

RELACIONES DEMANDA-OFFERTA DE AGUA Y EL ÍNDICE DE ESCASEZ DE AGUA COMO HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO COLOMBIANO

Por

Efraín Antonio Domínguez Calle^{1,2*}, Hebert Gonzalo Rivera³,
Raquel Vanegas Sarmiento³, Pedro Moreno³

Resumen

Domínguez Calle, E.A., H.G. Rivera, R. Vanegas Sarmiento, P. Moreno: Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(123): 195-212, 2008. ISSN 0370-3908.

En este trabajo se presentan datos actualizados sobre la oferta hídrica Colombiana y la demanda potencial de agua por parte de los distintos sectores productivos. La relación demanda/oferta de agua es utilizada como indicador del nivel de presión sobre los recursos hídricos y es expresada, en forma porcentual, a través del Índice de Escasez de Agua Superficial. Este índice aplica reducciones sobre la oferta hídrica disponible para expresar los efectos restrictivos de la variabilidad temporal y de la severidad del periodo de estiaje en las corrientes superficiales de las distintas regiones naturales. Para caracterizar los años de humedad normal y baja se construyeron escenarios de oferta hídrica modal y de probabilidad de excedencia del 95%. También se proyectaron los niveles de demanda y oferta superficial de agua al año 2025. Los resultados obtenidos reorientan la atención sobre la problemática del recurso hídrico colombiano hacia los conflictos por uso del territorio ocasionados por la concentración poblacional y de los sectores productivos en sectores de baja oferta de agua. A la luz de este enfoque, los problemas de infraestructura para la gestión de un recurso escaso, altamente presionado y de fuerte variabilidad temporal, emergen como un factor clave para evitar una crisis latente en la gestión de los recursos hídricos.

Palabras clave: Estudio Nacional del Agua, índice de escasez, recursos hídricos, relaciones demanda-oferta de agua.

¹ Departamento de Ecología y Territorio, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Pontificia Universidad Javeriana, Transversal 4 No. 42-00 Piso 8 Bogotá D.C., Colombia. Correo electrónico: e.dominguez@javeriana.edu.co

² CeiBA-Complejidad.

³ Subdirección de Hidrología, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, Carrera 10 No. 20-30 Bogotá D.C., Colombia. Correos Electrónicos: agua@ideam.gov.co; raquelv@ideam.gov.co; pmoreno@ideam.gov.co.

* Autor corresponsal.

Abstract

This paper shows updated results about Colombian water resources and their requirements by the economic sectors. Water demand/water availability relationship is used as a pressure index on water resources; this relationship is expressed through the water scarcity index, which applies constraints over water availability, due to the runoff temporal variability and to the low levels of water during the dry season, each year, and for each geographic region. To characterize average and low runoff years, different water availability scenarios were build: one for modal runoff values, and another for 95-percent exceedance probability flows. An outlook of water availability and water requirements for 2025 also was prepared. The results call our attention to problems caused by the concentration of high density settlements and the presence of economics sectors in regions with low water availability. The infrastructure lag for management of a scarce, highly variable and over pressured resource, emerges as a key factor to avoid a looming crisis in the process of water management.

Key words: Colombian Nationwide water resources assessment, water scarcity index, water demand-water availability relationship.

Introducción

Colombia, un país de precipitaciones generosas, en otrora calificado como el cuarto país del mundo por su disponibilidad hídrica, está enfrentando un conflicto por el uso del espacio para su desarrollo socio-económico y para protección de la oferta hídrica natural. El crecimiento actual de la nación ha congregado la demanda hídrica sobre regiones donde su oferta es escasa y en las cuales los procesos de crecimiento poblacional amplifican la presión sobre un recurso que ya registra altos requerimientos para mantener la estructura socio-económica instalada. Por estas razones, desde 1998, el IDEAM, con el fin de mantener un seguimiento de esta problemática realiza y actualiza el Estudio Nacional del Agua (ENA), una síntesis de los recursos hídricos de Colombia a la luz de la relaciones demanda-oferta de agua (IDEAM, 1998).

Durante muchos años el estado del recurso hídrico de los países del mundo ha sido evaluado tomando en cuenta la cantidad de agua que escurre por los territorios de las distintas naciones. Estimaciones de esta clase fueron realizadas en la década de los años 70 (Lvovitch, 1970; Korzun *et al.*, 1978; UNESCO, 1979) y es a partir de ellas que surge la idea de una “Colombia-potencia hídrica”, la cual compartía los primeros renglones en la clasificación mundial de recursos hídricos con países como Brasil, La Federación Rusa y Canadá. Este imaginario marcó como abundante e inagotable el recurso hídrico de Colombia y produjo una gran despreocupación por el mismo en los colombianos. Esta huella ha dejado de ser indeleble y en las últimas décadas ha comenzado a borrarse gracias al surgimiento de conflictos hídricos evidentes a escala local y regional, los cuales han puesto en crisis los mecanismos de asigna-

ción del agua. Este contexto no es un privilegio de los colombianos y se replica en muchos países, para contrarrestarlo se han producido muchas iniciativas globales para el fortalecimiento institucional de los países en la evaluación de sus recursos hídricos. Entre estas iniciativas se destacan la organización de redes mundiales y los esfuerzos por realizar evaluaciones globales que permitan comparar el estado de los recursos hídricos de distintos países con base en metodologías estandarizadas. Son destacables los recursos ofrecidos por la UNESCO para tal fin, entre ellos: el Programa para la Evaluación Mundial de los Recursos Hídricos (Lvovitch, 1986) y el Programa Hidrológico Internacional (UNESCO, 2005). En el marco de estos proyectos la aplicación de indicadores ha surgido como una herramienta para cambiar el *status quo* de las evaluaciones sobre la disponibilidad de agua en el mundo haciendo que todos puedan ser comparables. Entre estos indicadores sobresale el índice de disponibilidad *per cápita* propuesto por Malin Falkenmark (Gardner-Outlaw & Engelman, 1997), quien introdujo también sus valores críticos. Este índice es un indicador sencillo que detecta los países con crisis agudas del agua, sólo toma en cuenta la población como factor de presión y por ello no cuenta con la resolución necesaria para divisar la problemática del agua en aquellos países con abundancia aparente del líquido pero con alta concentración de la demanda de agua en polos de desarrollo locales.

