

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CARTAGENA DE INDIAS COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**REGLAMENTACIÓN DEL USO DE LAS AGUAS SUPERFICIALES DE UNA
CUENCA CON INFORMACIÓN ESCASA**

Maria Victoria Vélez¹, Carlos Restrepo Tamayo y Joany Sánchez Molina

*Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Colombia,
¹mvvelez@unalmed.edu.co.*

RESUMEN:

En este artículo se presenta la metodología empleada y los resultados obtenidos en el proceso de reglamentación del uso de las aguas de la cuenca de la quebrada Doña María, localizada entre los municipios de Medellín, Itagüí y La Estrella (Antioquia, Colombia). Esta cuenca no se encuentra instrumentada con estaciones de caudal por lo cual no es posible estimar la variabilidad espacial y temporal de los caudales en la cuenca con datos reales, ni de calibrar modelos para este fin, por lo cual se recurre al uso de modelos hidrológicos para cuencas con información escasa como el Modelo de Tanques, el Balance Hidrológico de Largo Plazo y la Regionalización de Características Medias. Paralelamente se realizó el cálculo de la variabilidad espacial de la demanda hídrica actual y futura, a partir de la información levantada en campo (censos y levantamiento de captaciones) y de información secundaria existente en las corporaciones ambientales. Con los resultados de la oferta y la demanda se realizaron balances hídricos para identificar zonas de déficit y los usuarios y usos que lo ocasionan, posteriormente se realizó una propuesta de reglamentación de la corriente eliminando estas zonas de déficit empleando criterios de racionalidad, equidad, ecológicos, y de usos prioritarios, dispuestos en la legislación vigente. Finalmente se presentan dos módulos (software) apoyados en los Sistemas de Información Geográfica para el cálculo de las tasas por uso del agua y la disponibilidad hídrica superficial en la cuenca.

ABSTRACT:

It is presented here a methodology for the regulation of surface water uses, and the results of its application in the Doña María creek, located among the cities of Medellín, Itagüí and La Estrella (Antioquia, Colombia). Because of the absence of measurement stations in the basin, the estimation of the spatial and temporal variability of flows, and models calibration are not possible. This leads to the application of hydrological models developed for ungauged basins: tanks model, long-term water balance, and regionalization of mean features or characteristics. At the same time, the spatial variability of the current and future water demands was estimated using field data (intakes census), and secondary information from the environmental authorities. Using the demands analysis, shortage zones were identified, in addition to users and uses responsible of them, and a regulation proposal was made by removing those zones according with the criteria of the current laws about water use (rationality, equity, ecology and priority uses). Finally, two software modules are presented, based on Geographical Information Systems, for calculating the fees for water use and the surface water availability in the basin.

PALABRAS CLAVES:

Reglamentación, Demanda Hídrica, Modelos Hidrológicos

INTRODUCCIÓN

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y CORANTIOQUIA como corporaciones involucradas en el manejo ambiental de la cuenca de la quebrada Doña María, requerían de la formulación de una propuesta de reglamentación de los usos y usuarios de sus aguas superficiales para disminuir los conflictos existentes por el recurso y actualizar la reglamentación vigente del año 1993.

La cuenca de la quebrada Doña María localizada entre los municipios de Medellín, Itagüí y La Estrella pertenecientes al departamento de Antioquia, Colombia (ver Figura 1), tiene un área aproximada de 75.82 km², con un 91 % de su extensión como área rural y el restante como área urbana, cada una bajo el control de una corporación ambiental diferente. La cuenca sirve como fuente de abastecimiento de agua para los acueductos comunitarios rurales y urbanos, usuarios domésticos individuales y para el sector agroindustrial.

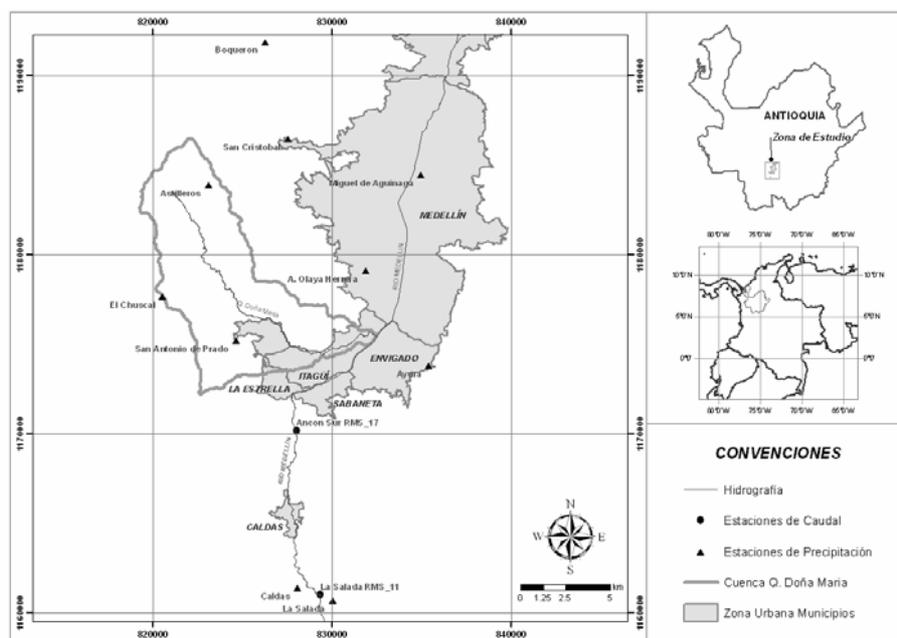


Figura 1.- Localización general de la zona de estudio y de las estaciones hidroclimáticas utilizadas.

Inicialmente no se contaba con información primaria suficiente para calcular la demanda hídrica superficial actual y futura en la cuenca, al igual que para localizar los puntos donde se demanda agua sobre la red de drenaje. La cuenca no se encuentra instrumentada con estaciones de medición de caudal, razón por la cual no es posible calibrar o validar modelos hidrológicos que permitan representar los caudales en cualquier punto de la red de drenaje de la cuenca.

Como procedimiento metodológico para la reglamentación se recurre a la utilización de modelos hidrológicos agregados calibrados con información de cuencas cercanas y al uso de técnicas de escalamiento, para así poder representar la variabilidad espacio-temporal de los caudales naturales en la cuenca. Paralelamente se realiza un levantamiento de información primaria en campo e información secundaria con las corporaciones ambientales para poder estimar la variabilidad espacial de la demanda actual y futura en la cuenca, luego se realizan análisis espaciales de oferta y demanda hídrica para identificar zonas de déficit en la cuenca, así como los usuarios y usos que lo ocasionan. Finalmente se hace una propuesta de reglamentación de los usos del agua en la cuenca basados en criterios de racionalidad, equidad, ecológicos, y de usos prioritarios, dispuestos en la

legislación vigente en Colombia. Como herramientas de apoyo a la gestión del recurso hídrico se desarrollan unos módulos de un software apoyados en los Sistemas de Información Geográfica para el cálculo de las tasas por uso de agua y la disponibilidad hídrica cuando ingresan nuevas captaciones o se incrementa la demanda en las existentes.

