

## ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA CON INFORMACIÓN ESCASA EN ECOSISTEMAS ESTRATÉGICOS

### ESTIMATION OF THE HYDRIC SUPPLY WITH SCARCE INFORMATION IN STRATEGIC ECOSYSTEMS

Leodán Andrés Otaya Burbano<sup>1</sup>; Guillermo León Vásquez Velásquez<sup>2</sup> y Guillermo de Jesús Bustamante Carmona<sup>3</sup>

**Resumen:** Este estudio se realizó en el Área de Manejo Especial (AME) "Sistema de Páramos y Bosques Altoandinos del Noroccidente Medio Antioqueño", localizada en el Departamento de Antioquia, Colombia. El AME tiene una extensión total de 34.358,74 ha. Como objetivo principal de esta investigación se propuso estimar la oferta ambiental del recurso hídrico que se origina en dicho sistema, y como objetivos secundarios estimar el caudal medio mensual y anual que se origina en el sistema, así como también estimar el caudal mínimo anual para diferentes periodos de retorno. Para lograr estos objetivos se empleó el "procedimiento de contabilidad de aguas para efectuar el balance hídrico detallado según Holdridge", y el método de regionalización de características medias. Como resultados se determinó para el AME una precipitación de 665.288.946,00 m<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>, una evapotranspiración real de 242.363.796,00 m<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup> y una escorrentía media anual de 422.925.149,57 m<sup>3</sup>.año<sup>-1</sup>. Obteniéndose un coeficiente de escorrentía del 63,6%, lo cual significa que el 63,6% de la precipitación se convierte en escorrentía y el 36,4% restante se pierde por evapotranspiración. Se concluye que el área de estudio presenta una precipitación media anual (1.847,4 mm), menor que la precipitación media anual de Colombia (3.000 mm) y mayor que el promedio anual de Suramérica (1.600 mm); y que la oferta hídrica del sistema estudiado (39,032 L·s<sup>-1</sup>.km<sup>2</sup>), es menor que la oferta hídrica promedio de Colombia (58 L·s<sup>-1</sup>.km<sup>2</sup>) y mayor que la oferta hídrica promedio suramericana (21 L·s<sup>-1</sup>.km<sup>2</sup>).

**Palabras claves:** Balance hídrico, bosques altoandinos, páramos, oferta hídrica, regionalización.

**Abstract.** This study was conducted in the "Paramo and High Andean Forest System of the Middle Northwest of Antioquia" Special Management Area (SMA), located in the Department of Antioquia, Colombia. The SMA has a total extension of 34.358,74 ha. The main object of this investigation was to estimate the environmental supply of hydric resource that originate in this system and with secondary objectives the estimation of monthly and annual average originate in the system, as well as to estimate the annual minimal volume for different periods of return. To achieve these objectives the "water accounting procedure to accomplish a detailed water balance according to Holdridge" and the regionalization of the mean characteristics method were used. As results for the SMA, a precipitation of 665.288.946,00 m<sup>3</sup>.year<sup>-1</sup>, a real evapo-transpiration of 242.363.796,00 m<sup>3</sup>.year<sup>-1</sup> and an annual run-off average of 422.925.149,57 m<sup>3</sup>.year<sup>-1</sup>. A run-off coefficient of 63,6% was obtained, which signifies that 63,6% of the precipitation becomes run-off and the 36,4% remainder is lost by evapotranspiration. As conclusion the study area has an annual precipitation mean, (1.847,4 mm), that is less than the annual precipitation average for Colombia (3.000 mm) and greater than the annual average of South America (1.600 mm); and the hydric availability (39,032 L·s<sup>-1</sup>.km<sup>2</sup>) of the studied system is less than the hydric availability mean for Colombia (58 L·s<sup>-1</sup>.km<sup>2</sup>) and greater than the hydric availability mean for South America (21 L·s<sup>-1</sup>.km<sup>2</sup>).

**Key words:** Hydric balance, High Andean forests, hydric supply, hydric balance, paramos, regionalization.

Se presenta una metodología para estimar la oferta hídrica en un ecosistema estratégico cuando se cuenta con información escasa, mediante el estudio

de uno de ellos como lo es el Área de Manejo Especial (AME) "Sistema de Páramos y Bosques Altoandinos del Noroccidente Medio Antioqueño",

<sup>1</sup> Ingeniero Forestal. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1027, Medellín, Colombia. <laotaya@unal.edu.co>

<sup>2</sup> Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1027, Medellín, Colombia. <glvasque@unal.edu.co>

<sup>3</sup> Ingeniero Forestal. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1027, Medellín, Colombia. <gjbustam@unal.edu.co>

Recibido: Noviembre 7 de 2007; aceptado: abril 14 de 2008.

localizada en el Departamento de Antioquia, Colombia, teniendo como objetivo principal, estimar la oferta ambiental del recurso hídrico que se origina en dicho sistema, y como objetivos secundarios estimar el caudal medio mensual y anual que se origina en el sistema, así como también estimar el caudal mínimo anual para diferentes periodos de retorno.

El Área de Manejo Especial (AME) "Sistema de Páramos y Bosques Altoandinos del Noroccidente Medio Antioqueño", en la categoría de Distrito de Manejo Integrado de los Recursos Naturales Renovables, constituye una de la áreas protegidas de la región antioqueña que resulta ser estratégica para la preservación del ciclo hidrológico, dado que allí tienen origen importantes fuentes de agua que abastecen y satisfacen las necesidades básicas de las poblaciones asentadas en el área y su zona de influencia y de otras, que indirectamente reciben igual beneficio de la oferta hídrica, como lo es una importante concentración de población ubicada en la ciudad de Medellín.

La oferta hídrica que produce el AME aporta al sistema de aprovechamiento múltiple del embalse río Grande II. Esta agua es aprovechada por las Empresas Públicas de Medellín para el abastecimiento del acueducto de la ciudad y algunos municipios del Valle de Aburrá, también es utilizada para la generación de energía, mediante las centrales hidroeléctricas de Tasajera y Niquía, generando alrededor de 324 MW. Posteriormente, el agua es utilizada para la recreación masiva en el "Parque de las Aguas" ubicado en el municipio de Girardota y su destino final es el río Medellín, donde cumple una importante función de dilución de contaminantes, contribuyendo parcialmente a la recuperación del río (Corantioquia, 1997).

En Colombia una de las mayores dificultades para realizar estudios de estimación de la oferta hídrica es la falta de información, ya que se tienen pocas estaciones climatológicas y meteorológicas; por lo tanto, la aplicación de modelos que estiman esta oferta hídrica empleando información escasa resulta muy interesante e importante para elaborar planes de manejo de las cuencas hidrográficas y hacer valoraciones económicas del recurso hídrico ofrecido por ellas (Vélez, Poveda y Mesa, 2000).

En Colombia, es necesario contar con información actualizada y cada vez más precisa, sobre la distribución regional y local de sus disponibilidades de agua y la distribución territorial de sus usos, a fin de precisar y ordenar las áreas con mayores peligros de desabastecimiento y adelantar las acciones de planificación y regulación del uso del recurso hídrico (Vélez, Poveda y Mesa, 2000).