De acuerdo con los valores críticos establecidos por Falkenmark (1999), en los países en los que la disponibilidad de agua *per cápita* por año sólo alcanza a los 1000 m³ se tiene una situación de escasez de agua. En Colombia, de acuerdo con las evaluaciones realizadas por el IDEAM, la disponibilidad de agua en 1985 alcanzaba una cifra aproxi-

mada de 60.000 m³ por habitante al año. Esta cifra ha evolucionado, principalmente debido al crecimiento poblacional del país, y en el año 2000 se redujo hasta el valor de 40.000 m³ por habitante al año. Aunque esta última cifra es mucho mayor que los valores críticos planteados por Falkenmark, es preocupante la tendencia de reducción registrada (véase figura 1). En el caso hipotético de que se mantuviese el crecimiento poblacional y sectorial actual y de mantener los hábitos de uso y consumo actuales, en el término de 40 años el país tendría una disponibilidad hídrica anual per capita igual 1000 m³, alcanzando así los valores críticos señalados por Falkenmark para una crisis de facto del agua.

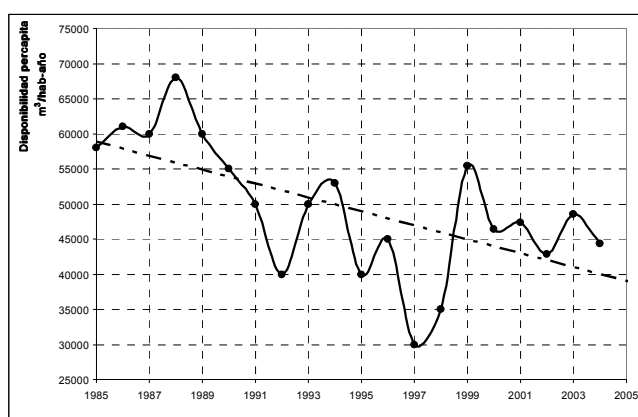


Figura 1. Dinámica anual de la disponibilidad per cápita de agua registrada en Colombia (Fuente: <http://www.ideam.gov.co/indicadores/agua5.htm>, modificada)

La anterior proyección, aunque gruesa, es muy desalentadora e indica que el periodo de tiempo en el que Colombia enfrentaría una crisis real de agua ya se encuentra en el intervalo de planificación del presente siglo.

La señal analizada con el indicador de disponibilidad per cápita habla de una situación de crisis potencial en el futuro, sin embargo en la actualidad, debido a que la población colombiana y sus principales actividades económicas se encuentran ubicadas en regiones con oferta hídrica natural no muy significativa, ya se presentan conflictos por uso y asignación del agua. De acuerdo con las valoraciones de la disponibilidad per cápita anual de agua, Colombia ocupa el lugar número 24 entre 203 países. Estados como Singapur, Malta, Arabia Saudita, Qatar y Bahamas ocupan los últimos puestos con disponibilidades per cápita menores a 150 m³ por habitante año (UN/WWAP, 2003). Si se estudia con detalle la distribución de la población y las actividades socioeconómicas en el territorio colombiano es claro que este indicador no refleja las situaciones de

alta presión sobre el recurso hídrico presentes en distintos núcleos de desarrollo de Colombia. Los mapas en las figuras 2 y 3 muestran la distribución espacial del recurso hídrico y de la demanda de agua en Colombia. En ellos se observa que los núcleos de mayor demanda de agua para las actividades socio-económicas se encuentran ubicados en espacios geográficos de baja oferta hídrica natural. Es así como el altiplano cundiboyacense, cuya oferta natural no supera los 600 mm de escorrentía superficial al año, presenta niveles de demanda altos. En igual situación se encuentran los departamentos del Atlántico, Cesar y Bolívar, algunos sectores del valle del río Cauca y del departamento de Norte de Santander.

Por los argumentos presentados en el párrafo anterior, el ENA, siguiendo las indicaciones del Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos examina las relaciones demanda-oferta de agua en Colombia para determinar las regiones donde la demanda de agua del conjunto de actividades socio-económicas ha alcanzado niveles críticos y así proporcionar información de apoyo para la gestión del recurso hídrico a escala regional y local. Con estos fines el IDEAM, en lugar del indicador de disponibilidad per cápita anual de agua, propuso el Índice de Escasez del Agua, el cual además de la demanda de agua de la población y los sectores productivos toma en cuenta restricciones de la oferta hídrica superficial por efecto de la irregularidad temporal de los caudales anuales y de la severidad de los periodos de estiaje en los ríos colombianos. El modelo conceptual de este índice se presenta a continuación.

Modelo conceptual del índice de escasez

Este índice fue construido a partir de las relaciones de presión sobre el recurso hídrico presentadas en la Evaluación General de los Recursos de Agua Dulce del Mundo (UN-Consejo Económico y Social, 1997), allí se propone que existe escasez de agua cuando la cantidad de agua tomada de las fuentes es tan grande que se suscitan conflictos entre el abastecimiento de agua para las necesidades humanas, las ecosistémicas, las de los sistemas de producción y las de las demandas hídricas proyectadas hacia el futuro inmediato. De conformidad con esta propuesta la relación oferta-demanda de agua es una medida de presión dado que se ha observado que cuando la utilización del agua dulce aumenta por sobre el 10% de los recursos de agua dulce de una corriente, en esta se manifiestan problemas por reducción de la oferta y de la calidad del agua, aguas abajo del lugar de la bocatoma. Estas presiones se tornan más pronunciadas cuando se cruza el umbral del 20%.