HIDROLOGÍA

En la reglamentación de la cuenca de la quebrada Doña María se estimaron caudales medios, mínimos y ecológicos, a partir de metodologías aplicables a cuencas con información escasa, dado que esta no está instrumentada con estaciones de caudal. Conocer la variabilidad espacial de los caudales mínimos y ecológicos es importante para determinar zonas de déficit cuando se realizan análisis de oferta y demanda hídrica actual y futura, para condiciones de escasez natural del recurso. La estimación de los caudales medios es importante para el cálculo de las tasas por uso del agua con los elementos legales vigentes en Colombia para este fin.

Información Disponible

- Cartografía

Se utilizaron 39 planchas topográficas a escala 1:5000 y 1:2000.

- Información hidroclimática

La información hidroclimática utilizada corresponde a 10 estaciones de precipitación (Tabla 1) cercanas a la cuenca de la quebrada Doña María, que sirven para estimar la variabilidad espacial de la precipitación media anual en la cuenca, y 2 estaciones de caudal (Tabla 2) sobre el río Medellín para calibrar el Modelo de Tanques (Vélez, 2001) que es usado para la simulación de caudales diarios. La localización de las estaciones se puede observar en la Figura 1. Las coordenadas geográficas de las estaciones utilizadas se encuentran en un sistema plano con origen en Bogotá. Las estaciones con superíndice 1 son usadas para simular caudales con el Modelo de Tanques y con 2 para calibrarlo.

Tabla 1.- Estaciones de precipitación utilizadas en la cuenca de la quebrada Doña María

Código	Tipo	Nombre	Municipio	Norte (m)	Este (m)	Periodo	Años	Precipitación Media (mm/año)
2701038	PG	San Antonio de Prado ¹	Medellín	1175253	824640	1950-2004	55	2031
2701046	PG	San Cristóbal ¹	Medellín	1186530	827560	1950-2004	55	1662
2701047	PG	Miguel Aguinaga	Medellín	1184470	834980	1970-2003	34	1435
2701062	PM	Boquerón	Medellín	1191950	826270	1970-1992	23	2121
2701077	PG	El Chuscal ¹	Medellín	1177708	820518	1971-2004	34	2731
2701093	PG	Ayurá	Medellín	1173830	835380	1972-2004	33	1818
2701111	PG	Astilleros ¹	Medellín	1183957	823092	1991-2004	14	2064
2701507	SP	Aeropuerto Olaya Herrera	Medellín	1179127	831858	1969-2004	35	1639
2701526	AM	La Salada ²	Caldas	1160694	829960	1984-2004	21	2415
2701526	PG	Caldas ²	Caldas	1160510	828568	1950-2004	55	2531

Tabla 2.- Estaciones de caudal localizadas sobre el río Medellín

Código	Tipo	Nombre	Municipio	Norte (m)	Este (m)	Periodo	Área (km ²)	Años	Caudal Medio (m ³ /s)
2701733	LG	La Salada RMS 11	Caldas	1161053	829527	1981-1986	44	6	1.60
2701727	LG	Ancón Sur RMS 17	La Estrella	1170190	828178	1980-1995	122	16	4.80

Análisis de Cuencas Hidrográficas a Partir de Modelos Digitales de Elevación

- Modelo digital de elevación o MDE

Este modelo permite realizar una representación del terreno en forma discreta mediante celdas (o píxeles) de 10 m x 10 m de resolución espacial, donde cada una posee un atributo propio de

elevación y resulta de la interpolación de las curvas de nivel mediante la elaboración de un TIN (triangular irregular network) y su posterior “rasterización”. El MDE es corregido en HidroSIG 3.1 (UNAL, 2003) eliminando sumideros y zonas planas, usando una red de drenaje conocida y revisada en campo. El MDE es utilizado para el trazado automático de cuencas y hallar sus parámetros morfométricos. La Tabla 3 presenta algunos parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada Doña María.

Tabla 3.- Parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada Doña María

Parámetro	Valor
Área de la Cuenca [km ²]	75,82
Orden de Horton - Strahler	5
Diferencia máxima de cotas [m]	1583
Pendiente Promedio del Canal Principal [%]	5,57

- Procedimiento de agregación de variables

Este procedimiento es utilizado en la elaboración de los mapas de caudales naturales y demanda. El procedimiento consiste en sumar una variable discretizada en el espacio (precipitación, evaporación, caudales de demanda, etc.), según el mapa de direcciones de drenaje que genera HidroSIG 3.1 en el proceso de corrección del MDE. Este procedimiento se esquematiza en la Figura 2, donde se muestran en orden descendente: el mapa de la variable discretizada a agregar, el mapa que representa la red de drenaje, el mapa de direcciones de drenaje y el mapa de la variable agregada (mapa resultado).

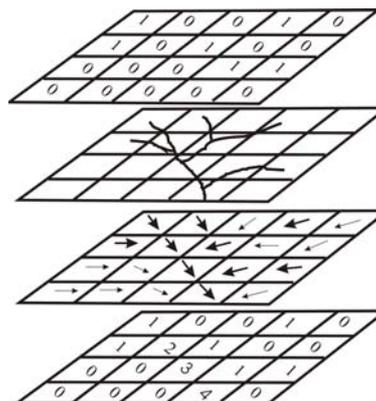


Figura 2.- Proceso de agregación de variables siguiendo la estructura de la red de drenaje.

Caudales Medios

Para la estimación de caudales medios se utilizó el método del Balance Hidrológico de Largo Plazo, donde se supone que en un período de tiempo largo (décadas) el almacenamiento en el suelo y en la atmósfera es despreciable. Este método fue utilizado en varias subcuencas instrumentadas de la cuenca del río Medellín con resultados satisfactorios (UNAL et al., 2004). El caudal medio en una cuenca se calcula como:

$$Q_{med} = \int_{\text{ÁreaCuenca}} [P(x,y) - E(x,y)] dA \quad [1]$$

Donde Q_{med} es el caudal medio de largo plazo, $P(x,y)$ es la precipitación que recibe el punto (x,y) en el período considerado, $E(x,y)$ es la lámina de agua que se pierde por evapotranspiración en el punto (x,y) en el mismo período, y dA es un diferencial de área de la cuenca.

La ecuación [1] se soluciona de forma discreta en los píxeles al interior de la cuenca, se suma el resultado según el procedimiento de agregación de variables y se obtiene el mapa de caudales.

- Variabilidad espacial de la precipitación

El mapa de precipitación media anual (Figura 3a) se construyó con las estaciones de la Tabla 2, utilizando el método de interpolación de Kriging y aplicando el variograma calculado por UNAL et al. (2004). La precipitación media en la cuenca de la quebrada Doña María es de 2122 mm/año.

- Variabilidad espacial de la evapotranspiración real

Se utilizaron tres métodos empíricos para la estimación de la evapotranspiración real en la cuenca de la quebrada Doña María, estos son: Turc, el Método del Factor Regional y CENICAFÉ (UNAL et al., 2004). La Figura 3b presenta el mapa de evapotranspiración real media anual para la cuenca de la quebrada Doña María empleando el método de CENICAFÉ. La evapotranspiración real media y los caudales medios estimados a la salida en la cuenca se presentan en la Tabla 4.

