y procedimientos para el gasto del recurso hídrico ha tenido un amplio progreso dentro de cada uno de los sectores analizados (industrial, doméstico, agropecuario y energético).

Es importante llevar a cabo un análisis exhaustivo de las tecnologías de ahorro y uso eficiente del agua ya que contribuyen a la búsqueda de medios para alcanzar el uso sostenible del recurso. El objetivo fundamental es entonces determinar las diferentes tecnologías utilizadas y aplicables en el Departamento de Antioquia, así como los porcentajes de ahorro del recurso de las mismas.

En la actualidad, los diferentes sectores antioqueños presentan un nivel bajo de implementación de dispositivos y sistemas con los cuales se garantice un uso eficiente del agua. Un caso contrario se presenta en el ámbito de las naciones de la Unión Europea, en donde se ha invertido en el desarrollo e implementación de las tecnologías y en el momento se ejecutan programas especiales a fin de preservar un recurso del cual no tienen una amplia oferta.

En los estudios realizados para el desarrollo del capítulo de índices se ha encontrado que los consumos de agua de la región antioqueña son 30% menores que los promedios de consumo de Latinoamérica, por lo que se puede afirmar que el Departamento tiene un índice de consumo relativamente aceptable. Pero cabe anotar que la posterior implementación de las tecnologías ahorradoras podrían generar ahorros mayores, siendo éste el objetivo principal del proyecto.

La inversión económica necesaria para la implementación de cualquier desarrollo tecnológico para el ahorro y uso eficiente del agua, se verá recompensada en un futuro por beneficios generados por dichos elementos. Uno de ellos, de carácter particular, está relacionado con el ahorro económico ocasionado por la disminución de la demanda de agua; el otro beneficio, de carácter colectivo, está dado por la utilización racional de agua, la cual permite una disponibilidad de recurso en buenas condiciones para todos en un futuro.

6.4.1. Tecnologías para el sector domiciliario

El uso del agua en el campo residencial y de servicios tiene potenciales de ahorro (si se utilizan las tecnologías) con un valor aproximado del 7% para el consumo total en un residencia o del 35-70% para los diferentes elementos que se podrían instalar en determinado momento (ahorradores para sanitarios, ahorradores de lavamanos y lavaplatos, ahorradores de duchas, entre otros). Para Antioquia, el incremento de estos dispositivos puede optimizar el consumo per-cápita actual. En el presente, este índice se encuentra en un buen nivel comparado con las distintas naciones latinoamericanas, llegando incluso a competir con el consumo de algunas de las Naciones Europeas; dicha comparación está basada en los estudios realizados por la Cátedra del Agua y tomando como referencia comentarios de Donald M. Tate en su artículo *Principios del Uso Eficiente del Agua*.

Inicialmente se plantean estas innovaciones para el uso eficiente en las casas, lugares donde los consumos, dependiendo el uso final que se le dé al agua, pueden clasificarse en interiores y exteriores. En aquellos domicilios que

cuentan con jardines, se puede llegar a utilizar el 50% del agua total en uso: existe a nivel mundial una amplia normatividad en cuanto al riego de jardines, que agrupa una serie de recomendaciones de cómo se deben hacer los riegos para adquirir una mayor eficiencia. Por ejemplo, se sugiere realizar los riegos en la madrugada o en la noche concentrándose en las bases de las plantas. Sin embargo, por las condiciones climáticas (de precipitación), y las características habitacionales de los municipios del Departamento, el uso de agua en jardines es poco aplicado y su potencial es insignificante.

También se ha determinado que el uso doméstico representa un gasto de agua que corresponde al 3% del total consumido por todos los sectores (incluyendo generación hidroeléctrica). Según el informe *Sustainable Water Use in Europe* realizado por *European Environment Agency*, en el uso del sanitario se presentan los mayores gastos de agua residencial (cerca del 33%), en aseo personal se gasta del orden del 20-32%, y en preparación de alimentos, tan sólo el 3%.

El documento presenta algunos de los dispositivos optimizadores, el potencial de ahorro en caso de utilizar los equipos, y algunas recomendaciones para el consumo de agua.

Usos interiores y exteriores. En una casa habitación puede utilizarse hasta un 33% del consumo interior en los sanitarios, un 30% en las duchas, un 20% en las lavadoras de ropa, entre un 3-10% en las diferentes llaves de la casa y un 3% en los usos de la cocina. Teniendo en cuenta que este consumo para el Departamento de Antioquia es de un 3% del consumo total de la región, equivalente a 201.6 Mm³/año, se puede afirmar que en el Departamento se utiliza 66 Mm³/año en los sanitarios; 60 Mm³/año en las duchas, 40 Mm³/año en las lavadoras de ropa, 22 Mm³/año en las diferentes llaves de la casa y solamente 6 Mm³/año en los usos de la cocina.