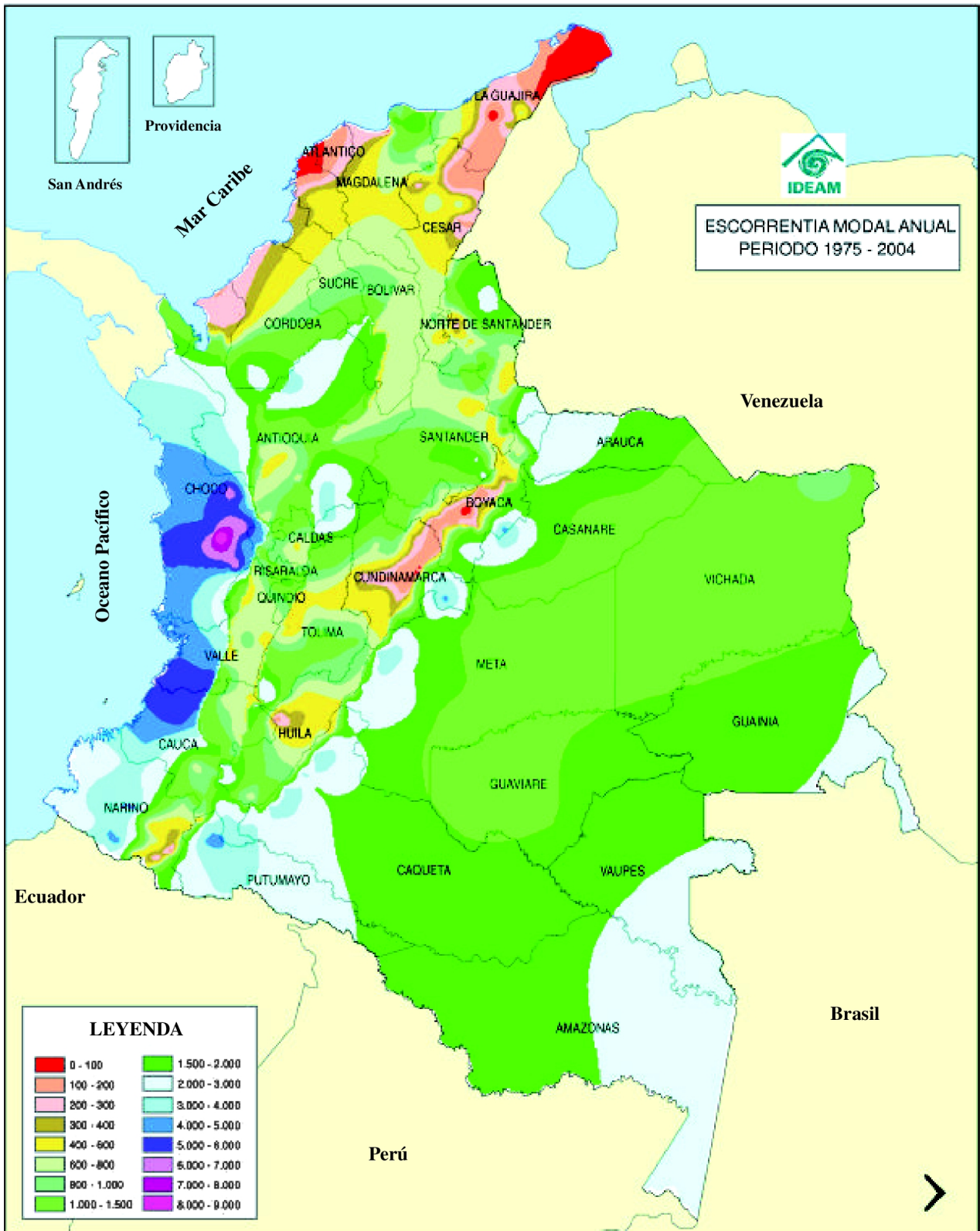


Figura 2. Oferta hídrica total anual en Colombia (IDEAM, 2004).

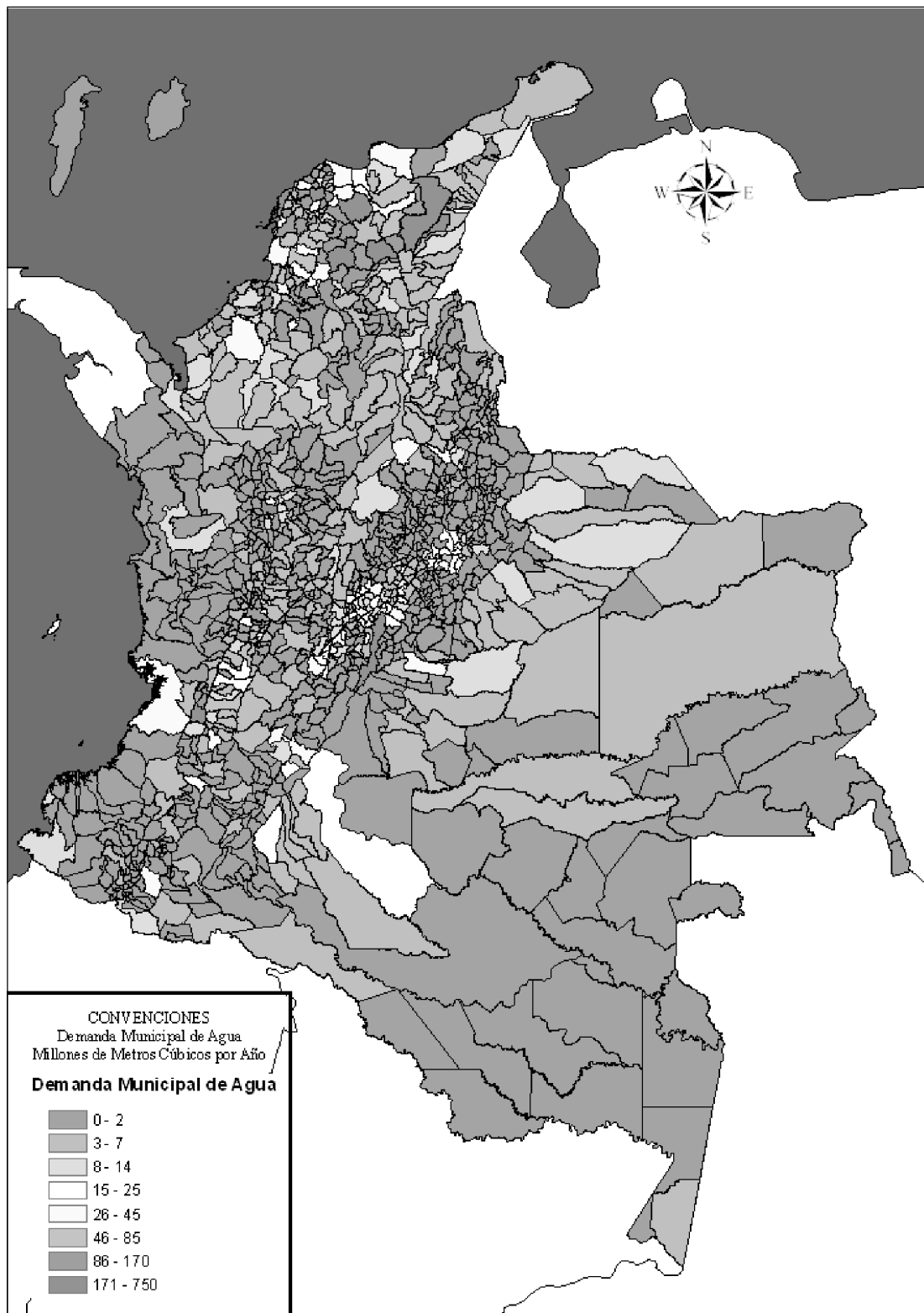


Figura 3. Distribución espacial de la demanda de agua de las actividades socio-económicas en el territorio colombiano.

La excesiva presión sobre una fuente de agua puede conducir a su desaparición, en este sentido es importante para la planificación sostenible del recurso hídrico conocer la cantidad de agua disponible, los niveles de demanda y las restricciones de uso necesarias para mantener la salud de la fuente abastecedora de agua. Esto indica, que además de ofrecer agua para el consumo humano y el abastecimiento de las actividades productivas, es necesario que las corrientes abastecedoras mantengan un remanente de agua para atender los requerimientos hídricos de los ecosistemas asociados a sus cauces, preservando así su biodiversidad, productividad y estabilidad.