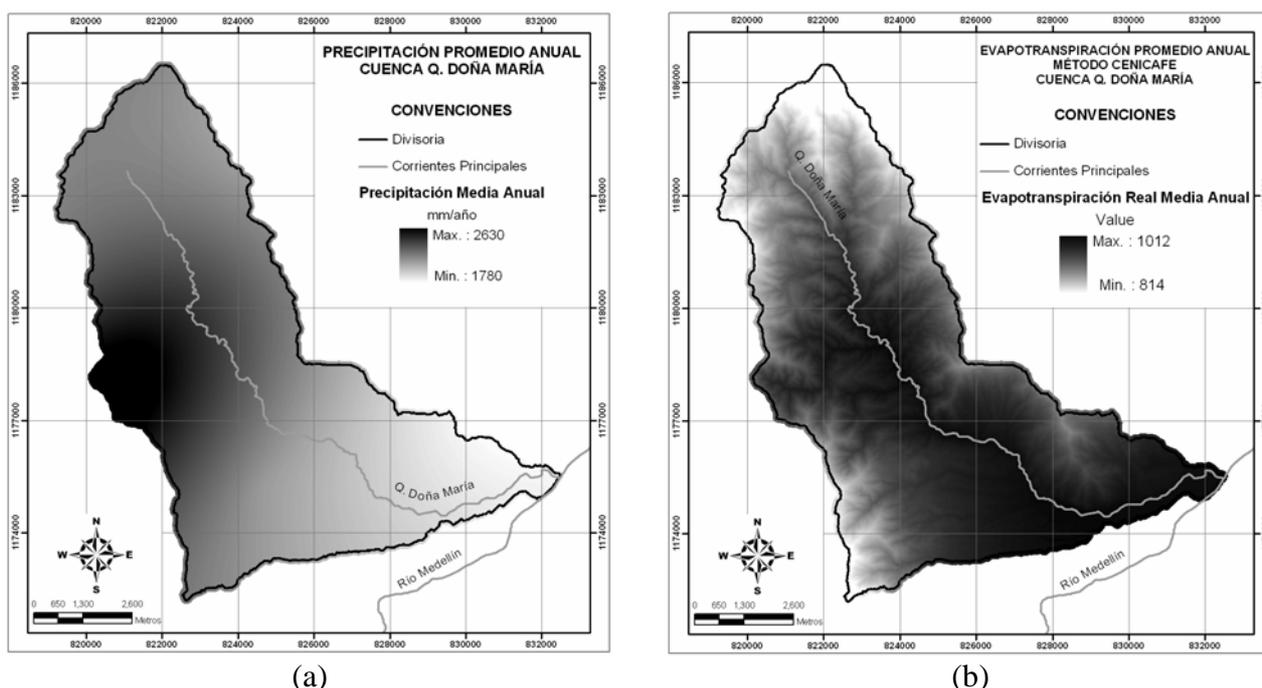


Figura 4.- Mapas de precipitación media anual (a) y evapotranspiración real media anual por el método de Cenicafé (b) en la cuenca de la quebrada Doña María, (mm/año).

Tabla 4.- Caudal medio y evapotranspiración real media en la cuenca de la quebrada Doña María

Método	Cenicafé	Factor Regional	Turc
Evapotranspiración Real Media Anual (mm/año)	956	1011	860
Caudal (m ³ /s)	2.80	2.67	3.03

La Tabla 4 permite apreciar que usando el método de CENICAFÉ para el cálculo de la evapotranspiración real, los resultados obtenidos son valores intermedios a los estimados con otros métodos. El método de CENICAFÉ es el recomendado por UNAL et al. (2004) en la cuenca del río Medellín pues presenta menores errores cuando se comparan los caudales medios de las series históricas sobre el río con los del método del Balance Hidrológico de Largo Plazo, es por esto que el mapa de caudales medios se realizó usando este método de cálculo de la Evapotranspiración real.

Caudales Mínimos

Para la estimación de caudales mínimos se utilizó un modelo lluvia-escorrentía de parámetros físicos agregado diario denominado Modelo de Tanques desarrollado por Vélez (2001) y ecuaciones de regionalización de características medias (UNAL et al., 2004).

El Modelo de Tanques se calibró con las estaciones de caudal de la Tabla 2. El proceso de calibración consiste en variar los parámetros del modelo hasta obtener una simulación adecuada de los caudales reales de la cuenca instrumentada, esto es, cuando la diferencia de la media de la serie simulada y la real sea inferior al 5%, cuando se reproduzcan adecuadamente las recesiones de las series, y cuando las curvas de duración real y simulada sean similares. Los parámetros del modelo calibrado en las cuencas definidas por las estaciones de la Tabla 2 se muestran en la Tabla 5. En la Figura 5 se presentan las series de caudales simulada y observada en la estación La Salada RMS 11 y la Figura 6 sus correspondientes curvas de duración.

Tabla 5.- Parámetros del Modelo de Tanques calibrado en las cuencas instrumentadas

La Salada RMS 11		Ancón Sur RMS 17	
Almacenamiento capilar	150	Almacenamiento capilar	200
Conductividad capa superior (mm/día)	20	Conductividad capa superior (mm/día)	20
Conductividad capa inferior (mm/día)	5	Conductividad capa inferior (mm/día)	6
Tiempo de residencia flujo superficial (días)	1	Tiempo de residencia flujo superficial (días)	1
Tiempo de residencia flujo subsuperficial (días)	4,5	Tiempo de residencia flujo subsuperficial (días)	5
Tiempo de residencia flujo base (días)	85	Tiempo de residencia flujo base (días)	100

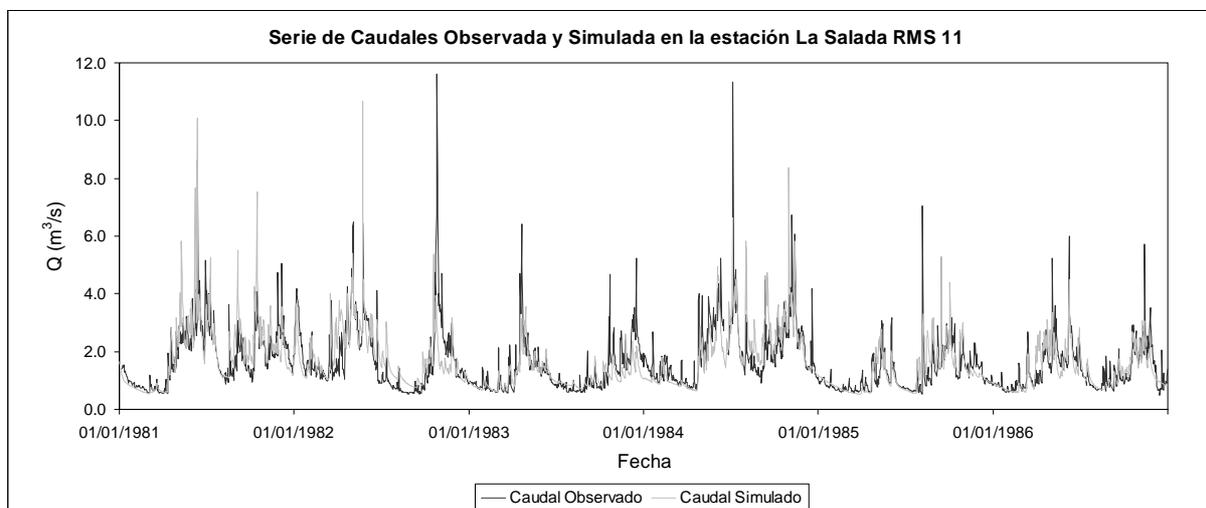


Figura 5.- Series de caudales simulada y observada en la estación La Salada RMS 11.