Tras realizar las búsquedas de información especializada, se ha podido detectar que las tecnologías hoy disponibles en el mercado para el ahorro de agua son numerosas y fácilmente utilizables. Lamentablemente, el uso de tales tecnologías es llevado a cabo tan sólo por una minoría de la población, ya que el resto de la comunidad ni siquiera tiene conocimiento de la existencia de los dispositivos ahorradores.

El documento de actualización presenta una revisión de las tecnologías disponibles en el sector domiciliario de gran aplicabilidad en el medio, pero que por razones de espacio no se presentan en este texto consolidado. Se hace particular énfasis en las **lavadoras de bajo consumo**, los **sanitarios de bajo consumo**, y las **llaves para lavados** (cocinas, baños, duchas y usos domésticos).

6.4.2. Tecnologías para el sector industrial

Algunas actividades industriales, tales como la producción de alimentos, bebidas y textiles, requieren de grandes volúmenes de agua para sus procesos. Las aguas residuales efluentes de estas industrias contienen gran cantidad de sustancias contaminantes como son metales pesados, materia orgánica, microorganismos y soluciones fuertemente ácidas y/o básicas. En muchos de los casos, las aguas efluentes también contienen materias primas en bajas concentraciones que son desechadas en los procesos.

Esta contaminación se manifiesta, directamente, en los cuerpos receptores de las aguas de desecho, e indirectamente, con la aparición de afecciones a la salud de comunidades cercanas. Los ríos del Departamento se han convertido en los principales receptores de los vertidos de muchas de las industrias. Esto ha contribuido a una total alteración de las condiciones de la vida acuática y daños en los materiales de construcción de los sistemas de alcantarillado.

Una de las soluciones que hoy se reconocen como factibles de implementar para reducir los vertidos tanto de los sectores industrial como residencial, es el **re-uso del agua**. Esta técnica consiste básicamente en reutilizar las aguas de desecho de algunas actividades o procesos, ya sea directamente o mediante un tratamiento previo que permita mejorar sus condiciones, hasta el punto que puedan ser utilizadas en otras actividades que lo permitan y lo requieran (por ejemplo, regadío), o incluso llegar a retornarse para utilizarse nuevamente en el proceso productivo.

Actualmente, en algunos países donde el agua se ha convertido en un recurso escaso, las técnicas de re-uso, tanto a nivel agrícola como industrial, están permitiendo disminuir la demanda de agua. Es el caso de España, donde cada año se re-usan alrededor de 200 millones de m³, de los cuales el 4% se hace en el ámbito industrial. Se espera que este valor alcance los 1200 millones de m³/año para el año 2012, equivalente a un incremento potencial del 600% (*Catalina y Ortega, 1999*).

Entre las ventajas que tiene el implementar programas serios de re-uso de agua a nivel industrial se encuentran:

- Disminución de los costos en consumo de agua y pagos por vertimiento.
- Recuperación de materias primas en aguas de desecho, que por sus bajas concentraciones, hoy están siendo arrojadas al río.
- Optimización de los procesos desde el punto de vista ambiental, logrando introducir el concepto de Producción Más Limpia.
- Mejor uso de un recurso que en el futuro será escaso y cuyo precio es siempre creciente, de acuerdo con las tendencias observadas en los últimos años.

Para la ciudad y las Autoridades Ambientales, apoyar este tipo de iniciativas a nivel industrial, tiene ventajas como:

- Reducción en los índices de contaminación del río debido a la carga contaminante de origen industrial.
- Reducción en las inversiones para la construcción y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Re-uso de agua. Dentro de los procesos propios de cada sector, resultan vertimientos líquidos con distintos niveles de contaminación. Las respectivas condiciones de algunos vertimientos permiten que, mediante una intervención técnica, se recupere parcial o totalmente la calidad inicial del recurso utilizado. Dadas estas condiciones, el flujo vertido toma un carácter reutilizable en el mismo proceso o en otro donde se exija menor calidad.

En primera instancia se reconoce el procedimiento de *recirculación*, donde se ponen los flujos en un circuito cerrado o los efluentes del proceso se integran de nuevo a éste luego de un tratamiento. En general, la primera vez que el agua ha sido utilizada, cambia sus características físicas y químicas y, por lo tanto, podría requerir algún tipo de tratamiento. Es necesario entonces conocer la calidad del agua demandada por el proceso en cuestión, el nivel de degradación de su calidad en el mismo y, por ende, el tipo de tratamiento necesario.

Uno de los usos industriales en que se emplea la recirculación es el enfriamiento de equipos que generan calor, por ejemplo, las bombas o los sistemas que condensan gases, como el de la refrigeración o la condensación de vapor.