La alta variabilidad temporal de las fuentes abastecedoras también afecta la disponibilidad real de agua. Una corriente con un régimen hidrológico muy inconstante es poco confiable como fuente abastecedora de agua por lo que la irregularidad temporal debe ser tenida en cuenta al estimar la oferta neta de una corriente de agua.

Por las razones anteriores es conveniente definir dos tipos de oferta de agua: a) oferta total que refleja el agua que circula por la fuente abastecedora y b) oferta neta que define la cantidad de agua que ofrece la fuente luego de haber descontado la cantidad de agua que debe quedar en ella para efectos de mantener el caudal mínimo del periodo de estiaje y para tomar en cuenta los efectos adversos de la irregularidad temporal de la oferta. De acuerdo con estas consideraciones el índice de escasez se establece como la relación entre la demanda de agua por parte de las actividades socioeconómicas y la oferta hídrica "neta".

La expresión de cálculo del índice de escasez en su forma porcentual es:

$$I_e = \frac{D_t}{O_n} \times 100\% \quad (1)$$

Donde: I_e - Índice de escasez [%], D - Demanda total de agua [m^3], O_n - Oferta hídrica superficial neta [m^3].

En la Evaluación General de los Recursos de Agua Dulce del Mundo se distinguen las siguientes categorías de presión sobre el recurso hídrico:

- Alta – la demanda alcanza el 40% del agua ofrecida potencialmente por la fuente abastecedora.
- Media – el nivel de demanda de agua se encuentra entre el 20 y 40% de la oferta.
- Moderada – Los requerimientos de agua están entre el 10 y el 20% de la oferta hídrica.

- Baja – la demanda de agua no supera el 10% de los volúmenes de agua ofrecidos por la fuente.

Para Colombia, el IDEAM introdujo en 1998 la siguiente escala de valoración para las categorías del índice de escasez (IDEAM, 1998):

- Alto – la demanda supera el 50% del agua ofrecida potencialmente por la fuente abastecedora.
- Medio-Alto – el nivel de demanda de agua se encuentra entre el 20 y 50% de la oferta neta.
- Medio – Los requerimientos de agua están entre el 10 y el 20% de la oferta hídrica neta.
- Mínima – la demanda de agua se encuentra entre el 1 y el 10% de los volúmenes de agua ofrecidos por la fuente.
- No significativo – demanda menor al 1% de la oferta hídrica neta.

Definición de la oferta hídrica

La oferta hídrica total está definida por el valor modal de los caudales promedio anuales. Esta magnitud representa el caudal anual promedio más probable y se extrae de la curva de densidad probabilística (CDP) de los caudales anuales. Esta curva se construye a partir de los registros en las estaciones hidrométricas que miden el flujo de agua de la fuente abastecedora. Como en Colombia no se cuenta con información hidrológica puntual para cada municipio, se utilizó la metodología de la UNESCO (Lvovitch, 1970) para extraer estos valores de mapas de escorrentía modal construidos con los registros anuales de caudal de la red de monitoreo hidrológico del IDEAM.

La oferta hídrica neta se calcula a partir de la oferta total a través de la siguiente expresión:

$$O_n = O_t \times (1 - R_e - R_{it}) \quad (2)$$

Donde:

O_t : Oferta hídrica superficial total [m^3];

R_e : Factor de reducción para mantener el régimen de estiaje;

R_{it} : Factor de reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica.

De acuerdo con las fórmulas (1) y (2) el índice de escasez requiere de la definición de cuatro elementos conceptuales, tres de ellos relacionados con la categoría de oferta

hídrica superficial y el restante relacionado con los requerimientos de agua de las actividades socioeconómicas.

El volumen de oferta hídrica total se obtiene como:

$$O_t = Q_o * T \quad (3)$$

Donde: Q_o - caudal modal de la fuente abastecedora [m^3/s] y T cantidad de segundos en un año.

Para definir R_e se construye la curva de densidad probabilística (CDP) de los caudales de estiaje Q_{min} . De esta curva se extrae el caudal de estiaje con el 97.5% de probabilidad de excedencia $Q_{min97,5\%}$ de modo que la reducción para mantener el régimen de estiaje de la fuente sería igual a:

$$R_e[\%] = 100 \times \frac{Q_{min97,5\%}}{Q_o} \quad (4)$$

La reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica se debe estimar a través de un funcional de la forma

$$R_{it} = f(Q_o, C_V, C_S, \rho) \quad (5)$$

Donde C_V, C_S, ρ representan los coeficientes de variación y de asimetría de los caudales promedio anuales y el radio de correlación de los caudales diarios.

La estructura explícita del funcional (5) es de antemano desconocida, por ello como primera aproximación para obtener R_{it} se recomienda aplicar la siguiente tabulación:

Tabla 1. Escala de reducciones por irregularidad temporal de la oferta hídrica.

C_V	R_{it} , [%]
0 - 0,2	15
0,2 - 0,3	25
0,3 - 0,4	35
0,4 - 0,6	40
>0,6	50

Los porcentajes de reducción fueron tomados de la comparación entre las magnitudes de los coeficientes de variación de la escorrentía anual y la desviación estándar de los caudales diarios alrededor de la media anual multianual. Este análisis mostró que la variabilidad de los caudales diarios es del doble de la variabilidad de la escorrentía promedio anual, lo que permite asegurar que los valores de C_V para caudales anuales sirven como

indicador de la variabilidad diaria. Se observó que a C_V mayores a 0.6 les corresponde una variabilidad diaria mayor al 100%, debido a que esta variabilidad arroja despliegues en ambos sentidos, hacia los máximos y hacia los mínimos, se aplicó un valor de reducción correspondiente a la mitad de la variabilidad total en caudales diarios. Para los C_V menores a 0.6 se asignaron reducciones siguiendo el mismo principio. La distribución espacial de C_V muestra que en el 70% del territorio colombiano este coeficiente alcanza valores entre 0.2 y 0.3, de modo que la reducción más frecuente por variabilidad de la oferta alcanza el 25% de acuerdo con la Tabla 1. Al 17% del territorio colombiano le correspondieron reducciones cercanas al 40%.

Definición de la demanda hídrica

Colombia no cuenta con un sistema de información continuo y homogéneo sobre el uso del agua en los distintos sectores productivos. Sin embargo una aproximación a la demanda hídrica se puede obtener a partir de los volúmenes de producción sectorial y de factores de consumo de agua por tipo de producto o servicio. En este escenario la demanda total D_t de agua es igual a:

$$D_t = D_{ud} + D_{ui} + D_{us} + D_{ua} + D_{up} \quad (6)$$

Donde:

D_{ud} : Demanda de agua para consumo doméstico;

D_{ui} : Demanda de agua para uso industrial;

D_{us} : Demanda de agua para el sector de servicios;

D_{ua} : Demanda de agua para uso agrícola;

D_{up} : Demanda para uso pecuario.