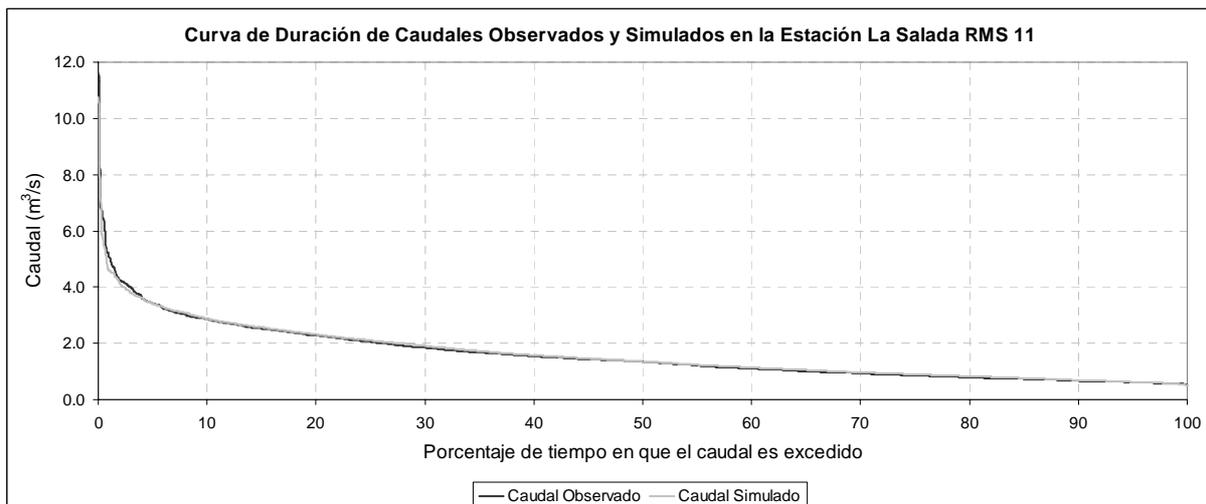


Figura 6.- Curva de duración de caudales simulada y observada en la estación La Salada RMS 11.

Para la simulación de caudales diarios a la salida de la cuenca de la quebrada Doña María se utilizan los parámetros de los modelos calibrados (Tabla 5) y las estaciones de precipitación de la Tabla 1. A partir de la serie de caudales simulados se calculan la media (μ) y la desviación estándar (σ) de los caudales mínimos anuales, como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6.- Estadísticos de los caudales mínimos simulados a la salida de la quebrada Doña María

	Calibración La Salada RMS 11	Calibración Ancón Sur RMS 17
$\mu_{min} (m^3/s)$	1,218	1,393
$\sigma_{min} (m^3/s)$	0,402	0,400

Según la metodología propuesta por UNAL-UPME (2000), la media y la desviación estándar de los caudales mínimos dependen del área (A), la precipitación (P) y la evaporación (E), así:

$$\mu_{min} = c_{\mu} (\bar{P} - \bar{E}) A = c_{\mu} Q_{med} \quad [2]$$

$$\sigma_{min} = c_{\sigma} (\bar{P} - \bar{E}) A = c_{\sigma} Q_{med} \quad [3]$$

Los parámetros c_{μ} y c_{σ} se calculan a la salida de la cuenca con la información de las Tabla 4 y 6, y se suponen iguales en toda la cuenca. Se calculan los caudales mínimos para diferentes periodos de retorno en toda la cuenca, con la ecuación presentada por Chow et al. (1994):

$$Q_{Tr} = \mu_{min} + K \sigma_{min} \quad [4]$$

Donde K es el factor de frecuencia que depende de la función de distribución de probabilidad de valores extremos elegida y del periodo de retorno (Tr), que en este caso fue la distribución Gumbel.

$$K_{Tr} = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0.5772 + \ln \left[-\ln \left(\frac{1}{Tr} \right) \right] \right\} \quad [5]$$

En UNAL et al. (2004) se presentan unas relaciones (Regionalización Río Medellín) para el cálculo de la media (μ) y la desviación estándar (σ) de los caudales mínimos en el río Medellín, que dependen del área de la cuenca (A) en km^2 , y son de la forma:

$$\mu_{min} = 0,013158 A \quad [6]$$

$$\sigma_{min} = 0,003648 A \quad [7]$$

Igualmente UNAL-UPME (2000) presentan unas relaciones (Regionalización Atlas Hidrológico) para el cálculo de estos parámetros estadísticos, aplicables a la zona donde se encuentra la cuenca, y que dependen del área de la cuenca (A) en km^2 , de la precipitación media (P) y de la evapotranspiración (E), y son de la forma:

$$\mu_{min} = 0,390 A (P - E) \quad [8]$$

$$\sigma_{min} = 0,110 A (P - E) \quad [9]$$

La Figura 7 muestra los caudales mínimos para diferentes periodos de retorno a la salida de la quebrada Doña María, obtenidos con el método de regionalización de características medias (evaporación media por el método de CENICAFÉ) y con el Modelo de Tanques usando las calibraciones de la estación La Salada (Simulación Modelo de Tanques – P. La Salada) y Ancón Sur (Simulación Modelo de Tanques – P. Ancón Sur).

La Figura 7 permite observar que los resultados obtenidos con el Modelo de Tanques usando los parámetros de la calibración de la estación La Salada, se aproximan de mejor forma a los obtenidos con las ecuaciones de regionalización que los obtenidos con el Modelo de Tanques usando los parámetros de calibración de la estación Ancón Sur, y estos últimos son mayores a los demás, situación que es menos crítica para la repartición de caudales pues sugiere mayor disponibilidad

hídrica, así que se escogen los resultados del Modelo de Tanques usando los parámetros de calibración de la estación La Salada RMS 11 y a partir de estos se realizan los mapas de caudales mínimos para diferentes periodos de retorno.