Otra forma de ejecución de esta técnica es la *reutilización*; con este procedimiento se recuperan los efluentes de un proceso con el fin de ofrecerles un tratamiento para recuperar en parte su calidad inicial. Posterior a esto se inyectan a un proceso distinto donde se le exige al recurso una menor calidad.

Para efectos de implementación de formas de ahorro, se tienen varios métodos de mayor aplicación en el sector industrial. En el documento de actualización se resumen algunos métodos aplicables a las condiciones actuales de desarrollo de procesos en el Departamento, pero por razones de espacio, en este documento consolidado no son abordados con profundidad. Esto son: el **sistema de reciclaje simple**, el **sistema de reciclaje múltiple**, el **sistema de cascada**, los **depósitos minerales y de corrosión**, la **disipación de calor**, y los **depósitos orgánicos**.

Tecnologías de membrana. Se conocen con este nombre aquellas técnicas en las cuales no sólo se reutiliza el agua sino que también se aprovechan materias primas y diluciones, gracias a la implementación de elementos permeantes ya sea por presión, concentración o electricidad. Una membrana puede ser concebida, en el sentido más amplio, como una fase intermedia que separa a dos fases entre sí y se opone al transporte de componentes químicos de distinta reacción.

Casi todos los procesos técnicos de una membrana son procesos de flujos transversales, al contrario de la filtración clásica o filtración con flujo final ciego o perpendicular. En la filtración transversal se evita que, gracias al fuerte flujo cruzado de la parte alimentador, se forme una torta de filtración.

El paso de masa de la membrana ocurre cuando diferentes componentes atraviesan cada parte de la membrana con una intensidad diferente. La fuerza directora puede ser una presión, un potencial eléctrico o una diferencia de concentración. El rendimiento de separación deseado se da por las diferentes permeabilidades de la membrana para los componentes.

Las técnicas de membrana se utilizan para varias aplicaciones, entre ellas, en Biotecnología, industrias de alimentos e industrias químicas.

Otras medidas. Se analizan: (a) reciclaje de aguas de refrigeración utilizando torres de enfriamiento o sistemas de refrigeración mecánica; (b) reciclaje de aguas condensadas de sistemas de vapor y calefacción; (c) reducción de flujos excesivos por medio de reguladores, o a través de la adopción de diámetros adecuados para las tuberías; (d) introducción de reguladores de presión, reguladores de volumen y válvulas automáticas; (e) re-uso de aguas de enjuagues previamente tratadas; (f) enjuagues en contracorriente, con una entrada de agua fresca y una salida de agua usada; (g) uso de aire comprimido para producir burbujas y mejorar los procesos de enjuagues; (h) transferencia de aguas usadas de un proceso a otro que no requieran agua de alta calidad; entre otras.

6.5. RESULTADOS DE PROGRAMAS DE REUSO DE AGUA EN 12 EMPRESAS DE GALVANOPLASTIA EN LA CIUDAD DE MEDELLIN

La línea a seguir ya está plasmada. Los argumentos de la política de estímulo a la implementación de tecnologías ya demostraron su efectividad en ahorro de agua en algunos sectores. La idea para Antioquia es diseñar campañas de difusión y crear políticas de estímulo muy completas para tener un medio en el cual la utilización masiva de estos elementos pueda tener efecto en cuanto al saneamiento de la problemática del agua. Un ejemplo de aplicación con buenos resultados en el Departamento se da en el sector de galvanoplastia de la Ciudad de Medellín donde se obtienen los resultados mostrados en la figura 6.14.

El proyecto consistió en evaluar ciertas técnicas de re-uso de agua aplicado a los procesos de recubrimiento metálico. Entre ellas se evaluaron las técnicas de membrana y algunos cambios en el proceso de bajo costo y fácil aplicación. La figura 6.14 muestra los ahorros potenciales de agua para diferentes insumos, siendo el agua (con un

61,2%) el recurso con mejores posibilidades de ahorro. También se disminuyen en un 31,5% los costos de tratamiento de agua y en 41,2% las materias primas que se utilizan en este sector. Los beneficios no son sólo en el campo ambiental, ya que en este caso la disminución de estos insumos generarían un ahorro de 125 millones de pesos anuales. De este estudio se concluye que en el Departamento, en especial los consumidores del sector industrial, tienen un gran potencial de ahorro de agua al utilizar técnicas de re-uso, reutilización o nuevas tecnologías. Para un mejor proceso es necesario entonces una inversión en el campo tecnológico y académico para lograr grandes beneficios basados en una política de incentivo hacia el uso de tecnología.