El cálculo de la demanda de agua para consumo doméstico D_{ud} - [m^3] se realiza utilizando la siguiente expresión:

$$D_{ud} = D_{pcu} \times n_{hu} + D_{pcr} \times n_{hr} \quad (7)$$

Donde: D_{pcu} - demanda per cápita urbana, n_{hu} - número de habitantes urbanos, D_{pcr} - demanda per cápita rural, n_{hr} - número de habitantes rurales.

La demanda de agua para uso industrial - [m^3] se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$D_{ui} = \sum_{i=1}^n Vp_i \times Fc_{ji} \quad (8)$$

Donde: Vp_i , Fc_{ji} son el volumen de producción y factor de consumo de agua por tipo producción y n es el número de sectores industriales considerados (Lvovitch, 1986).

La demanda de agua para el sector de servicios " D_{us} " [m^3] se obtiene como

$$D_{us} = \sum_{i=1}^n N_i \times Fc_{si} \quad (9)$$

Donde: N_i y Fc_{si} representan el número de establecimientos por tipo de servicio y el factor de consumo por tipo de servicio. Aquí n representa el número de tipos de servicios tomados en cuenta.

Los requerimientos del uso agrícola " D_{ua} " [m^3] se establecen mediante la siguiente fórmula:

$$D_{ua} = \sum_{i=1}^n D_{ua}^i \quad (10)$$

$$D_{ua}^i = \begin{cases} 0 & \Rightarrow \text{Sí } [P - (ETP * kc_i)] \geq 0 \\ \text{abs}([P - (ETP * kc_i)] * ha_i) & \Rightarrow \text{Sí } [P - (ETP * kc_i)] < 0 \end{cases}$$

Aquí: D_{ua}^i - Demanda del i -ésimo cultivo, P - precipitación anual, ETP - "es la evapotranspiración potencial," kc_i es el factor de consumo del i -ésimo cultivo y ha_i el número de hectáreas cultivadas con el. Por último, n representa el número de cultivos considerados.

La demanda para uso pecuario D_{up} - [m^3] es:

$$D_{up} = \sum_{i=1}^n Vpa_i \times Fca_i \quad (11)$$

En (11) Vpa_i constituye el volumen de producción por tipo de animal industrial, Fca_i es el factor de consumo según tipo de animal y n representa el número de tipos considerados.

Métodos e información utilizados

Oferta hídrica

Para evaluar la oferta hídrica total y representarla en mapas de escorrentía modal y de diferente probabilidad de excedencia se utilizaron las series de caudales anuales de

las 775 estaciones hidrológicas que son operadas por el IDEAM en Colombia (véase figura 4). Para determinar R_{ii} se construyó un mapa en isolíneas para el coeficiente de variación C_v de los caudales anuales. Para el cálculo de R_e fueron analizadas las series de caudales diarios con el fin de definir el caudal promedio para el periodo de estiaje de cada año en todas las series de caudales diarios disponibles.

Los registros de las estaciones del IDEAM fueron complementados mediante la metodología presentada en Martínez y Ruiz (1998) y Martínez (2001). De las 755 estaciones hidrométricas fueron escogidas aquellas con registro histórico continuo desde 1975 hasta 2004, garantizando la representatividad por regiones climáticas, hidrológicas y la resiliencia en el funcionamiento de las estaciones hidrométricas. Después de esta selección quedaron disponibles 467 estaciones hidrométricas. Las series de caudales anuales y de estiaje de estas estaciones se caracterizaron en términos probabilísticos con el fin de definir la oferta hídrica total en términos de probabilidad de excedencia. Para el ajuste de funciones de distribución probabilística se desarrolló un complemento de Microsoft Excel⁴ en Visual Basic para aplicaciones. Este programa realiza los cálculos necesarios para construir y analizar las series de caudales mínimos y medios anuales, de modo que automatiza el ajuste de funciones de distribución teóricas a las curvas empíricas de probabilidad de excedencia para caudales promedios anuales y promedios del periodo de estiaje. Este complemento estadístico utiliza el método del gradiente conjugado para optimizar el ajuste de las funciones de distribución probabilística teóricas a las curvas empíricas, como función objetivo aplica la minimización del error promedio absoluto entre coordenadas. Las funciones de distribución teóricas a ajustar se escogieron de la familia de curvas de Pearson tipo III. La bondad de ajuste de las curvas teórica y empírica se evaluó de tres formas: 1) análisis visual, 2) error absoluto promedio entre las coordenadas teóricas y empíricas y 3) mediante las pruebas estadísticas de Kolmogorov, Smirnov y Pearson (Bendat & Piersol 1986; Haan, 2002). En la validación del ajuste se exigió que además de una buena concordancia visual, el error promedio absoluto no superara el 20% y que cómo mínimo fuesen superadas dos de las pruebas estadísticas propuestas. En el 95% de los casos la función teórica que mejor ajustó fue la distribución γ de tres parámetros. El análisis de los errores de ajuste de las funciones de distribución muestra que en el 90% de los casos este fue menor

4 Para obtener una versión actualizada del programa y su manual del usuario contactar al autor: Efraín Domínguez en e.dominguez@javeriana.edu.co