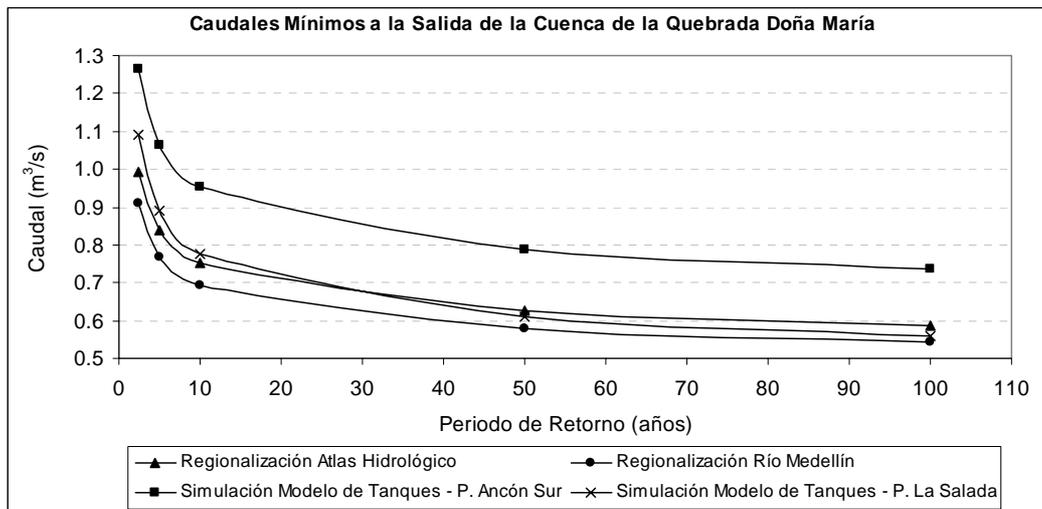


Figura 7.- Caudales mínimos en la quebrada Doña María por diferentes métodos.

Caudales Ecológicos

Para la estimación de los caudales ecológicos ($Q_{ecologico}$ en l/s) se empleó la metodología propuesta en la Resolución 0865 del 22 de Julio de 2004 publicada por el Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia. La metodología permite estimar el caudal ecológico de una corriente, como el 25% del caudal mensual multianual mas bajo de la misma. Se realizaron entonces 34 simulaciones con el Modelo de Tanques (Vélez, 2001) usando los parámetros de calibración de la estación La Salada RMS 11 en subcuencas de la quebrada Doña María con diferentes rangos de área, se aplica la metodología de la Resolución 0865 descrita, y se realiza un ajuste lineal con el área de la cuenca (A en km^2), como se puede apreciar en la Figura 8 para obtener el caudal ecológico en cualquier punto de la misma.

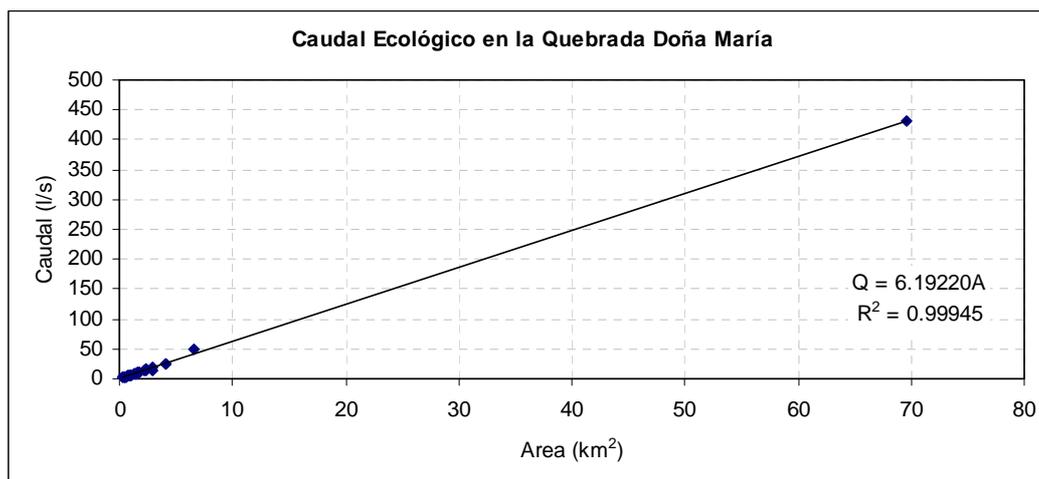


Figura 8.- Variación de los caudales ecológicos con el área en la quebrada Doña María.

CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA HÍDRICA

La caracterización de la demanda hídrica es un proceso que comprende dos etapas las cuales son: recolección y análisis de la información primaria y secundaria, y la segunda son estimaciones de la demanda actual y futura del recurso hídrico en la cuenca.

Recolección y Análisis de Información Primaria y Secundaria

Se realizaron dos actividades: (1) censo predial que incluye los sectores doméstico, agropecuario e industrial, y (2) inventarios de captaciones y vertimientos, y asignación a usuarios identificados en los censos. Adicionalmente se considera la información que pudiera obtenerse de las reuniones con la comunidad y las autoridades ambientales.

La información secundaria revisada incluyó: Planes de Ordenamiento Territorial (POT) municipales, estudios existentes sobre la cuenca, expedientes suministrados por el AMVA y CORANTIOQUIA, e información sobre los sistemas de acueductos existentes en la cuenca solicitada a sus respectivas administraciones. Esta información es usada para complementar los datos obtenidos en el censo y para identificar las concesiones de agua vigentes.

Estimaciones de la Demanda Actual del Recurso Hídrico.

Para realizar el análisis de la demanda es necesario diferenciar los usos del agua. Existen diversas propuestas de diferenciación de los usos del agua (Art. 29 Decreto 1594 de 1984, Art. 41 Decreto 1541 de 1978); en UNAL (2001) se propone una clasificación, según la cual existen cuatro tipos de demanda: (i) doméstica, (ii) pecuaria, (iii) agrícola, (iv) industrial, comercial y otros. De acuerdo a esta clasificación y siguiendo la metodología propuesta por UPB (2002), se asignó una dotación doméstica que corresponde a 175 l/hab/día para la demanda doméstica. Igualmente en UPB (2002) se presentan dotaciones para el cálculo de la demanda hídrica del sector pecuario y agrícola, dependiendo del tipo de animal o cultivo respectivamente. La demanda industrial fue obtenida directamente de las empresas que se encuentra ubicadas en la parte baja de la cuenca, las cuales llevan registro de sus consumos, información que se comparó con las concesiones de agua vigentes. Para cuantificar la demanda hídrica en los acueductos comunitarios se utilizó la información del número de usuarios registrados, y de las concesiones de agua vigentes.

En el trabajo de campo, el cual comprendió el levantamiento de captaciones y vertimientos, censo de predios y censo agroindustrial, se encontró que en la cuenca de la quebrada Doña María hay 333 captaciones superficiales de las cuales, 211 no cuentan con una obra permanente sino que se pueden considerar como captaciones artesanales, además, 54 captaciones están ubicadas en nacimientos, y 279 se encuentran en quebradas. Así mismo se encontró que 47 captaciones son colectivas, entendiéndose por captación colectiva aquella en la cual hay más de 2 usuarios. Igualmente se encontró que 44 captaciones son de uso industrial. Se identificaron 20 captaciones subterráneas (pozos y aljibes), todas ubicadas en la parte baja de la cuenca. En la Figura 8 se muestra el mapa de captaciones superficiales en la cuenca de la quebrada Doña María.