Debido a su ubicación geográfica y a sus condiciones de relieve, Colombia tiene una precipitación media anual de 3.000 mm, que representa una riqueza importante de recursos hídricos, cuando es comparada con el promedio mundial de precipitación anual, equivalente a 900 mm y con el promedio anual de Suramérica, del orden de los 1.600 mm (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).

Si se relaciona el promedio anual de lluvias en Colombia, con su superficie continental (1.141.748 km<sup>2</sup>), se tiene un volumen anual de precipitación de 3.425 km<sup>3</sup>, equivalente al 3% del volumen de precipitación anual en el mundo y al 12% en el continente sudamericano. La característica de la precipitación en Colombia consiste en que el 88% del territorio registra lluvias anuales superiores a 2.000 mm, con un promedio anual cercano a los 3.000 mm (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).

Según los estimativos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2000b) con base en la evaluación de los rendimientos hídricos de las 45 unidades hidrográficas de Colombia, la oferta hídrica total supera los 2.000 km<sup>3</sup> al año, correspondientes a 57.000 m<sup>3</sup> anuales por habitante. En cuanto a la oferta neta, en la cual se incorporan reducciones tanto por alteración de la calidad como por regulación natural, se alcanza apenas los 1.260 km<sup>3</sup> que corresponden a una disponibilidad de 34.000 m<sup>3</sup> por habitante al año.

De acuerdo con los estimativos realizados a partir del balance hídrico por parte del IDEAM (2002), el ecosistema de Alta Montaña en Colombia tiene un área de 4.686.751 ha, y cuenta con un volumen de oferta hídrica de 66,5 km<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup>, que corresponde a un caudal de 2.109 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, lo cual representa el 3% de la oferta hídrica total nacional.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio.** El Área de Manejo Especial (AME) "Sistema de Páramos y Bosques Altoandinos del Noroccidente Medio Antioqueño", está ubicada en el departamento de Antioquia, Colombia. Dicha AME ocupa principalmente territorio de los municipios de Belmira y San José de La Montaña, y parte de Entreríos, San Pedro de Los Milagros y San Andrés de Cuerquia en la zona del altiplano norte Antioqueño, y pequeñas áreas de los municipios de Sabanalarga, Liborina, Olaya, San Jerónimo y Sopetrán, ubicados estos últimos sobre el cañón del río Cauca, en la zona occidental del sistema. El AME fue delimitada por Corantioquia (1997), y está conformada por la parte alta de 25 subcuencas, que en su totalidad abarcan una extensión de 34.358,74 ha. Dichas subcuencas forman parte de dos grandes cuencas, la del río Cauca y la del río Grande.

De acuerdo con el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge, en el Sistema de Páramos y Bosques Altoandinos del Noroccidente Medio Antioqueño existen cuatro zonas de vida: bosque

muy húmedo premontano (bmh-PM), bosque húmedo montano bajo (bh-MB) o tierra cafetera húmeda; bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB) o tierra fría muy húmeda y bosque pluvial montano (bp-M), en las partes altas del sistema, por encima de los 3.000 msnm (Corantioquia, 1997).

**Estimación de los caudales medios.** Para la estimación de los caudales medios de las subcuencas del AME se empleó el "procedimiento de contabilidad de aguas para efectuar el balance hídrico detallado según Holdridge" (Tabla 1). Que es el resultado de la combinación del sistema de contabilidad por meses del balance hídrico propuesto por Thornthwaite, con ciertas modificaciones, y el empleo de las fórmulas derivadas por Holdridge para el cálculo de la evapotranspiración potencial con base en la biotemperatura media mensual, por medio del cual es posible llegar a una aproximación mas realista del balance hídrico durante el año promedio o para cualquier año o parte de año específico para el cual existen datos de temperatura y precipitación (Ewel y Madriz, 1968).

**Tabla 1.** Procedimiento de contabilidad de aguas para efectuar el balance hídrico detallado según Holdridge.

Variables	Enero	Febrero	Marzo	...Diciembre	Año
1 Biotemperatura (°C)					
2 Evapotranspiración potencial (mm)					
3 Precipitación (mm)					
4 Evapotranspiración real (mm)					
5 Exceso de agua (mm)					
6 Recarga de agua del suelo (mm)					
7 Reducción de agua del suelo (mm)					
8 Humedad en el suelo al final del mes (mm)					
9 Escorrentía total (mm)					
10 Déficit de humedad del suelo al final del mes (mm)					
11 Déficit de precipitación al final del mes (mm)					
12 Déficit de humedad total (mm)					

Donde:

ITEM 1: Datos obtenidos a partir de estaciones climatológicas.

ITEM 2: Se calculan como  $T^{\circ}\text{bio} * K$ , donde  $K = 5$  para meses de 31 días,  $K = 4,84$  para meses de 30 días, y  $K = 4,52$  para febrero.

ITEM 3: Datos obtenidos a partir de estaciones climatológicas.

ITEM 4: Primero se calculan los items 5 y 11. Se exploran los meses contiguos en que el exceso de agua (item 5) acumulado sume la máxima capacidad de almacenamiento de agua en los suelos. Esta capacidad máxima de almacenamiento se considera igual al 10% de la precipitación total anual para las zonas de vida de los pisos basal Tropical y Premontano, del 7,5% para las del piso Montano Bajo, y del 5% para las del piso Montano. Los cálculos se inician en el mes siguiente al que la

suma da igual o superior a la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo y se registra en el ítem 8 (el suelo termina el mes a su capacidad de campo). Luego para ese mes, la evapotranspiración real (ítem 4) es igual a la evapotranspiración potencial (ítem 2), y el exceso de agua (ítem 5) ya calculado es igual a la escorrentía total (ítem 9). El cálculo se repite para cada mes subsiguiente en el que la precipitación sea igual o exceda a la evapotranspiración potencial; durante estos meses, la humedad del suelo permanece a capacidad de campo y todos los excedentes sobre la evapotranspiración real constituyen escorrentía. En los meses en que la precipitación sea menor que la evapotranspiración potencial, se asume que toda la precipitación constituye evapotranspiración. El agua que se requiere para completar la evapotranspiración real se toma del agua disponible en el suelo y se anota en la casilla del ítem 7 (reducción de agua del suelo); para esto se asume que (1) el 30% de la capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo se evacúa (hasta llegar al 70% de esa capacidad máxima), y (2) del 70% restante, que es la reserva actual del suelo, solo se evapotranspira hasta la mitad. (Continuar con el ítem 6).

ITEM 5: Precipitación (ítem 3) menos evapotranspiración potencial (ítem 2), para todos aquellos meses en que la precipitación exceda a la evapotranspiración potencial.

ITEM 6: (Viene del ítem 4). En el primer mes en que la precipitación exceda la evapotranspiración potencial, empatando de diciembre a enero si se hace necesario, el exceso de agua se usa primero para recargar el agua del suelo (que obviamente es menor que la capacidad de campo). Habrá agua para escorrentía sólo si el suelo se completa a capacidad de campo, lo cual puede requerir desde uno hasta varios meses. El balance de humedad en el suelo se computa para cada mes (ítem 8) y déficit de humedad del suelo al final del mes, si lo hubiere, como ítem 10.