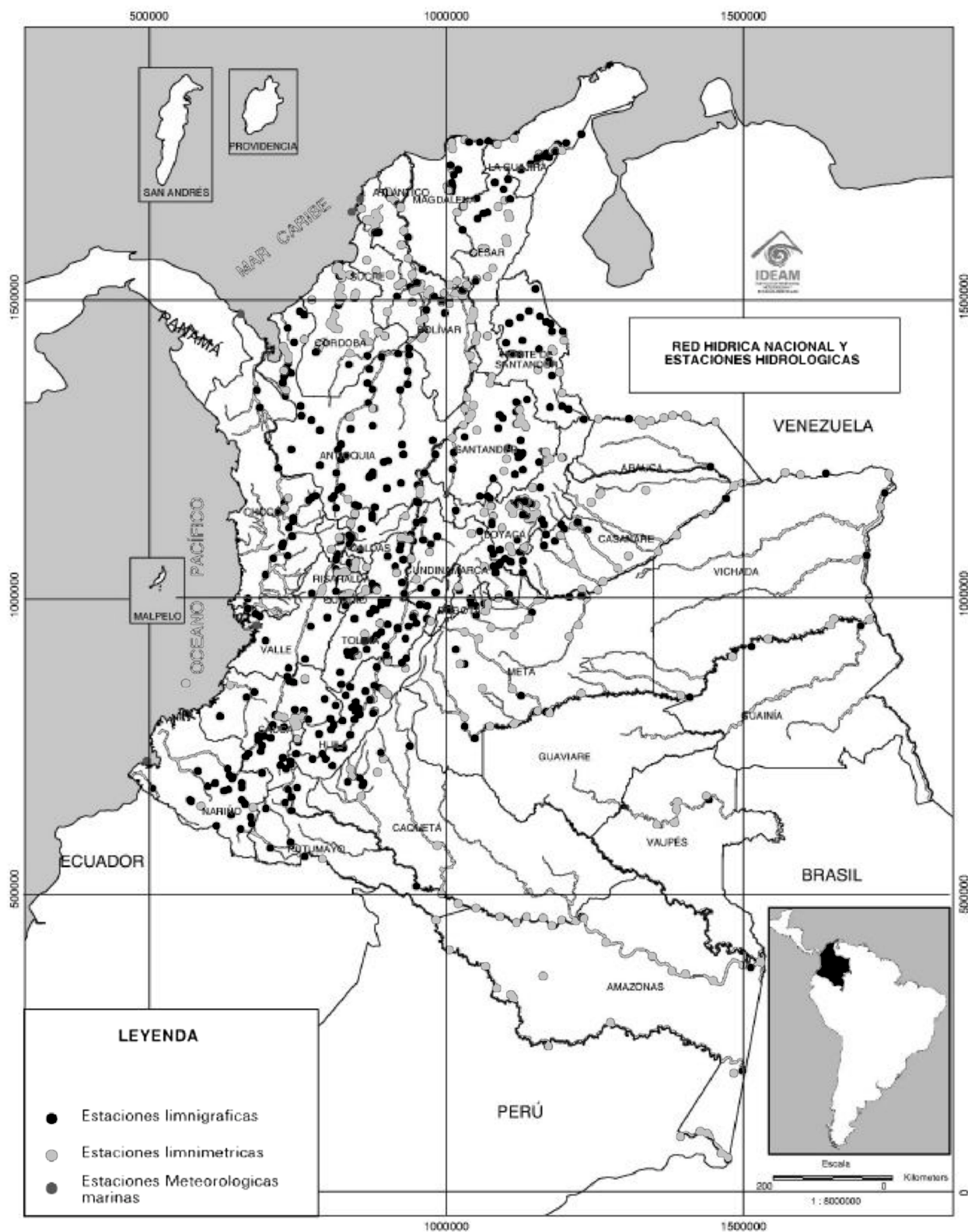


Figura 4. Red de monitoreo hidrológico (Fuente: <http://www.ideam.gov.co/series/mapa.htm#>)

al 17,5% y que menos del 5% de los ajustes se realizaron con errores superiores al 20% (véase figura 5).

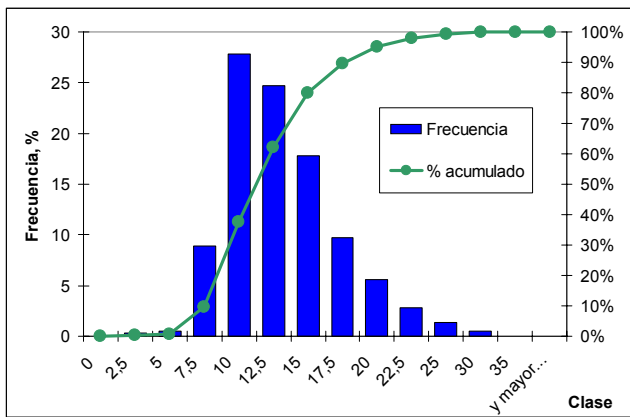


Figura 5. Análisis de errores en los ajustes funciones de distribución (caudales anuales)

Para la generalización espacial se aplicó el método de interpolación óptima. Como primer paso los estadísticos de caudales fueron expresados en términos de lámina de escorrentía anual y del periodo de estiaje (véase ecuaciones 12 y 13). Para realizar esta conversión fue necesario evaluar el área aferente a las 467 estaciones hidrológicas seleccionadas, esta delimitación se realizó en forma semiautomática analizando el modelo de elevación digital de Colombia, la cobertura de ríos y algunas delimitaciones preliminares realizadas en otros proyectos. Como técnica de interpolación se utilizó la técnica de interpolación óptima implementada en la Federación Rusa por los científicos **Drozdov** y **Shepeliovskiy** (1936, 1946) y perfeccionada por **Gandin** (1963, 1976). Las funciones estructurales y de correlación requeridas por esta técnica fueron estimadas para seis regiones hidrológicas de Colombia: Alto y Medio Magdalena, Cauca, Pacífico, Llanos orientales - Amazonía, Catatumbo y Caribe. Estas regiones definieron dominios de interpolación en los que se construyó una grilla de 10 Km. por 10 Km. de tamaño de celda.

$$Y_0 = \frac{Q_0 \times T}{A \times 10^3}; \quad (12)$$

$$Y_{97.5\%} = \frac{Q_{97.5\%} \times T}{A \times 10^3};$$

Y_0 : escorrentía superficial modal expresada en términos de lámina [mm];

$Y_{97.5\%}$: escorrentía superficial con probabilidad de excedencia del 97.5% expresada en términos de lámina [mm];

Q_0 : caudal modal de la serie de caudales anuales [m^3/s];

$Q_{97.5\%}$: caudal con probabilidad de excedencia del 97.5% de la serie de caudales anuales [m^3/s];

T : cantidad de segundos en el periodo de agregación de la oferta, anual en este caso [s];

A : área aferente al nodo de mediciones [km^2];

Los volúmenes de oferta anual modal (V_0) y de probabilidad de excedencia del 97,5% se definen como se muestra a continuación:

$$V_0 = A \times 10^3 \times Y_0;$$

$$V_{97.5\%} = A \times 10^3 \times Y_{97.5\%}. \quad (13)$$

Demanda potencial de agua

La información requerida por las ecuaciones (6) a la (11) para estimar la demanda potencial de agua en los distintos sectores fue obtenida de las siguientes fuentes:

Proyecciones de población del DANE para el año 2004 para cabeceras municipales y el área rural. El factor de consumo para la población fue estimado con base en la metodología del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS – 2000 Sección I Título A Capítulo A.3 y Sección II Título B Sistemas de Acueducto Capítulo B.2.

Para el segmento industrial se aplicaron los valores de volúmenes de producción de la encuesta anual manufacturera (DANE, 1999) incrementados por la tasa de crecimiento del PIB municipal. Los factores de consumo por tipo de producción se tomaron de (UNESCO, 1979). A partir de los flujos físicos de la producción, presentados en la encuesta anual manufacturera del DANE, se estimó para cada municipio, por código CIU a cuatro dígitos Revisión 2, el volumen de producción en toneladas, el cual se proyectó al año 2004 con base en el crecimiento de la industria manufacturera registrado en el Sistema de Cuentas Nacionales, publicado por el Banco de la República en su página Web. El valor obtenido se asoció con un factor de consumo de agua expresado en m^3 por tonelada producida, por tipo de producto⁵.