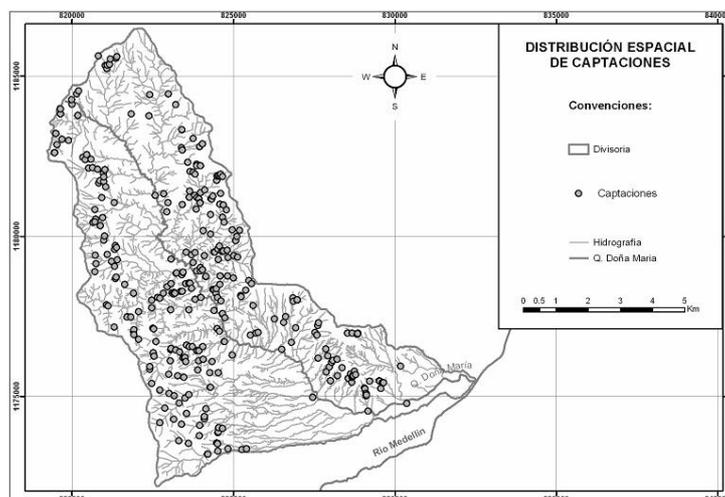


Figura 8.- Distribución espacial de captaciones en la cuenca de la quebrada Doña María.

Actualmente el caudal total demandado es de 733.11 l/s discretizado por uso de la siguiente forma: doméstico colectivo 14.15%, doméstico individual 0.16%, agropecuario colectivo 0.62%, agropecuario individual 1.09% y industrial 83.98%.

Los principales aprovechamientos industriales identificados en la cuenca incluyen crianza y sacrificio de animales, fabricación de bebidas, curtumbres y textiles, en estas tres últimas actividades el consumo de agua comprende el 79% de la demanda total de recurso hídrico sobre la cuenca de la quebrada Doña María. Excepto por la industria agropecuaria, el sector industrial se ubica predominantemente en la parte baja de la cuenca.

Estimaciones de la Demanda Futura del Recurso Hídrico.

Para cuantificar la demanda hídrica futura de los acueductos comunitarios y para efectos de la propuesta de reglamentación se proyectó la demanda a 10 años con una tasa de crecimiento de la población de 2% y se supusieron unas pérdidas del 10% en los acueductos veredales. En el caso de los acueductos que se encuentran bajo la administración de Empresas Públicas de Medellín se asumió un crecimiento de la población de 2 % en los próximos 10 años y pérdidas de 30 % debido a que estos acueductos cuentan con redes de distribución subterráneas en las cuales un daño en la red o una fuga es difícil de detectar. En el caso de las industrias se asumió como demanda futura la que estas reportaban de acuerdo a sus índices de crecimiento.

Para el cálculo de la demanda futura doméstica en las zonas que no cuentan con cobertura de los acueductos existentes se aplicó la metodología de escenarios de cambios del uso del suelo propuesta por UNAL (2001). Se definieron entonces tres escenarios como resultado del crecimiento de la población, definido en función de cambios posibles en los usos del suelo que conllevan cambios en las densidades de ocupación del territorio. Los factores que caracterizan cada escenario son: (i) cambio en el uso del suelo: debido al crecimiento de la demanda de espacio por parte de la población, está condicionado por limitaciones legales aunque pueden llegar a ser bastante significativos los procesos de ocupación informales, en particular se considera la posibilidad de expansión de las fronteras urbanas y semiurbanas. (ii) Sitio de captación: dado que la posibilidad de satisfacción de la demanda hídrica depende de la localización de los sitios sobre la red de drenaje donde pretenda captarse el agua. La localización de estos sitios de captación ficticios obedece a dos criterios: (a) que se encuentre en la parte alta de la zona a abastecer con el fin de minimizar los posibles requerimientos de bombeo; y (b) que esté cerca de la zona que abastecería, con el propósito de minimizar los costos asociados con la conducción del agua.

En el caso de las industrias ubicadas en la parte baja de la cuenca, el cálculo de la demanda futura de estas se hace de acuerdo a sus proyecciones de crecimiento hasta diciembre de 2012.

BALANCE HÍDRICO

La disponibilidad espacial de agua (identificación de zonas de déficit) se determina restando la demanda y los caudales ecológicos a la oferta natural de la cuenca que se describió en la sección de hidrología. La oferta natural utilizada es el caudal mínimo para un periodo de retorno de 10 años, que es una condición natural de escasez, asociada al periodo de recurrencia de un evento de intensidad promedio de la fase cálida del ENSO (El Niño) como se presenta en UNAL (2001).

La variable demanda se tuvo en cuenta en el cálculo de los balances hídricos de forma continua espacialmente en la cuenca, es decir, agregando la demanda total con base a mapas de direcciones de drenaje, lo cual tiene en cuenta como los usuarios de las partes altas de la cuenca están afectando a los usuarios de las partes bajas.

Desde el punto de vista de la disponibilidad hídrica, la cuenca de la quebrada Doña María posee suficiente agua para atender las demandas de uso doméstico y agropecuario de sus habitantes, utilizando captaciones por gravedad en casi todos los casos, solo se requiere de un nuevo ordenamiento en la asignación de caudales y localización de captaciones para satisfacer estas demandas.

Los problemas de abastecimiento identificados se ocasionan principalmente por las siguientes situaciones: 1) localización de bocatamos en cauces intermitentes o nacimientos. 2) Acueductos comunitarios con demandas importantes, que requieren de la asignación de nuevas captaciones. 3) En algunos casos el uso doméstico compite con el uso agropecuario e industrial. 4) Las concesiones existentes (vigentes o no), son demasiado generosas, tanto para algunos acueductos como para la industria.

Al hacer el balance hídrico para la demanda futura se obtiene como resultado que para cada uno de los escenarios planteados intensifica el déficit ya existente en algunos de los afluentes de la quebrada Doña María, se genera déficit sobre afluentes que abastecen acueductos comunitarios, y sobre el cauce principal de la quebrada, así que es claro que cambios mínimos en las densidades de ocupación del territorio en la cuenca ocasionarían posibles déficit en épocas de sequía, para lo cual debe preverse la importación de aguas de cuencas vecinas.

El caso más crítico se presenta en la zona baja de la cuenca dado que en esta se concentra el 79% de la demanda sobre el recurso hídrico y ocasiona déficit para todos los escenarios planteados esto se ilustra con mayor claridad en la Figura 10.

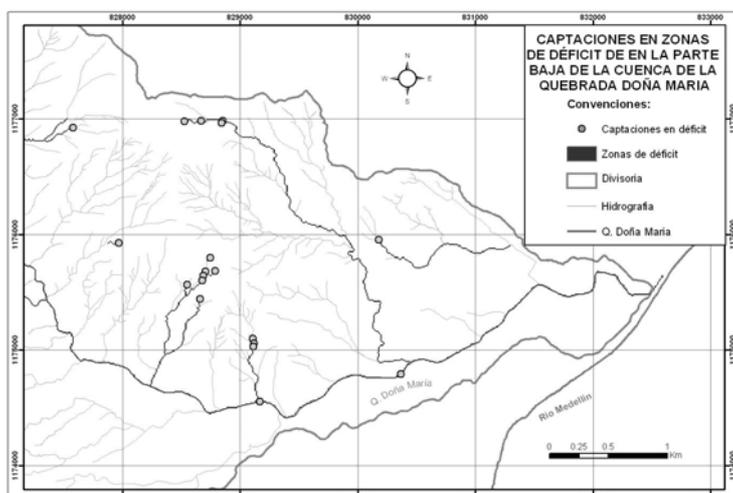


Figura 10.- Captaciones que causan déficit en la parte baja de la cuenca de la quebrada Doña María.