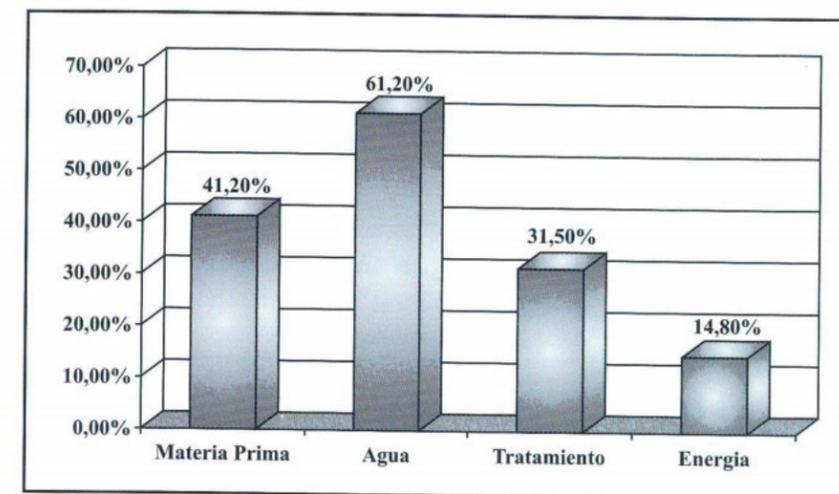


Figura 6.14. Ahorros en proyecto de re-uso de agua en galvanoplastia.

Fuente: Grupo de Investigaciones Ambientales UPB. Informe Proyecto 'Re-uso de Aguas Industriales del Sector de Galvanoplastia'.

6.6. POLÍTICAS PARA EL AHORRO Y USO EFICIENTE DEL AGUA

En el desarrollo de este capítulo se describen las políticas para el ahorro y uso eficiente del agua de mayor desarrollo, citando su implementación, logros y potenciales tanto a nivel mundial como en nuestra región.

6.6.1. Política del precio

El consumo del agua generalmente conlleva a un gasto económico dependiendo de la cantidad, la calidad y la disponibilidad del recurso utilizado. Las tarifas constituyen una forma de incentivar el ahorro del recurso: con su correcta aplicación, en cada uno de los sectores se generan respuestas importantes marcadas principalmente en la disminución de los consumos.

El sector de mayor trascendencia de esta política ha sido el residencial, porque es allí donde este concepto ha tenido sus mejores efectos. Una de las formas de desarrollo ha sido la implementación de una tarifa incremental con la cual, quien consuma en mayor proporción, tendrá obviamente un mayor egreso económico, de tal forma que los usuarios tratan de minimizar el egreso con un menor consumo. Un ejemplo específico de la efectiva aplicación de esta política se evidencia en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. En la figura 6.15 se presenta la evolución de los valores de consumo por usuario y el costo promedio de un metro cúbico de agua. Se observa un comportamiento incremental de los precios durante los últimos años y sus efectos sobre el consumo realizado por cada usuario en un mes (se entiende por usuarios el número de contadores instalados en el área).

Se observa una tendencia descendente gradual en el consumo por usuario alcanzando una disminución del 19.5% en el período 1997-2000. El precio del agua, por el contrario, ha ascendido progresivamente alcanzando, en el año 2000, un valor superior un 200% aproximadamente respecto al observado en 1997 (Incluye acueducto y alcantarillado).

Este caso tiene su homólogo en el sector industrial del Departamento, donde la política del precio ha tenido efectos positivos en lo relacionado con la disminución de consumos. En la figura 6.16 se puede observar la variación del precio fijado a los usuarios del sector y su repercusión en la utilización del recurso. La demanda presenta una disminución del 11,71% en un período de cuatro años, mientras que los precios presentan un considerable aumento, alcanzando cerca del 64% de incremento.

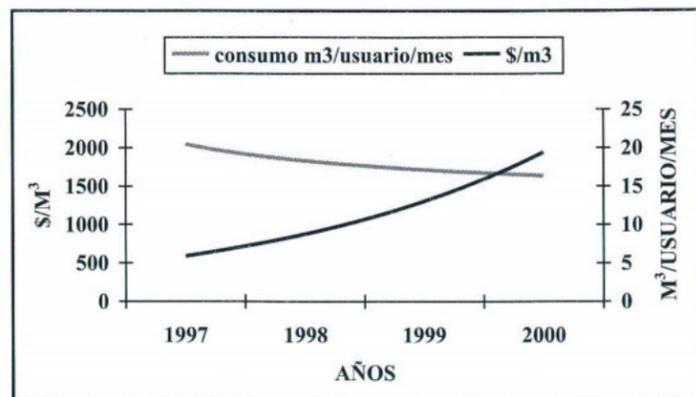


Figura 6.15. Evolución del consumo y el precio en el sector residencial del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Datos obtenidos a partir de la entidad prestadora del servicio en la zona e información extraída del Anuario Estadístico de Antioquia.