⁵ Los factores de consumo de agua por tipo de producto, son teóricos y se obtuvieron de revisión bibliográfica, algunos han sido actualizados con base en los reportes de indicadores de ecogestión que presenta el Centro de Empresarial Cecodes www.cecodes.org.co

Finalmente en el área de servicios fueron contemplados las estadísticas de aeropuertos, hospitales y centros educativos.

Discusión de resultados

Oferta hídrica en Colombia

En el territorio colombiano, cada año, en promedio, precipitan 3400 kms³ de agua, se evaporan 1100 kms³ y escurren 2300 kms³. Si se supone que un país es capaz de retener en sus dispositivos de abastecimiento el 40% de esta oferta (UN-Consejo Económico y Social, 1997), en efectivo Colombia contaría con 1150 kms³ al año de oferta hídrica superficial, aunque en realidad, la capacidad instalada en sistemas de abastecimiento y suministro de agua, aún no alcanza esta cifra. A su vez, la oferta modal de agua para el total del territorio colombiano alcanza la cifra de 1910 kms³ al año, mientras que en un año seco (véase figura 6) esta oferta no supera los 1240 kms³ al año. Al analizar la oferta hídrica neta por regiones se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 2.

Analizando el panorama de la oferta hídrica superficial neta es inevitable la conclusión sobre la abundancia de este recurso en Colombia. Para entender el problema del agua en Colombia es necesario establecer los niveles anuales de demanda potencial de agua, según los diferentes sectores y su distribución en el territorio nacional. Sólo esta correlación deja en evidencia el conflicto existente por la localización de las altas demandas de agua en territorios con una baja oferta hídrica natural. Para construir esta relación en el siguiente párrafo se discute la estructura por sectores y la distribución espacial de la demanda potencial de agua en Colombia.

Estructura de la demanda de agua en Colombia

Para las estimaciones proyectadas al año 2004, la demanda total de agua de los sectores socio-económicos al-

canzó los 13.000 millones de metros cúbicos de agua dulce al año. Estos requerimientos se distribuyen por sector según se presenta en la figura 7.

La estructura de demanda de agua en Colombia difiere de la estructura promedio de todos los países del mundo y de la de demanda de los países de altos ingresos. La demanda de agua en Colombia se diferencia de la de un país de alto ingresos en un receso de los requerimientos de agua para la industria que, en países industrializados constituye el 59% de toda la demanda. Adicionalmente, la estructura de demanda colombiana se caracteriza por grandes requerimientos de agua para el sector agrícola, los cuales sin embargo resultan inferiores en un 10% a la demanda agrícola promedio mundial y en un 22% con relación a la de un país de bajos a medios ingresos (UN/WWAP, 2003).

En la estructura de consumo del país, el departamento del Magdalena es el que más agua consume (véase figura 8) seguido por el Atlántico, Bolívar, Cundinamarca, Cesar, Sucre y el Distrito Capital. La demanda de agua del departamento del Magdalena es preponderantemente agrícola, alcanzando este sector el 93% de la demanda total de agua del Departamento (figura 9):

El patrón de mayor demanda hídrica por el sector agrícola se mantiene, con diferentes porcentajes, en los departamentos del Atlántico, Bolívar, Cundinamarca, Cesar y Sucre, siendo la excepción el Distrito Capital en cuya estructura el mayor aporte de demanda lo hace el sector doméstico (véase figura 10). Esta composición de la demanda de agua del Distrito Capital se puede explicar al considerar el hecho de que Bogotá ocupa el puesto número 31 en la clasificación de las ciudades más grandes del mundo del año 2000 (UN/WWAP, 2003). Esta clasificación registra 381 ciudades todas con un número de habitantes mayor al millón de personas.

Tabla 2. Oferta hídrica superficial por regiones.

Región	Oferta Neta [kms ³ por año]		
	Modal (oferta normal)	Con probabilidad de excedencia del 97,5% (año seco)	Promedio
Alto y medio Magdalena	140	80	150
Cauca	80	50	80
Pacífico	410	280	440
Caribe	70	40	80
Catatumbo	20	10	20
Llanos orientales y Amazonía	1190	780	1280