PROPUESTA DE REGLAMENTACIÓN

En la realización de la propuesta de reglamentación del aprovechamiento de las aguas superficiales de la quebrada se tuvieron en cuenta los siguientes criterios

- No se otorga concesión de agua para uso doméstico a usuarios que se encuentran dentro del área de cobertura de algún acueducto (Ley 142 de 1994, Art 16).
- No se otorga agua en los sitios de captación donde haya déficit (Art 37 del decreto 1541 de 1978).
- No se otorga agua cuando haya falta de información básica necesaria sobre los usos y requerimientos o demanda de agua en usos industriales y domésticos relacionados (no se atendió al censo doméstico, agropecuario y/o industrial).

- En los predios donde se encontró una vivienda y no estaba presente ninguna persona para contestar la encuesta, se le otorgó una concesión para uso doméstico de 4 personas.
- En el caudal otorgado en la reglamentación se tuvo en cuenta el orden de prioridad de los usos establecido en el artículo 41 del decreto 1541 de 1978 (prima el uso doméstico sobre el agropecuario e industrial, y el colectivo sobre el individual).
- Los usuarios existentes y las concesiones de agua otorgadas se afectan o modifican con la reglamentación, acorde a lo señalado en el artículo 114 del decreto 1541.
- Todas las aguas identificadas en la cuenca de la quebrada Doña María pueden considerarse como públicas (Art. 18 del Decreto 1541 de 1978).
- Se promueve el cambio de captaciones individuales por captaciones conjuntas.

De acuerdo a los anteriores criterios se reglamentaron 1405 corrientes en la cuenca, y el número de captaciones propuestas es de 175 que es mucho menor que las que existen en la actualidad, esto dado que se propusieron varias captaciones y acueductos veredales que agrupan a usuarios que poseen captaciones individuales. Este mapa se puede apreciar en la Figura 11.

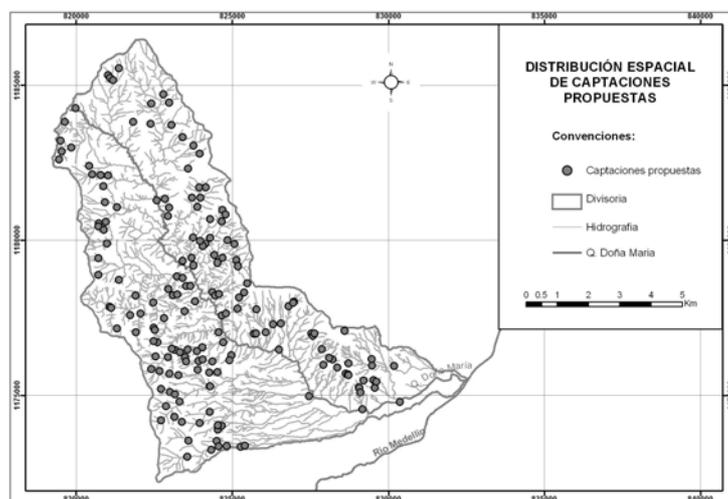


Figura 11.- Distribución espacial de las captaciones reglamentadas

Igualmente se presentaron diseños estándares de obras de control y reparto de caudal para estas agrupaciones de usuarios.

En el caso de las industrias de la zona baja se les hace una concesión condicionada, la cual establece que se les conceda todo el caudal que estas empresas tienen contemplado en su proceso de expansión siempre y cuando no ocasionen déficit, en el caso de que se presente déficit, las empresas deben recurrir a otras soluciones como utilizar fuentes de agua subterránea o almacenar agua durante los días que no tengan actividades de producción. Se recomendó a las entidades ambientales la utilización de equipos telemétricos para medir los caudales antes y después de las captaciones industriales para de esta forma controlar que sean respetados los caudales ecológicos en estas zonas.

El caudal total asignado es de 789.81 l/s discretizado por uso de la siguiente forma: doméstico colectivo 13.24%, doméstico individual 0.12%, agropecuario colectivo 0.86%, agropecuario individual 0.59% y industrial 85.19%.

MÓDULOS DE DISPONIBILIDAD Y TASAS POR USO DEL AGUA

Se desarrollaron dos módulos que se incorporaron al software ARECNAVA propiedad del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) que sirven como herramientas de apoyo al proceso de reglamentación de la cuenca de la quebrada Doña María y que son utilizables en otras cuencas.

El primero (1) es el módulo de disponibilidad hídrica que permite visualizar si una captación nueva o el cambio en la demanda de una captación existente genera déficit en algún tramo de la red de drenaje, el módulo requiere como datos de entrada los caudales captados y vertidos y su localización en la red de drenaje, los mapas de caudales mínimos y caudales ecológicos, y el mapa de direcciones de drenaje superficiales, a partir de los cuales se genera un mapa resultante que es el producto de restar a los caudales naturales los caudales ecológicos y los de demanda, y sumarle los vertimientos, este resultado debe ser positivo en todos los puntos de la red de la cuenca, de lo contrario hay una posible situación deficitaria. Las Figuras 12 y 13 muestran las interfaces creadas en el software HidroSIG (UNAL, 2003) que son similares a las desarrolladas en el ARECNAVA.



Figura 12.- Interfaz para el ingreso de Mapas en HidroSIG

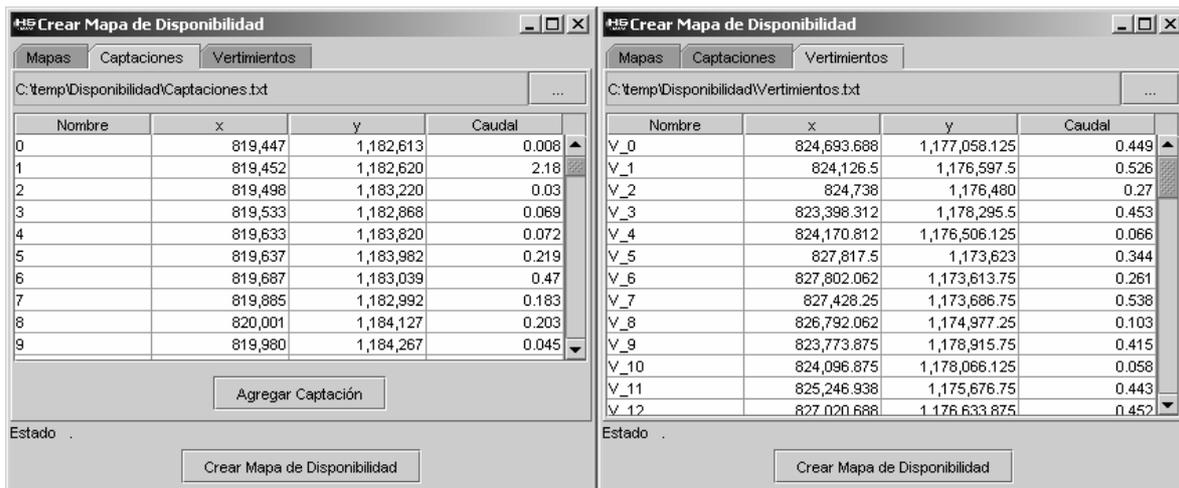


Figura 13.- Interfaz para el ingreso de las captaciones (izquierda) y vertimientos (derecha)