En el sector industrial, el agua es concebida como una materia prima dentro de los procesos productivos. Este factor hace que el ente industrial disminuya al máximo el costo de la misma (y por ende, el consumo) para lograr obtener productos competitivos en cuanto al precio.

Según las conclusiones del Cuarto Taller Regional del Agua (Instrumentos Económicos y Facilitadores), organizado en el marco del Convenio Interinstitucional Cátedra del Agua, en el Departamento de Antioquia se viene trabajando en legislar las tasas por uso del agua, las cuales buscan darle un valor económico importante a la utilización del recurso en cualquier proceso.

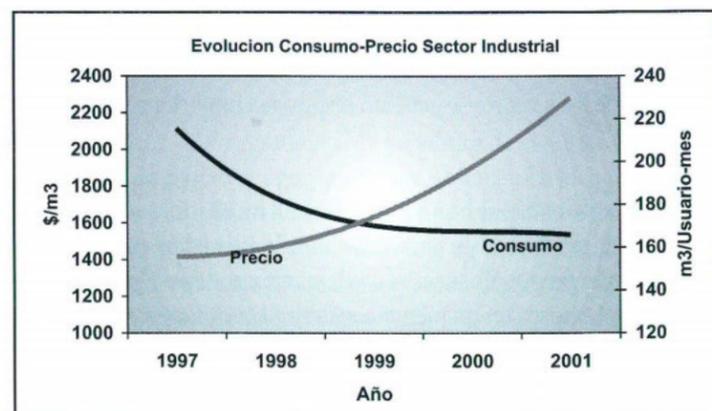


Figura 6.16. Evolución de consumos y precios en el sector industrial de Antioquia.

La proyección de las tasas por uso del agua en los sectores agropecuario y domiciliario prometen un gran desempeño en cuanto a los potenciales de ahorro. De forma similar, el progreso en el cobro de las tasas retributivas en el Departamento ha impulsado la puesta en marcha de proyectos de mejoramiento de la calidad del agua, y en algunos casos, de minimización de consumos.

Las líneas de actuación no son exclusivas del Departamento; en Colombia se viene tratando de fortalecer estos procesos. Antioquia ha sido el abanderado por la organización de sus entidades prestadoras de servicios públicos y por los entes ambientales reguladores, cuyos trabajos han permitido avanzar sobre una real valoración del recurso hídrico en pro del desarrollo sostenible.

La posición de nuestra región es destacable (consumos en promedio de 176 l/persona/día) si se compara con el promedio Latinoamericano (situado en 250 l/persona/día aproximadamente) a pesar de no ser lugares de alto desarrollo industrial.

La situación presentada en Antioquia es comparable, además, con el modelo de desarrollo de la política en la comunidad europea. La gran diferencia está sustentada en el mayor desarrollo en estas últimas latitudes y la misma cultura del consumidor. En la figura 6.17 se muestra una comparación de los valores pagados por metro cúbico de agua (en dólares) en nuestro departamento y algunas naciones sobresalientes del continente europeo.

El promedio del valor pagado por metro cúbico de agua del acueducto es de U.S.\$ 0,56, incluyendo la ciudad de Medellín. El costo del agua en la capital antioqueña se sitúa un 10% por debajo de la media europea. Este valor es muy cercano al de países como Suiza y Luxemburgo, pero se distancia bastante del valor pagado en lugares como Alemania, Bélgica, Francia y Holanda.

Estos costos asumidos del recurso se destinan para cubrir el gasto que supone instalar y mantener toda una red de distribución. Por esta razón, en el valor pagado se asumen las pérdidas, los consumos ilegales y las garantías de distribución. En este sentido, la política del precio no sólo ayuda a disminuir los consumos sino que ofrece al usuario la posibilidad de tener un muy buen servicio. Por ello se han estimado porcentajes de rendimiento con los cuales se mide la calidad del servicio, visto desde el punto de conservación y explotación de las redes. Se pueden establecer además los rendimientos en los abastecimientos de las ciudades teniendo en cuenta el total de agua introducida en la red y comparándola con el volumen facturado de ésta. Este dato indica que, normalmente, un rendimiento superior al 65% evidencia un sistema bien conservado y explotado; si el rendimiento se sitúa entre el 55 y el 65%, se detecta un grado de conservación y explotación medio; y, finalmente, si el rendimiento tiene valores inferiores al 50%, se conciben los sistemas como mal conservados y explotados.