ITEM 11: Precipitación (ítem 3) menos evapotranspiración potencial (ítem 2), para todos aquellos meses en que la precipitación sea menor a la evapotranspiración potencial.

ITEM 12: Es la suma de los ítems 10 y 11, e indica la cantidad de precipitación que se requiere para recargar la reserva de humedad del

suelo y para completar la demanda total de evapotranspiración.

**Comprobación final.** La sumatoria de los 12 valores de evapotranspiración real, mas la sumatoria de los 12 valores de escorrentía, debe ser igual a la precipitación total anual.

La escorrentía total (mm) (Ítem 9), se convierte en caudal ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) correspondiente a cada mes, al pasar los milímetros (mm) a metros, éstos a su vez se multiplican por el área ( $\text{m}^2$ ) correspondiente a cada subcuenca obteniéndose un caudal mensual ( $\text{m}^3 \cdot \text{mes}^{-1}$ ), luego se divide este último caudal por el siguiente resultado:

$(60 \text{ segundos}) * (60 \text{ minutos}) * (24 \text{ horas}) * (\text{número de días que tiene cada mes})$ , obteniéndose finalmente el caudal por segundo ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) correspondiente a cada subcuenca y a cada mes.

**Estimación de caudales mínimos.** Bolaños (1995) realizó una regionalización de caudales mínimos en el departamento de Antioquia, Colombia, utilizando series históricas de caudales mínimos, aplicando técnicas de manejo de información escasa en regiones de Antioquia donde existía poco o ningún registro hidrológico, de tal manera que dicha investigación permitiera estimar caudales mínimos de diferentes períodos de retorno. Como resultado del estudio mencionado, el departamento de Antioquia quedó dividido en cinco zonas importantes donde predominan las distribuciones Log-Normal II y Gumbel por momentos. Para este estudio, el AME se encuentra localizada en la zona 3 (Conformada por las cuencas del río Cauca, Medellín, Porce y parte baja del Nechí), correspondiendo a esta zona la distribución Log-Normal II; para esta zona el método *Step-Wise* seleccionó ecuaciones en términos del área y la precipitación para la media y en función del área para la desviación estándar. Las ecuaciones para la zona 3 son las siguientes:

$$\begin{aligned} \mu &= 10^{-4,752} \cdot A^{0,960} \cdot P^{0,883} & R &= 0,995; \text{v.r.e} = 0,014 \\ \sigma &= 10^{-2,509} \cdot A^{1,052} & R &= 0,983; \text{v.r.e} = 0,051 \end{aligned}$$

Donde:

$\mu$  : media estimada anual de los caudales mínimos ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\sigma$ : desviación estándar estimada anual de

los caudales mínimos ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $A$ : área de la cuenca ( $km^2$ );  $P$ : precipitación promedio sobre la cuenca (mm/año);  $R$ : coeficiente de correlación;  $v.r.e$ : varianza residual estimada.

Para esta región el coeficiente de correlación de la ecuación es muy bueno y la varianza residual estimada es muy baja.

Para determinar el caudal mínimo instantáneo asociado a cierto periodo de retorno, se usó la ecuación del factor de frecuencia dada como (Chow, Maidment y Mays, 1994).

$$Q_{TR} = \mu - K\sigma$$

Donde:

$Q_{TR}$ : caudal mínimo para un período de retorno  $TR$  ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $\mu$ : media estimada anual de los caudales mínimos ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $\sigma$ : desviación estándar estimada anual de los caudales mínimos ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $K$ : factor de frecuencia que depende de la distribución y del periodo de retorno.

Para encontrar el valor del factor de frecuencia  $K_T$  se utilizaron las tablas de "probabilidad acumulada de la distribución normal estándar" que aparecen en la literatura, a continuación se presenta un ejemplo: Si el periodo de retorno  $TR = 25$ , entonces  $p = 1/25 = 0,04$ , entonces  $1 - 0,04 = 0,96$ , con este último valor se va a la tabla y se le ubica en los valores de probabilidad acumulada, encontrando que  $z = 1,75$ , el cual es el valor que corresponde al factor de frecuencia  $K_T$ .

El periodo de retorno ( $TR$ ) asociado al factor de frecuencia  $K_T$ , hace referencia a la probabilidad de que un evento de determinada magnitud sea igualado, excedido o no superado una vez en promedio durante  $n$  periodos de  $TR$  años. En la Tabla 2 se presentan los factores de frecuencia  $K$  correspondientes a cada periodo de retorno  $TR$ , los cuales se emplearon para la estimación de los caudales mínimos.

**Estimación de la temperatura media anual.**

Debido a que en el área de estudio no se encontraron estaciones climatológicas que brindaran información de la temperatura media mensual y anual, fue necesario usar un procedimiento de estimación.

**Tabla 2.** Factores de frecuencia  $K$  correspondientes a cada periodo de retorno  $TR$ .

$TR$	10	15	20	25
$K$	1,28	1,50	1,64	1,75

Como ya es conocido, la temperatura media del aire guarda relación inversa con la altitud. De acuerdo con esto el método de regionalización propuesto por el Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé), (Chavez y Jaramillo, 1999), es una buena manera de estimar la temperatura en cualquier lugar del país.

Esta regionalización se hizo de acuerdo a la región geográfica tomando como información básica los registros de temperatura media mensual del aire en superficie de 1.002 estaciones, de ellas 105 pertenecen a la región de la cuenca del río Cauca, a la cual pertenece el área de este estudio; ésta se encuentra localizada entre  $5^\circ$  y  $7^\circ$  de latitud norte, por lo tanto se empleó la siguiente ecuación:

Región cuenca del río Cauca,  $5^\circ - 7^\circ$  de latitud norte:

$$T_{MEDI A} = 29,38 - 0,0061 \cdot A$$

Rango de altitud, (m) = 120 – 4.400  
 $R^2 = 0,98$

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

Para determinar la altura promedio de cada sub-cuenca, se emplearon los mapas elaborados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) escala 1:25.000 correspondientes al AME, observando para ello las cotas representadas en las curvas de nivel.

**Estimación de la precipitación media anual.**

Para estimar la precipitación media anual incidente en cada subcuenca, se empleó la información de 24 estaciones pluviográficas, ubicadas entre los 530 msnm y 3.050 msnm., con esa información se realizaron isoyetas medias anuales cada 100 milímetros, se midió el área presente de cada subcuenca entre las isoyetas, se promedió la precipitación entre isoyetas que pasaban por la subcuenca y finalmente se procedió a calcular la precipitación media ponderada por el área total de la subcuenca.