El segundo (2) módulo permite calcular la tasa por uso del agua para cada uno de los usuarios de la cuenca y realizar la liquidación de la misma, a partir del cálculo de unos índices y coeficientes que se encuentran en la estructura tarifaria definida en la legislación vigente (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial, 2004), y que dependen de la información de caudales medios y ecológicos, demanda, y otros factores socioeconómicos que se encuentran almacenados en la base de datos (tarifa mínima, índice de necesidades básicas insatisfechas NBI y coeficiente de inversión de la cuenca). Las Figuras 14 y 15 muestran las interfaces creadas en el software ARECNAVA para este fin.

AGRADECIMIENTOS

Al Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) entidad que financió el proyecto de reglamentación.

✓ Aceptar ↶ Cancelar

Cálculo de Variables para liquidar Tasa por Uso

Cuenca: Q. DOÑA MARIA

Año: 2007

Costos Programa de Ahorro: []

Costos cubiertos por la tarifa mínima: []

IPC del Año anterior: []

Oferta Natural Subterránea (l/s): 193.9

Oferta Natural Superficial (l/s): 776.932

Caudal Ecológico (l/s): 496.168

Factor de Reducción por Calidad: 0.25

Figura 14.- Interfaz para el cálculo de las variables necesarias para liquidar la tasa por uso

Preliquidación1 - Diálogo Web

CM0233

Empresa	INDUSTRIA DE MOLDURAS EL TRIUNFO.	Volumen captado total superficial (m3)	40.000,00
Documento	8309478	Volumen vertido total (m3)	19.699,20
CM	CM0233	FOP	0,51
Nombre del proyecto	GONZALO CUERVO-		
Dirección	CRA 53A N° 50-89		
Teléfono	000		
Tipo	Fuente	Uso	Resolución
Superficial	Q. DOÑA MARÍA	INDUSTRIALES O	Volumen
			Dias
			Vol (m3)
			IE
			FR
			TU
			Valor
			11.368

CM8946

Empresa	PARQUEADERO LOPCAR--	Volumen captado total superficial (m3)	0,00
Documento		Volumen vertido total (m3)	0,00
CM	CM8946	FOP	1,00
Nombre del proyecto	PARQUEADERO LOPCAR--		
Dirección			

Figura 15.- Interfaz que muestra la preliquidación para una cuenca y un periodo determinado

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron los resultados del proceso de reglamentación del uso de las aguas superficiales de la cuenca de la quebrada Doña María, donde la información hidrológica y de demanda hídrica era escasa. A continuación se mencionan las conclusiones de cada uno de los aspectos de este trabajo.

Respecto a la Hidrología

La escasez o falta absoluta de información, no impide la utilización de metodologías que permiten calcular la oferta hídrica natural de una cuenca que se encuentra en proceso de reglamentación, como es el caso del Modelo de Tanques que permite reconstruir las series de caudal natural a partir de registros de lluvia.

Es importante utilizar diferentes metodologías para el cálculo de caudales en cuencas con información escasa, y poder así tener herramientas de decisión para la elección de los caudales de diseño.

Respecto a la Demanda

En la cuenca de la quebrada Doña María predominan (en cantidad de captaciones y usuarios) la demanda para uso doméstico y los aprovechamientos individuales. El 86% de las captaciones

inventariadas son para uso individual, y el 13% son para uso industrial. Así mismo, predominan las captaciones informales sobre las técnicamente construidas.

Los principales aprovechamientos industriales identificados en la cuenca incluyen crianza y sacrificio de animales, fabricación de bebidas, curtimbres y textiles, en estas tres últimas actividades el consumo de agua comprende el 79% de la demanda total de recurso hídrico. Excepto por la industria agropecuaria, el sector industrial se ubica predominantemente en la parte baja de la cuenca.

Respecto a los Balances Hídricos y Proceso de Reglamentación

Los análisis de oferta y demanda hídrica sugieren que la cuenca puede abastecer las demandas domésticas, pecuarias y agrícolas actuales. Las concesiones existentes (vigentes o no), son demasiado generosas, tanto para algunos acueductos como para la industria.

El análisis de oferta y demanda hídrica futura sugiere que, ante posibles aumentos en las densidades de ocupación del territorio, se requerirán fuentes alternas a la quebrada Doña María para el abastecimiento de la demanda mediante captaciones por gravedad, o bombeos de agua superficial, o uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas, entre otros.

En el proceso de reglamentación se redujo el número de captaciones de 333 existentes a 175 reglamentadas, formando grupos de hasta 5 usuarios en las zonas de déficit. Igualmente se presentaron diseños estándares de obras de control y reparto de caudal para estas agrupaciones de usuarios.

Se debe hacer uso de estaciones de medición de tipo telemétrico aguas arriba de las captaciones de las industrias de la parte baja de la cuenca para controlar que estas no tomen más de los caudales otorgados.

REFERENCIAS

- Chávez, B. y Jaramillo, A.** (1998). "Regionalización de la Temperatura del Aire en Colombia". Cenicafe.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W.** (1994). "Hidrología Aplicada". Ed. McGraw-Hill.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial** (2004). "Resolución Número 0865 de Julio 22 de 2004". Bogotá, Colombia. 32p.
- Universidad Nacional de Colombia (UNAL) y Unidad de Planeación Minero - Energética (UPME)** (2000). "Atlas Hidrológico de Colombia". Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín, Colombia.
- Universidad Nacional de Colombia (UNAL)** (2001). "Diseño de la Metodología para la Formulación de Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas (PIOM)". Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín, Colombia.
- Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (UNAL)** (2003). "Manual de usuario de HidroSIG - Versión 3.0 Beta". Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Medellín, Colombia.
- Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (UNAL), Universidad de Antioquia, Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), Universidad de Medellín y Área Metropolitana del Valle de Aburrá** (2004). "Diseño y Puesta en Marcha de la Red de Monitoreo Ambiental en la Cuenca Hidrográfica del Río Medellín en Jurisdicción del Área Metropolitana". Medellín, Colombia.
- Universidad Pontificia Bolivariana (UPB)** (2002). "Demanda y Usos del Agua, Índices de Consumo y Planes de Acción para la Implementación de la Ley 373 de 1997 en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA". Grupo de Investigaciones Ambientales GIA-UPB. Medellín, Colombia.
- Vélez, J. I.** (2001). "Desarrollo de un Modelo Hidrológico Conceptual y Distribuido Orientado a la Simulación de las Crecidas". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos y Puertos. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Valencia, España.