Los potenciales de consumo eficiente de la adaptación de estas tecnologías se pueden apreciar en los resultados del estudio "Sustainable Water Use in Europe", incluidos en la figura 6.20. Los procesos descritos se acomodan a distintas actividades industriales desarrolladas en nuestro medio. A simple vista, un potencial del 18% puede parecer bajo y poco atractivo a raíz de la inversión económica exigida por éste; sin embargo, aplicando este factor sobre el índice de consumo para el desarrollo de la industria textil o papelera, se puede obtener un ahorro de 62 m³/ton procesada, llegando incluso a proporcionar una disminución de 127 m³/ton procesada. Lo importante de este ahorro no se evidencia únicamente en torno al medio ambiente. Estas cifras, en cualquiera de los sectores de la región, se traducen en dinero que se deja de pagar por la utilización del recurso.

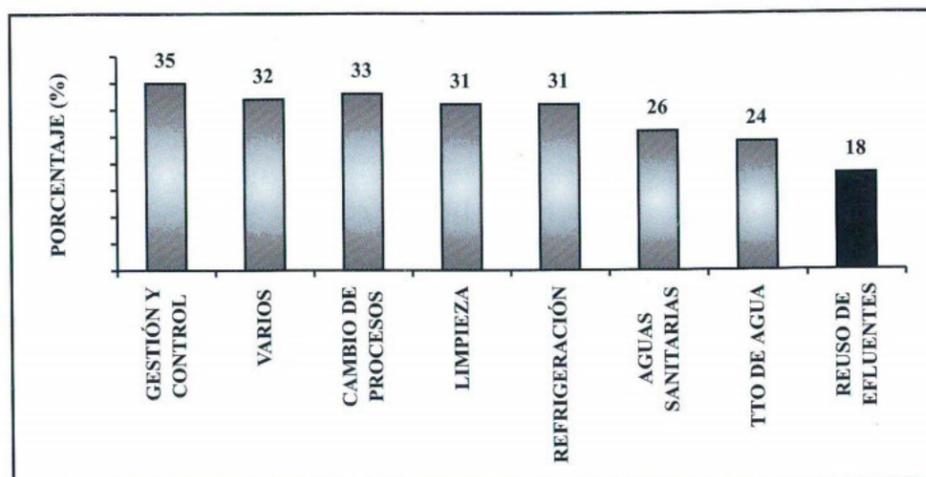


Figura 6.20. Porcentajes de ahorro según la tecnología implementada (Unión Europea).
Fuente: Sustainable Water Use in Europe.

La figura 6.21 muestra el potencial de ahorro en algunas de las actividades industriales, una vez sean implementados los procesos eficientes y las tecnologías existentes para estos tipos de industrias.

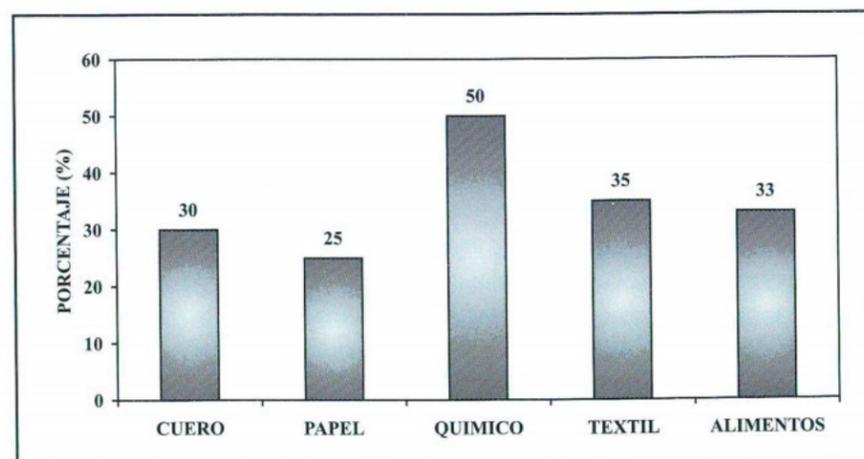


Figura 6.21. Ahorro potencial de agua en algunos sectores industriales (Unión Europea).
Fuente: Sustainable Water Use in Europe.

Para un correcto análisis del potencial de ahorro, inicialmente se deben conocer los avances tecnológicos a los cuales ha estado sujeto el sector industrial antioqueño. Si en la Unión Europea, en donde el desarrollo de la industria ha ido de la mano de la tecnología, se presentan potenciales de hasta el 50% (caso de la industria química), en el Departamento según su desarrollo tecnológico, se podrían incrementar estos potenciales.

Aunque entre los procesos industriales realizados en Europa y Antioquia pueden existir notables diferencias, con estos potenciales (infriendo un cálculo sobre los índices establecidos para el Departamento) se podrían generar ahorros en la región de hasta 14 m³/ton en la industria alimenticia, 120 m³/ton en la industria textil, 40 m³/ton en la industria papelera y 0.3 m³/cuero en el sector de las curtiembres.