**Validación de resultados.** Para validar los resultados encontrados por medio del "procedimiento de contabilidad de aguas para efectuar el balance hídrico detallado según Holdridge" se analizó una cuenca en especial, la del río Chico que forma parte del área de estudio, dicho río es afluente del río Grande, empleando para ello datos reales de una estación hidrométrica presente en la zona, en este caso la estación RG-10 "La Ye", comparando los caudales medios mensuales del río Chico registrados durante 19 años con los encontrados por medio de los métodos de precipitación – escorrentía de Holdridge, de Thornthwaite, de Blaney – Criddle y de García – López. A continuación se describen los métodos empleados:

**Estimación de caudales medios por el método Blaney – Criddle.** En 1950 Blaney – Criddle elaboró una fórmula para el cálculo de la evaporación que relaciona la temperatura con la humedad relativa y la duración del día. Esta ecuación fue desarrollada para las condiciones existentes en el Oeste de los Estados Unidos, pero su uso se ha generalizado en regiones de distintas latitudes por su facilidad de cálculo (Vélez, Poveda y Mesa, 2000). Este método se expresa matemáticamente como sigue:

$$ETr = p \cdot (0,014T^2 + 0,363T + 1,95)$$

Donde:

$ETr$  = evapotranspiración de referencia, en mm/mes;  $p$  = porcentaje de horas de brillo solar mensual con respecto al año;  $T$  = temperatura media mensual del aire, en °C.

Considerando la integración sobre un intervalo de tiempo largo, de tal manera que los cambios en las cantidades de almacenamiento de agua en la atmósfera y el almacenamiento de agua en el suelo sean despreciables (Poveda y Mesa, 1995), se tiene que el promedio a largo plazo del caudal será:

$$Q = P - E$$

Donde:

$Q$  = caudal medio mensual de la cuenca en mm;  $P$  = precipitación media mensual de la cuenca en mm;  $E$  = evapotranspiración media mensual de la cuenca en mm.

La anterior fórmula se empleó para el cálculo de los caudales medios mensuales para los métodos de Blaney – Criddle, Thornthwaite y García – López.

**Estimación de caudales medios por el método Thornthwaite.** La ecuación de Thornthwaite, se basa en los numerosos experimentos efectuados con lisímetros y da una estimación de la evaporación potencial. Esta fue modificada por el mismo autor en 1948, donde relaciono datos de temperatura y evapotranspiración potencial en regiones irrigadas del Oeste de Estados Unidos (Vélez, Poveda y Mesa, 2000).

Los factores tomados de este cálculo son la temperatura media mensual y la temperatura media anual, dado por la siguiente expresión:

$$ETP = 1,6 \left( 10 \frac{T}{I} \right)^a$$

Donde:

$ETP$  = evaporación potencial en cm/mes;  $T$  = temperatura media mensual en °C;  $I$  = índice calórico anual dado por la siguiente fórmula:

$$I = 12 \left( \left( \frac{T_{anual}}{5} \right)^{1,514} \right)$$

$a$  = es un exponente dado en función de  $I$ , así:

$$a = (675,10^{-9})I^3 - (771,10^{-7})I^2 + (179,10^{-4})I + 0,492$$

**Estimación de caudales medios por el método García – López.** Por medio de esta ecuación se calcula la evaporación potencial. Esta basada en la correlaciones hechas entre la evaporación media en 6 estaciones netamente tropicales dentro del rango latitudinal 15° N y 15° S y la temperatura (válido sólo para temperaturas mayores o iguales a 10°C) y la humedad relativa (Vélez, Poveda y Mesa, 2000), obteniendo la ecuación:

$$ETP = 1,21 \cdot 10^n (1 - 0,01H_r) + 0,21T - 2,3$$

Donde:

$ETP$  = evaporación potencial en mm/día;  $n$  = exponente dado por:

$$n = \frac{7,45T}{(234,7 + T)}$$

$T$  = temperatura media mensual;  $H_R$  = humedad relativa de la zona.

La zona donde se encuentra localizada la cuenca del río Chico tiene una humedad relativa media del 76%.

**Corrección por rezago.** Los anteriores métodos con los cuales se estiman los caudales medios mensuales, no tiene en cuenta el rezago en la relación precipitación-escorrentía, considerando un rezago de "0" en sus cálculos, por lo cual se debe hacer una corrección a la escorrentía total. En este estudio se emplearon los registros de caudales medios mensuales de 19 años del río Chico, estación RG-10 "La Ye", para elaborar una gráfica con los porcentajes resultantes al dividir los caudales mensuales con respecto al caudal total anual en el eje "Y" y los meses del año en el eje "X", luego se graficaron sobre ella los porcentajes resultantes al dividir los caudales mensuales corregidos por rezago con respecto al caudal total anual corregido por rezago de la cuenca, el rezago se determinó

para cuatro meses contiguos, ésta corrección se hizo variando los porcentajes de rezago, hasta que la suma de los cuadrados del error, al comparar los valores de las dos gráficas, fuera lo más pequeña posible y la gráfica correspondiente de la subcuenca presentara un comportamiento lo más similar posible al presentado por la gráfica de los registros de la estación RG-10 "La Ye". La corrección por rezago debe hacerse mes a mes. Si se hace para cuatro meses contiguos, como en este estudio, significa que por ejemplo la escorrentía total que se genera en el mes de enero se reparte en porcentajes o proporciones entre los cuatro meses contiguos, según lo determinado, incluido el porcentaje correspondiente a este mismo mes. En la Tabla 3 se indica la estación empleada para corregir por rezago los valores de escorrentía total obtenidos mediante los métodos antes mencionados. En la Tabla 4 se presentan los caudales medios mensuales multianuales registrados en la estación RG-10 "La Ye".

**Tabla 3.** Características de la estación empleada para la corrección por rezago en la estimación de caudales medios mensuales.

Estación				Localización	
Nombre	Fecha de Inicio	Altura (msnm)	Municipio	Coordenadas	
				X	Y
RG-10 "La Ye"	1982	2.340	Belmira	1.210.566	1.166.876

**Tabla 4.** Caudales medios mensuales multianuales ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ), medidos en la estación RG-10 "La Ye".

Meses												
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
3,46	3,27	3,72	4,83	5,76	4,69	3,99	3,97	4,95	6,78	6,52	5,01	56,95

**Crterios para Evaluar los Diferentes Métodos**

**Relación porcentual y suma de los cuadrados del error.** Se determinó una relación porcentual con el fin de apreciar numéricamente la proporción existente entre los valores mensuales de caudal registrados en la estación RG – 10 "La Ye" ( $ETP_E$ ) y los valores de caudal estimados con los diferentes métodos ( $ETP_C$ ), mediante el cálculo de la expresión:

$$\frac{ETP_E}{ETP_C} \cdot 100\%$$

Para la evaluación de la bondad de la relación porcentual se tomaron como marco de referencia los resultados obtenidos por varios investigadores en diferentes países, según los cuales esta proporción ha fluctuado entre 70% y 80% (Guzmán y Castro, 1985).

Tomando como referencia los datos registrados en la estación RG – 10 “La Ye”, se calculó la suma de los cuadrados del error para cada uno de los datos estimados con los respectivos métodos.

**Prueba de rangos múltiples.** Apoyados por el programa estadístico Statgraphics Plus® 3.0, se realizó una prueba de rangos múltiples entre las medias, para establecer si existen o no diferencias estadísticas entre los diferentes métodos empleados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Temperatura media.** Se determinó que el AME presenta alturas medias entre 2.200 y 3.100 msnm, con una altura promedio para dicha zona de 2.743,24 msnm. Correspondiendo a tales alturas, temperaturas medias anuales entre 16°C y 10,5°C, con una temperatura promedio anual para el área de estudio de 12,6°C.

Se encontró que en general los meses más fríos son febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre y los meses más calurosos son mayo, y junio.

**Precipitación media.** El rango de precipitación media anual en el AME está entre 1.552,70 mm·año<sup>-1</sup> y 2.075,50 mm·año<sup>-1</sup>, con una precipitación media anual para toda la zona de 1.847,4 mm·año<sup>-1</sup>, encontrándose que en general a mayor altura es mayor la precipitación.

El área de estudio presenta una precipitación media anual menor que la precipitación media anual de Colombia (3.000 mm) y mayor que el promedio anual de Suramérica (1.600 mm).

Si se relaciona el promedio anual de lluvias del área de estudio (1.874,4 mm·año<sup>-1</sup>) con su superficie (34.358,74 ha), se tiene un volumen anual de precipitación de 0,66 km<sup>3</sup>, equivalente al 0,019% del volumen de precipitación anual en Colombia.

En general el régimen de precipitación en el AME se caracteriza por presentar dos periodos lluviosos intercalados por dos periodos con menor precipitación o “veranillos” que ocurren en diciembre – marzo el primero y en julio – agosto el segundo, perteneciendo este régimen a los patrones climáticos a nivel continental, ocasionados por la Zona de Convergencia Intertropical, que se manifiesta por

una gran inestabilidad termodinámica originando abundante nubosidad tipo convectivo, vientos variables de poca intensidad, un alto nivel pluviométrico y un gran contenido de vapor de agua en la atmósfera (Empresas Públicas de Medellín (EPM), 1991).

**Caudales medios.** De acuerdo a los resultados obtenidos, la oferta hídrica anual del Área de Manejo Especial (AME) “Sistema de Páramos y Bosques Altoandinos del Noroccidente Medio Antioqueño” es de 422.925.149,57 m<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup>, equivalente a un caudal medio instantáneo de 13,41 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>.

La oferta hídrica que se produce en el AME está disponible para una porción del territorio de la región del “Medio Cauca” y de la región del río Grande, correspondiendo a la primera una oferta anual de 240.729.236,532 m<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup>, y a la segunda un caudal de 182.195.913,047 m<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup>. El IDEAM (2000a) estimó para la cuenca del “Medio Cauca” una oferta media anual de 29.942 millones de metros cúbicos, y para la cuenca del río Nechí una oferta media anual de 26.623 millones de metros cúbicos. De acuerdo a lo anterior, la oferta hídrica del AME aporta con un 0,804% a la oferta media anual de la cuenca del “Medio Cauca” y con un 0,684% a la oferta media anual de la cuenca del río Nechí, ya que el río Grande es afluente del río Porce y éste a su vez del río Nechí.

La cuenca del Río Grande está localizada en la zona central del Departamento de Antioquia, entre 6° y 7° de latitud Norte y 75° y 76° de longitud Oeste, en jurisdicción de los municipios de San Pedro, Entreríos, Belmira, Don Matías y Santa Rosa de Osos. La estación RG-8 ubicada aguas abajo de la confluencia de los ríos Chico y Grande, con un área de captación de 1.062 km<sup>2</sup>, presenta un rendimiento de 36 L·s<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup> y un caudal promedio de 34,7 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, por lo tanto el caudal total anual correspondiente a esta área de captación es de 1.094.299.200 m<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup>. El área de las subcuencas del AME que drenan a estos ríos es de 187,54 km<sup>2</sup>; con respecto al área de captación de la estación RG-8, ésta superficie equivale al 17,66%. De acuerdo a lo anterior, la oferta hídrica del AME aporta el 16,65% de la oferta hídrica correspondiente al área de captación de la cuenca del río Grande (incluida el río Chico). Los caudales del río Grande hasta la estación RG-8



abastecen el embalse río Grande II, formado por la presa del mismo nombre sobre la cota 2.272 msnm, localizada a 1,7 km aguas abajo de la confluencia de los ríos Chico y Grande. Dicho embalse ocupa un área de espejo de agua de 1.100 ha, con una capacidad total de embalse de 200 millones de metros cúbicos, de los cuales 110 corresponden al volumen útil. El agua del embalse río Grande II es aprovechada por las Empresas Públicas de Medellín, para el abastecimiento del acueducto con destino a la ciudad de Medellín y para algunos municipios del Valle de Aburrá, como también para la generación de energía (Vásquez, 1990).

El agua proveniente del río Grande, es utilizada para la recreación masiva en el parque de recreación acuática más grande del país, llamado el Parque de las Aguas (Venturópolis), localizado en el municipio de Girardota, una vez las aguas de la central hidroeléctrica La Tasajera, generan energía. La descarga de  $35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , después de ser utilizada en la central hidroeléctrica La Tasajera y en el Parque de las Aguas, es vertida al Río Medellín, permitiendo disminuir los niveles de contaminación, bajo el fenómeno de la dilución, lo cual contribuye parcialmente a la recuperación del río.

Puesto que el AME comprende una extensión total de 34.358,74 ha, el rendimiento hídrico de dicha área es de  $39,032 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ . En términos del caudal específico de escorrentía superficial, Colombia presenta un caudal de  $58 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ , el cual es tres veces mayor que el promedio suramericano ( $21 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ ) (Ministerio del Medio Ambiente 2002). Por lo cual se tiene que la oferta hídrica ( $\text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ ) del AME, es menor que la oferta hídrica promedio de Colombia y mayor que la oferta hídrica promedio suramericana.

Si se considera en Colombia una oferta hídrica de  $2.000 \text{ km}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  (IDEAM 2000b), la oferta hídrica del AME corresponde a un 0,02115% de dicha oferta nacional.

El área de estudio corresponde al 0,73% del total del área del ecosistema de Alta Montaña en Colombia, y su oferta hídrica aporta el 0,64% del total de la oferta hídrica de tales ecosistemas.

La demanda anual estimada por el IDEAM (2000a) para la cuenca del "Medio Cauca" es de 179,7 millones de metros cúbicos, y para la cuenca del río

Nechí, es de 250,64 millones de metros cúbicos; las dos demandas suman 430,34 millones de metros cúbicos. Sin descontar las reducciones tanto por alteración de la calidad como por regulación natural se puede decir que el AME puede cubrir un 98,28% de la demanda de las dos cuencas, lógicamente hay que tener en cuenta los limitantes físicos para utilizar la oferta del AME, pero esta afirmación de cubrimiento de la demanda es para dimensionar la capacidad que tiene el AME como oferente del recurso hídrico.