No sólo la tecnología tiene cabida en el sector industrial. Un escenario importante para su implementación son las redes de distribución: para este campo se tienen elementos y medios con los cuales se reducen las pérdidas, las cuales son una fuente importante de derroche del recurso. Antioquia ha tenido un desarrollo en este sentido: la red de distribución del Área Metropolitana del Valle de Aburrá se ha ido dotando de elementos para el control de pérdidas (medidores, reguladores de caudal, válvulas) con los cuales, al pasar de los años, el sistema se ha posicionado dentro del rango que lo clasifica como bueno.

En un período de 6 años, durante los cuales se adecuó la red para un proceso más eficiente, se logró disminuir en un 6% las pérdidas; el reto es bajar entre 7 y 10 puntos porcentuales más, para ubicarse en el nivel de rendimiento de las redes de distribución europeas, cuyas pérdidas oscilan entre 20 y 24%.

6.6.3. Desarrollo normativo

La política de fomento del desarrollo normativo busca, mediante la creación de leyes, establecer criterios de regulación con los cuales se pueda indicar a los consumidores el aprovechamiento eficiente y la importancia del ahorro. Además, este grupo de normas sirve para castigar a los usuarios que poseen un consumo desordenado e inadecuado, o estimular, mediante beneficios extras, a los usuarios que han demostrado un consumo enmarcado en la optimización y la legalidad.

El Departamento de Antioquia se encuentra bajo el marco normativo de Colombia, que en su ámbito ambiental cuenta con una estructura definida, pero las condiciones de la administración jurídica del país no permiten una correcta legislación.

En el caso específico del agua, en el año 1997 se dicta la Ley 373 por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua, donde sobresale el Decreto 3102 que tiene como objetivo reglamentar e incentivar la instalación de equipos, sistemas e implementos de bajo consumo de agua. Este aspecto del marco legal ambiental indica el desarrollo de esta política en nuestro país y consecuentemente en la región antioqueña.

Otro elemento normativo importante para el desarrollo sostenible del agua han sido las tasas retributivas, mediante las cuales se cobra a los usuarios, principalmente del sector industrial, una cantidad de dinero determinada por la calidad y cantidad de sus descargas líquidas. Estos cobros contribuyen a una notable disminución de los consumos ya que los usuarios, en su necesidad de asumir valores mínimos por concepto de descargas líquidas, planean procesos más eficientes con menores entradas del recurso.

Otra forma normativa creada en pro del consumo eficiente, son las tasas por uso del agua, las cuales establecen el pago por el recurso hídrico en relación con las cantidades consumidas. El usuario debe consumir sólo lo necesario

para su proceso, ya que el exceder el volumen eficiente exigido por el mismo conllevaría a un valor mayor en la factura de cobro por el concepto de tasas por uso.

El gran oficio de esta política en nuestra región y en general para todo el país, es ofrecer los medios por los cuales se ejecuten y se hagan cumplir de una manera adecuada este conjunto de normas. En el país existen organismos de control para los asuntos ambientales, definidos como Corporaciones Autónomas Regionales (CAR'S) adscritas al Ministerio del Medio Ambiente. La responsabilidad de ejecutar el marco legal está puesta en ellas. Se puede decir que el país cuenta con un marco legal ambiental bien definido, pero los mecanismos para el control y ejecución del mismo no funcionan de la manera como se piensa para un buen desarrollo bajo estos parámetros legales. Igualmente la indisposición de los usuarios para cumplir a cabalidad una ley, aún sacrificando los beneficios individuales y colectivos que bajo ella se trazan, contribuye al mal funcionamiento del marco.

6.6.4. Campañas educativas

Es importante reconocer la influencia de todos en la problemática del agua. Por lo tanto, el compromiso de conservar y garantizar la presencia y calidad del recurso convoca a toda la comunidad. Este es el fin perseguido por la política de sensibilización de la población, que busca integrar a todos los sectores representados en sus componentes humanas en pro de un desarrollo sostenible en el campo del recurso hídrico.

La implementación de esta política es un proyecto a largo plazo, y necesita de una amplia disponibilidad de recursos (humanos y económicos); la integración y la educación son tareas difíciles y en nuestro medio se tornan aún más complejas por las condiciones culturales de la región.

La sensibilización de la población tiene muchos medios de ejecución, ya que existen distintas formas de llamar la atención de las personas con el fin de introducir un concepto o un conocimiento. La tarea difícil es el aprovechamiento del concepto brindado por parte de los vinculados.