**Resumen del balance hídrico.** En la Tabla 5 se presenta el área ( $\text{km}^2$ ), temperatura media anual (TMA) ( $^{\circ}\text{C}$ ), precipitación media anual (PMA) ( $\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$ ), evapotranspiración real (ER) ( $\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$ ), escorrentía media anual (EMA) ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) y volumen de escorrentía anual (VEA) ( $\text{m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ), correspondientes a las subcuencas del área de manejo especial (AME) "Sistema de Páramos y Bosques Altoandinos del Noroccidente Medio Antioqueño", resultados obtenidos por medio de la metodología empleada en el presente estudio.

En resumen empleando el "Procedimiento de contabilidad de aguas para efectuar el balance hídrico detallado según Holdridge", se obtuvieron los siguientes resultados para el AME: se determinó una precipitación de  $665.288.946,00 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ , una evapotranspiración real de  $242.363.796,00 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$  y una escorrentía media anual de  $422.925.149,57 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ . Obteniéndose un coeficiente de escorrentía del 63,6%, lo cual significa que el 63,6% de la precipitación se convierte en escorrentía y el 36,4% restante se pierde por evapotranspiración. Según Cavelier (1991), el valor promedio de la evapotranspiración para bosques montanos bajos es de  $1.225 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$ , con una gama entre 1.155 y  $1.295 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$ . Este promedio no es demasiado inferior al registrado en bosques húmedos tropicales de tierras bajas, donde la evapotranspiración media es de  $1.415 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$ . Sin embargo, en los bosques nublados y páramos, la evapotranspiración es significativamente inferior a la de los bosques montanos de poca altitud debido a las bajas temperaturas y por lo tanto, a las menores posibilidades de evaporación. Lo anterior queda mostrado con el valor promedio de la evapotranspiración estimada para la zona de estudio, el cual es de  $744,53 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$ , presentando el área estudiada una altura media de 2.743,24 msnm.

**Tabla 5.** Área (km<sup>2</sup>), temperatura media anual (TMA) (°C), precipitación media anual (PMA) (mm·año<sup>-1</sup>), evapotranspiración real (ER) (mm·año<sup>-1</sup>), escorrentía media anual (EMA) (m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>) y volumen de escorrentía anual (VEA) (m<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup>), correspondientes a las subcuencas del sistema de páramos y bosques altoandinos del noroccidente medio antioqueño, Colombia.

NOMBRE	AREA (km <sup>2</sup> )	TMA °C	PMA (mm año <sup>-1</sup> )	ER (mm·año <sup>-1</sup> )	EMA (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	VEA (m <sup>3</sup> ·año <sup>-1</sup> )
Quebrada la Sucia	1,00	12,0	1.700,0	704,9	0,031	995.897,431
Quebrada Grande	3,06	13,8	1.749,6	814,7	0,090	2.861.709,024
Quebrada La Sopetrana	6,05	14,4	1.828,4	847,8	0,188	5.934.672,646
Quebrada Miranda	1,96	14,4	1.897,1	848,3	0,064	2.056.841,498
Quebrada Yuna	2,40	13,5	1.873,9	795,2	0,082	2.590.186,164
Quebrada La Nuarque	7,40	14,0	1.901,1	824,7	0,250	7.969.594,825
Quebrada Juan García	35,86	12,8	1.946,1	755,34	1,352	42.742.492,832
Quebrada de Rodas	0,48	10,5	1.750,0	617,5	0,017	544.194,206
Quebrada Pená	6,65	12,9	1.655,8	759,4	0,188	5.963.441,965
Quebrada San Pedro	4,30	16,0	1.552,7	942,1	0,083	2.627.290,128
Quebrada Tesorerito	1,65	15,8	1.663,1	929,4	0,038	1.211.175,06
Quebrada Santa María	18,90	12,5	1.724,4	732,95	0,593	18.751.382,019
Quebrada Santa Inés	27,10	10,8	1.886,2	635,88	1,073	33.914.269,475
Quebrada San José 1	5,30	11,2	2.075,5	661,16	0,237	7.502.580,728
Río San Andrés	33,50	10,6	2.002,5	624,06	1,462	46.217.733,179
Quebrada Quebradona	26,90	11,0	2.043,0	646,48	1,189	37.599.110,705
Quebrada El Valle	10,65	11,7	2.005,9	688,31	0,444	14.045.114,139
Quebrada Candelaria	33,80	11,6	2.027,1	683,59	1,438	45.451.671,035
Quebrada San José 2	11,37	12,1	2.006,5	715,00	0,465	14.698.038,274
Quebrada La Torura	15,43	13,1	1.975,3	768,94	0,579	18.315.801,165
Río Chico	80,98	11,9	1.944,2	703,03	3,182	100.603.958,573
Quebrada San Francisco	3,15	12,9	1.650,3	760,11	0,089	2.805.174,309
Quebrada El Herrero	0,21	12,9	1.650,3	760,11	0,006	187.011,621
Quebrada Los Laureles	0,35	12,5	1.625,3	733,00	0,010	312.451,867
Quebrada Quebradita	5,05	11,2	2.050,7	661,16	0,222	7.023.356,711

**Caudales mínimos.** El estudio de eventos extremos siempre ha sido de gran importancia para la hidrología, ya que estos son definitivos para diseñar obras civiles que garanticen seguridad y mejores condiciones de vida a las comunidades. Estos caudales representan la disponibilidad mínima del recurso hídrico de que dispondrá la comunidad de la zona en épocas de poca precipitación. En la Tabla 6 se presentan los caudales mínimos medios

anuales (m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>) para un periodo de retorno *TR* de las subcuencas del área de estudio.

Los resultados de la Tabla 6 se interpretan de la siguiente manera: por ejemplo, para la subcuenca del río Chico se tiene un caudal mínimo de 0,4122 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> asociado a un periodo de retorno de 25 años, ello indica que se espera que ocurra una vez un caudal mínimo de 0,4122 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> o superior durante ese tiempo.

El caudal mínimo promedio anual para el AME para un periodo de retorno de 10 años fue de  $0,106 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ; para un periodo de retorno de 15 años fue de  $0,095 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ; para un periodo de retorno de 20 años fue de  $0,088 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  y para un periodo de

retorno de 25 años fue de  $0,082 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Por lo cual se tiene que a medida que se estiman caudales mínimos con periodos de retorno cada vez mayores, existe la probabilidad de que el valor de los caudales mínimos disminuya.

**Tabla 6.** Caudal mínimo medio anual ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ) para varios periodos de retorno *TR* de las subcuencas del sistema de páramos y bosques altoandinos del noroccidente medio antioqueño, Colombia.

Nombre	Periodo de retorno (años)			
	10	15	20	25
Quebrada la Sucia	0,0086	0,0080	0,0075	0,0072
Quebrada Grande	0,0250	0,0228	0,0214	0,0202
Quebrada La Sopetrana	0,0493	0,0448	0,0419	0,0397
Quebrada Miranda	0,0184	0,0171	0,0162	0,0155
Quebrada Yuna	0,0219	0,0202	0,0191	0,0182
Quebrada La Nuarque	0,0625	0,0569	0,0533	0,0505
Quebrada Juan García	0,2701	0,2406	0,2219	0,2072
Quebrada de Rodas	0,0046	0,0042	0,0040	0,0039
Quebrada Penà	0,0468	0,0418	0,0386	0,0361
Quebrada San Pedro	0,0288	0,0256	0,0236	0,0220
Quebrada Tesorerito	0,0133	0,0121	0,0114	0,0108
Quebrada Santa María	0,1272	0,1122	0,1026	0,0951
Quebrada Santa Inés	0,2005	0,1786	0,1647	0,1537
Quebrada San José 1	0,0516	0,0477	0,0452	0,0432
Río San Andrés	0,2645	0,2371	0,2197	0,2060
Quebrada Quebradona	0,2230	0,2012	0,1874	0,1765
Quebrada El Valle	0,0936	0,0854	0,0801	0,0760
Quebrada Candelaria	0,2713	0,2437	0,2261	0,2122
Quebrada San José 2	0,0994	0,0906	0,0850	0,0806
Quebrada La Torura	0,1285	0,1164	0,1086	0,1026
Río Chico	0,5603	0,4910	0,4469	0,4122
Quebrada San Francisco	0,0237	0,0214	0,0200	0,0188
Quebrada El Herrero	0,00198	0,00184	0,00176	0,00169
Quebrada Los Laureles	0,0031	0,0029	0,0027	0,0026
Quebrada Quebradita	0,0486	0,0449	0,0425	0,0406

### **Validación de Resultados**

**Caudales medios.** Luego de haber calculado los caudales medios por los diferentes métodos, se procedió a realizar la corrección o ajuste por rezago; éste se hizo para cuatro meses contiguos, seleccionando los porcentajes de rezago que, por

tanteo, minimizaran la suma de cuadrados del error, además de que la gráfica correspondiente a la cuenca presentara un comportamiento lo mas similar posible al presentado por la gráfica de los registros de la estación RG – 10 “La Ye”, esto es, que los meses de precipitaciones máximas y mínimas coincidieran. Los porcentajes de rezago hallados

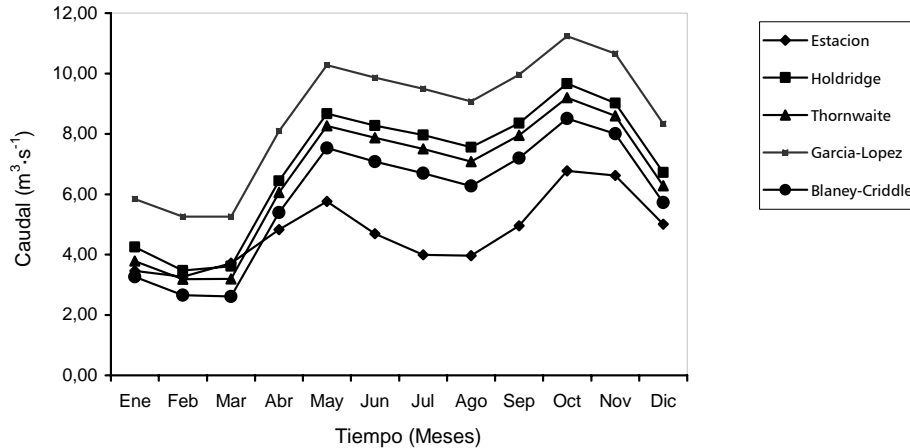
fueron: 51,3% para el propio mes, 16,5% para el mes siguiente, 16,2% para el segundo mes siguiente y 16% para el tercer mes siguiente.

En la Tabla 7 se presentan los caudales medios mensuales en  $m^3 \cdot s^{-1}$  observados y estimados mediante

los métodos de Holdridge, de Thornthwaite, de Blaney – Criddle y de García – López, con la corrección por rezago, y en la Figura 1 se presenta caudales medios mensuales en  $m^3 \cdot s^{-1}$  del río Chico observados y estimados por los diferentes métodos antes mencionados.

**Tabla 7.** Caudales medios mensuales en  $m^3 \cdot s^{-1}$  observados y estimados mediante los métodos de Holdridge, de Thornthwaite, de Blaney – Criddle y de García – López, con la corrección por rezago.

Método	Caudales en $m^3 \cdot s^{-1}$											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Estación Hidrométrica	3,46	3,27	3,72	4,83	5,76	4,69	3,99	3,97	4,95	6,78	6,62	5,01
Holdridge	3,79	3,18	3,20	6,06	8,26	7,87	7,50	7,08	7,95	9,20	8,60	6,28
Thornthwaite	4,25	3,48	3,62	6,45	8,67	8,28	7,96	7,56	8,36	9,67	9,02	6,73
Blaney-Criddle	3,26	2,66	2,61	5,39	7,53	7,08	6,69	6,28	7,20	8,51	8,00	5,73
García-López	5,85	5,26	5,26	8,10	10,28	9,86	9,50	9,07	9,97	11,24	10,66	8,34



**Figura 1.** Caudales medios mensuales en  $m^3 \cdot s^{-1}$  del río Chico, observados y estimados mediante los métodos de Holdridge, de Thornthwaite, de Blaney – Criddle y de García – López.

***Criterios para Evaluar los Diferentes Métodos.***

***Relación porcentual y suma de los cuadrados del error.*** En la Tabla 8 se presentan los valores porcentuales y suma de los cuadrados del error para

los diferentes métodos de cálculo de caudal. Según el marco de referencia, se puede apreciar que los valores porcentuales que están entre los rangos mas similares, son los correspondientes a los métodos de Holdridge y Thornthwaite por lo tanto son los que mejor estimarían los caudales de la cuenca.

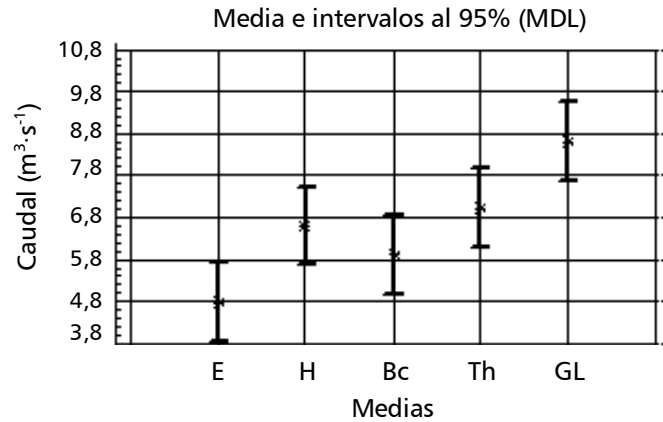
**Tabla 8.** Valores porcentuales y suma de los cuadrados del error (sce) para los diferentes métodos de cálculo de caudal.

Método	%	sce
Holdridge	76,77	60,72
Thornthwaite	71,34	81,95
Blaney-Criddle	90,62	90,69
García-López	56,10	198,73

Al observar los valores de la suma de los cuadrados del error en la Tabla 8, se puede determinar que el menor valor corresponde al resultado dado al aplicar el método de Holdridge, estableciéndose por medio de este criterio, que este método es el que presenta los resultados mas similares a los reales.