En Antioquia ha sido lento el avance de esta política. En los países desarrollados, al estar ya establecidos distintos tipos de campañas, se tiene un mayor avance en términos de resultados. En Colombia, y en general en Latinoamérica, faltan estrategias más agresivas de comunicación de las problemáticas y sus mecanismos de solución.

Para nuestro Departamento se pueden abrir algunas vías de ejecución de estrategias en pro de una comunicación acertada de la problemática ambiental: una de ellas, y quizás la más importante, es en medio de la infraestructura de la educación en todos sus niveles (colegios, escuelas, institutos, universidades, entre otros); dentro del concepto de educación integral ofrecido por estos centros educativos en la región se puede incluir la sensibilización ambiental, creando campañas que hagan parte de los planes de estudio instalados en cada uno de estos planteles.

La educación superior es de particular interés, pues es allí donde se están formando los profesionales que manejarán los hilos de los entes consumidores más importantes, como lo es la industria y la agroindustria. En cada área académica específica se difunde la forma en la cual ésta puede colaborar para tener un uso eficiente del recurso; luego, quienes participaron de la formación, transmitirán y aplicarán estos conceptos en el campo donde se desarrollen como profesionales.

Los medios masivos de comunicación constituyen otra alternativa de gran importancia para lograr una sensibilización. La mayor parte de la población a la cual se quiere llegar, tiene acceso por lo menos a uno de estos distintos medios (radio, prensa, televisión, Internet, canales internos de comunicación, medios visuales, entre otros), donde de manera didáctica se pondrían los conceptos de la problemática y las alternativas para hacer del usuario parte de la solución.

CRÉDITOS A GRUPOS DE TRABAJO

INVENTARIO GENERAL DE AGUAS Y SUS CALIDADES EN ANTIOQUIA

Institución:

Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos,
Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Investigadores Principales:

Oscar Mesa Sánchez, Germán Poveda Jaramillo, Jaime Ignacio Vélez Upegui.

Estudiantes de Posgrado:

Carlos David Hoyos Ortiz, John Freddy Mejía Valencia, Jairo Herrera Arango.

Auxiliares de Investigación:

Paula Andrea Agudelo Madrid, Paola Andrea Arias Gómez, Andrés Felipe Borja Jaramillo, Yuley Mildrey Cardona Orozco, Lina Isabel Ceballos Bonilla, Juan Diego Giraldo Osorio, Olver Olfrey Hernández Navarro, Hernán Moreno Ramírez, Juan David Pérez Arango, Diana Isabel Quevedo Tejada, Jorge Mario Ramírez Osorio, Luis Fernando Salazar Velásquez, Jheison Alberto Urzola Hernández, Sara Cristina Vieira Agudelo, Manuel David Zuluaga Arias.

MÉTODOS BIOLÓGICOS DE DESCONTAMINACIÓN

Institución:

Corporación Ambiental, Universidad de Antioquia.

Profesores:

Francisco José Molina Pérez, Julio César Saldarriaga Molina, Jorge Humberto Sierra Carmona.

Estudiantes Maestría en Ingeniería Ambiental:

Mauricio Andrés Correa Ochoa, Luis Eduardo Forero Cárdenas.

CRECIDAS, TORRENTES Y ASENTAMIENTOS HUMANOS

Institución:

Escuela de Ingeniería de Antioquia.

Investigador Principal:

Juan Fernando Barros.

Auxiliar de Investigación:

Juan Camilo Villegas.

INTERACCIONES SUELO-AGUA-VEGETACIÓN

Institución:
Escuela de Ingeniería de Antioquia.

Investigador Principal:
María del Pilar Arroyave.

Auxiliar de Investigación:
Juan Camilo Villegas.

USO EFICIENTE Y AHORRO DEL AGUA

Institución:
Grupo de Investigaciones Ambientales, Universidad Pontificia Bolivariana.

Investigadores Principales:
Edgar Botero García, José Adrián Ríos Arango.

Estudiantes de pregrado:
Andrés Felipe Toro Montoya, Cesar Augusto Quintero Londoño, Jorge Mario Carreño Arango.

CONVENIO INTERINSTITUCIONAL CÁTEDRA DEL AGUA

Institución:
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia, Línea de Acción 'Temas Estratégicos'.

Coordinación Técnica:
Carlos Daniel Ruiz Carrascal.

Coordinación Temas Estratégicos:
Santiago Echavarría E.

Signatarios

Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia

Centro Nacional de Producción Más Limpia

Corantioquia

Cornare

Escuela de Ingenieros

Isagen

Universidad de Antioquia

Universidad Nacional (Sede Medellín)

Universidad Pontificia Bolivariana

Universidad San Buenaventura

Una aproximación al Estado del Arte
del Recurso Hídrico en Antioquia



Compilación
Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia
2002