**Prueba de rangos múltiples.** Se realizó una prueba de rangos múltiples entre las medias de los caudales registrados en la estación RG – 10 “La Ye” y las medias de los caudales estimados mediante los diferentes modelos. Mediante la prueba de la mínima diferencia significativa (al 95% de confianza), se estableció que no existen diferencia estadísticamente significativas entre las medias de los registros de la estación y los modelos de Holdridge y Blaney-Criddle.

En la Figura 2 se presenta la prueba de rangos múltiples para caudales medios mensuales en  $m^3 \cdot s^{-1}$  del río Chico, observados (E) y estimados mediante los diferentes modelos (H = Holdridge, Bc = Blaney-Criddle, Th = Thornthwaite, GL = García-López).



**Figura 2.** Prueba de rangos múltiples para caudales medios mensuales en  $m^3 \cdot s^{-1}$  del Río Chico, observados (E) y estimados mediante los diferentes modelos (H = Holdridge, Bc = Blaney-Criddle, Th = Thornthwaite, GL = García-López).

**CONCLUSIONES**

La mayor importancia del Área de Manejo Especial (AME) “Sistema de Páramos y Bosques Altoandinos del Noroccidente Medio Antioqueño”, radica en que es un área considerada como una verdadera “fábrica de agua”, en especial las zonas de páramo, ya que es allí donde se originan gran cantidad de fuentes de agua potable que abastecen y satisfacen las necesidades básicas de las poblaciones humanas y animales que ocupan áreas circunvecinas a éste y otras que indirectamente reciben igual beneficio de la oferta hídrica, como las grandes concentraciones de población ubicadas

en la ciudad de Medellín, mediante el sistema de aprovechamiento múltiple de la cuenca de río Grande, las cuales cada vez más, requieren de los servicios básicos por sus dinámicas de crecimiento.

Lo anterior queda demostrado con los resultados obtenidos en este estudio, a través de los cuales se puede apreciar, la importante oferta hídrica que provee dicho sistema. Como lo demuestra el hecho de que el área estudiada contribuye con el 16,65% del agua que llega anualmente al embalse de Riogrande II.

El área de estudio presenta una precipitación media anual (1.847,4 mm), menor que la precipitación

media anual de Colombia (3.000 mm) y mayor que el promedio anual de Suramérica (1.600 mm).

La oferta hídrica del sistema estudiado (39,032 L·s<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup>), es menor que la oferta hídrica promedio de Colombia (58 L·s<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup>) y mayor que la oferta hídrica promedio suramericana (21 L·s<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup>).

El área del AME corresponde al 0,73% del total del área del ecosistema de Alta Montaña de Colombia, y su oferta hídrica aporta el 0,64% del total de la oferta hídrica de los ecosistemas de Alta Montaña colombianos.

Si consideramos en Colombia una oferta hídrica de 2.000 (km<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup>), la oferta hídrica del AME corresponde a un 0,02115% de dicha oferta nacional.

La estimación de caudales por métodos indirectos por medio de formulas predeterminadas, tienen un gran uso y son de gran utilidad en regiones o cuencas que no cuentan con registros climatológicos ni meteorológicos, lo importante es utilizar el método adecuado a la cuenca que estemos estudiando, teniendo en cuenta los datos que se necesiten en cada modelo. El método "Procedimiento de contabilidad de aguas para efectuar el balance hídrico detallado según Holdridge" fue el que resulto más adecuado para la cuenca del río Chico en comparación con los datos registrados en la estación RG – 10 "La Ye". En parte porque involucra factores como la biotemperatura en la cual esta involucrado el factor calórico con respecto a la vegetación; también refleja el ritmo y volumen de procesos fisiológicos de las plantas como la fotosíntesis, respiración y la transpiración.

El cálculo de la evapotranspiración con los diferentes modelos puede resultar con una diferencia marcada por las variables empleadas, ya que la incidencia de factores como la radiación solar, la humedad relativa de la zona, la presión atmosférica, los vientos, el grado de humedad del suelo y el tipo de plantas, deberían tenerse en cuenta para un correcto cálculo.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó dentro del proyecto de investigación "Valoración económica de bienes y servicios ambientales que provee el Sistema de Páramos y Bosques Altoandinos del Noroccidente

Medio Antioqueño", dirigido por la profesora Carmenza Castiblanco Roza, de la Escuela de Economía de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, financiado por la Dirección de Investigaciones Sede Medellín (DIME). Se agradece a la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) y a las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM) por facilitar información necesaria para la realización del estudio y a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín por su apoyo logístico y económico. Igualmente a los Ingenieros Forestales Humberto Sánchez Herrera y Jhony Dann Correa Sierra por su colaboración.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bolaños, H. 1995. Regionalización de caudales mínimos en el departamento de Antioquia. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Facultad Nacional de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 150 p.
- Cavelier, J. 1991. El ciclo del agua en bosques montanos. p. 70-83. En: Bosques de Niebla de Colombia, Banco de Occidente. Bogotá. 200 p.
- Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia. 1997. Conservación, ordenamiento y manejo del sistema de páramos y bosques altoandinos del noroccidente medio antioqueño. Tomo I: Diagnóstico biofísico, socio-económico y socio-cultural. Corantioquia, Medellín. 322 p.
- Chaves, B. y A. Jaramillo, 1999. Regionalización de la temperatura del aire en Colombia. Av. Recur. Hidraul. (6):37-42.
- Chow, V.T., D.R. Maidment y L.W. Mays. 1994. Hidrología Aplicada. McGraw-Hill, New York, 584 p.
- Empresas Públicas de Medellín 1991. Anuario hidro-meteorológico, vol. 1. EPM, Medellín. 178 p.
- Ewel, J. y A. Madriz, 1968. Zonas de vida de Venezuela, memoria explicativa sobre el mapa ecológico. 2 ed. Editorial Sucre, Caracas, Venezuela. 270 p.
- Guzmán, O. y M.A. Castro. 1985. Estudio comparativo de formulas de evapotranspiración potencial en Colombia. Bogotá. HIMAT (50):1-154.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2000a. Estudio nacional del agua. IDEAM, Bogotá. 253 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2000b. Oferta y demanda del recurso hídrico en Colombia. IDEAM, Bogotá. 29 p.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2002. Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en condición HotSpot & Global Climatic Tensor. IDEAM, Bogotá. 387 p.

Ministerio del Medio Ambiente. 2002. Lineamientos de política para el manejo integral del agua. En: [http://www.col.ms.org/DIA/2002/MINAMB\\_linea.htm](http://www.col.ms.org/DIA/2002/MINAMB_linea.htm). Consulta: Febrero de 2007.

Poveda, G. y O. Mesa. 1995. Efectos hidrológicos de la deforestación. Rev. Energética. (16):91-102.

Vásquez, G. 1990. Aprovechamiento múltiple del río Grande: Desarrollo de un proyecto de planificación de recursos hidráulicos. Tesis Maestría en Recursos Hidráulicos. Facultad Nacional de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 142 p.

Vélez, J.I., G. Poveda, y O. Mesa. 2000. Balances hidrológicos de Colombia. Primera edición. Universidad Nacional de Colombia. Facultad Nacional de Minas. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín. 150 p.