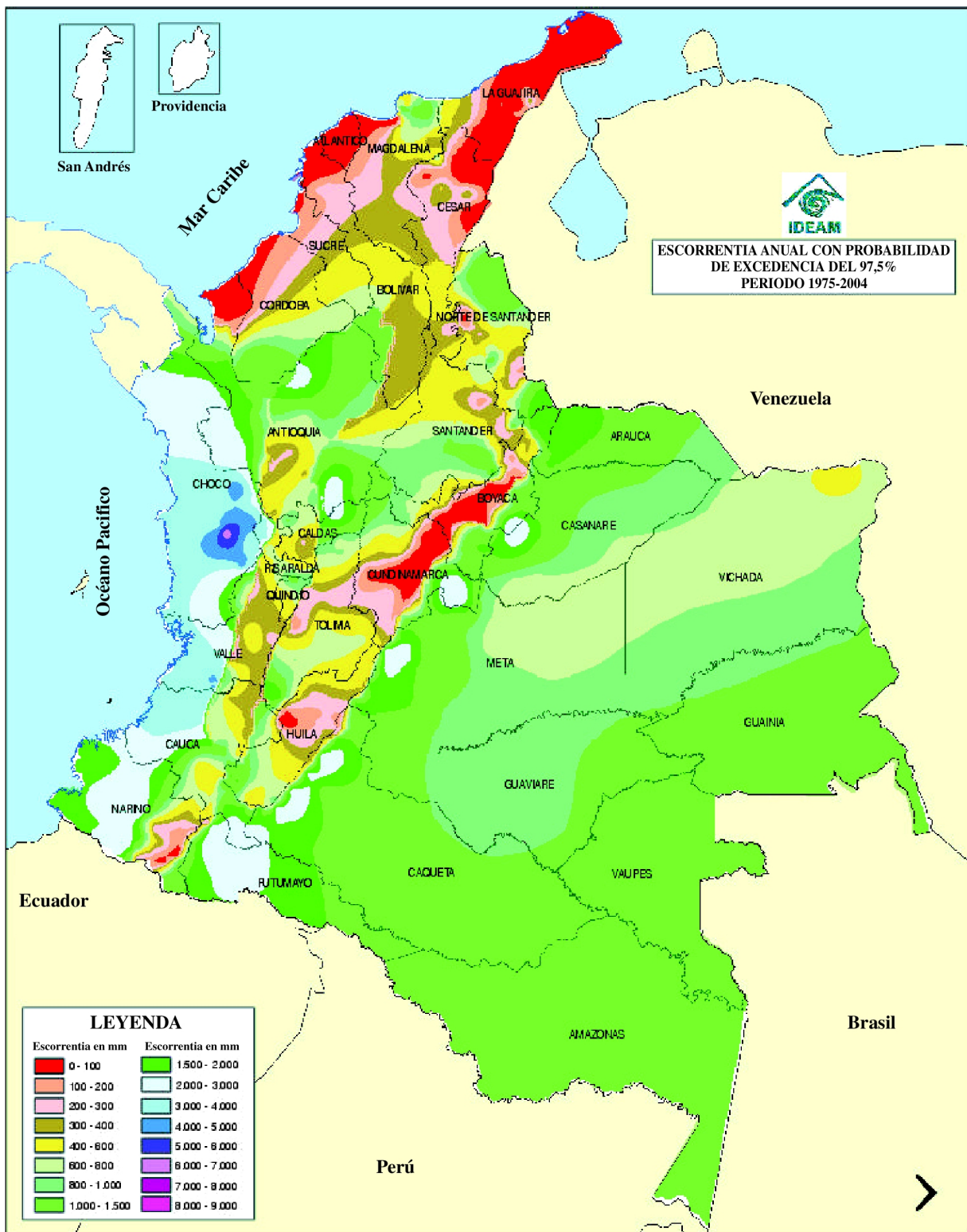


Figura 6. Escorrentía anual [mm/año] con probabilidad de excedencia del 97,5% (IDEAM, 2004).

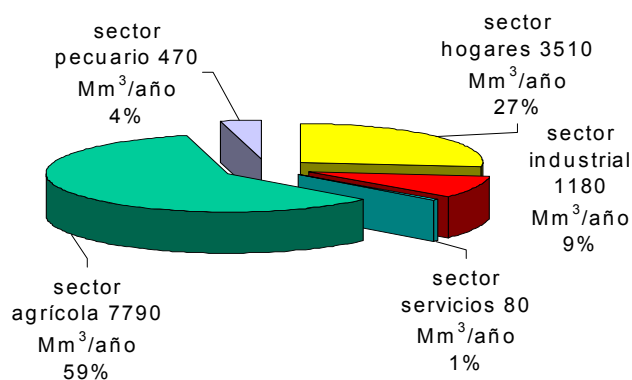


Figura 7. Estructura de la demanda de agua en Colombia

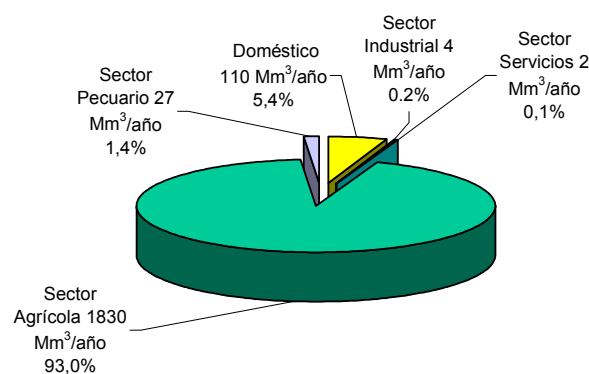


Figura 9. Estructura de demanda del departamento del Magdalena.

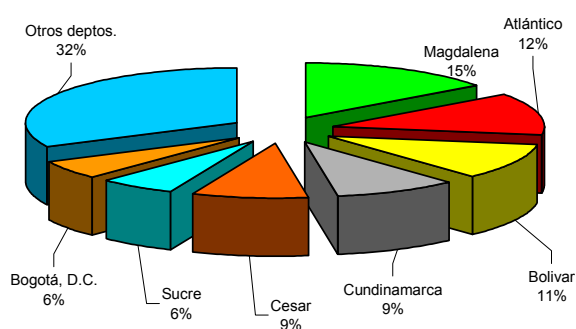


Figura 8. Demanda de agua en Colombia según departamentos.

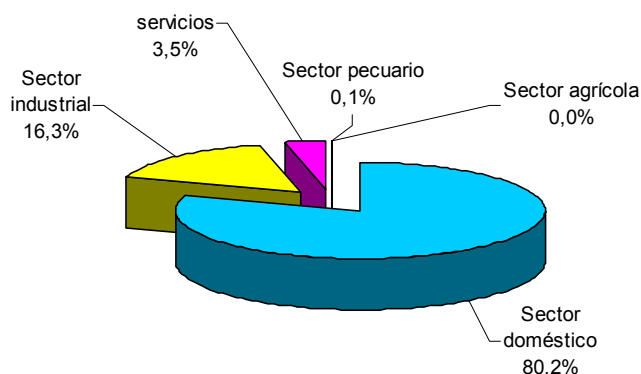


Figura 10. Estructura de demanda hídrica en el Distrito Capital.

Relaciones oferta-demanda de agua en Colombia

Uno de los principales factores de presión sobre los recursos hídricos de un país es el crecimiento poblacional. El mundo incrementa anualmente su población total en el equivalente al doble de la población colombiana actual. A la presión poblacional sobre el recurso hídrico se le adicionan las demandas agrícolas e industriales. Esta presión sobre el recurso hídrico tiene consecuencias adversas que se revierten a la sociedad que demanda el agua. Al crecer la demanda de agua aumentan los vertimientos de aguas residuales que impactan la calidad del recurso hídrico, en algunos casos induciendo la escasez de agua, no por disponibilidad de la misma sino por calidad inadecuada para el consumo humano o para su utilización en las actividades productivas.

Claros referentes del mencionado conflicto entre el uso del territorio y la disponibilidad hídrica de las distintas regiones quedan registradas en las relaciones demanda – oferta de agua, las cuales se evalúan para los escenarios

de niveles de oferta hídrica más probables (modales) y de año seco (de probabilidad de excedencia del 97,5%). Con el trasfondo de los mencionados escenarios el índice de escasez de agua superficial revela en Colombia las zonas con mayor presión sobre el recurso hídrico (véase figuras 11 y 12). De acuerdo con los escenarios presentados en estos mapas, en un año normal el 4% de la población colombiana es afectado por índices de escasez altos (la demanda supera el 50% de la oferta hídrica superficial), el 7% medio altos (entre el 20 y el 50%) y el 30% medios (del 10 al 20%). Por otro lado en un año seco el porcentaje de población afectado por un índice de escasez alto es del 23% (véase figuras 13 y 14).

Proyección del índice de escasez de agua para el año 2025

Estimar el crecimiento y comportamiento de los sectores económicos a largo plazo es muy riesgoso, por cuanto está sujeto a variables cuyo comportamiento es muy incierto en el tiempo. Aun más arriesgado es predecir el

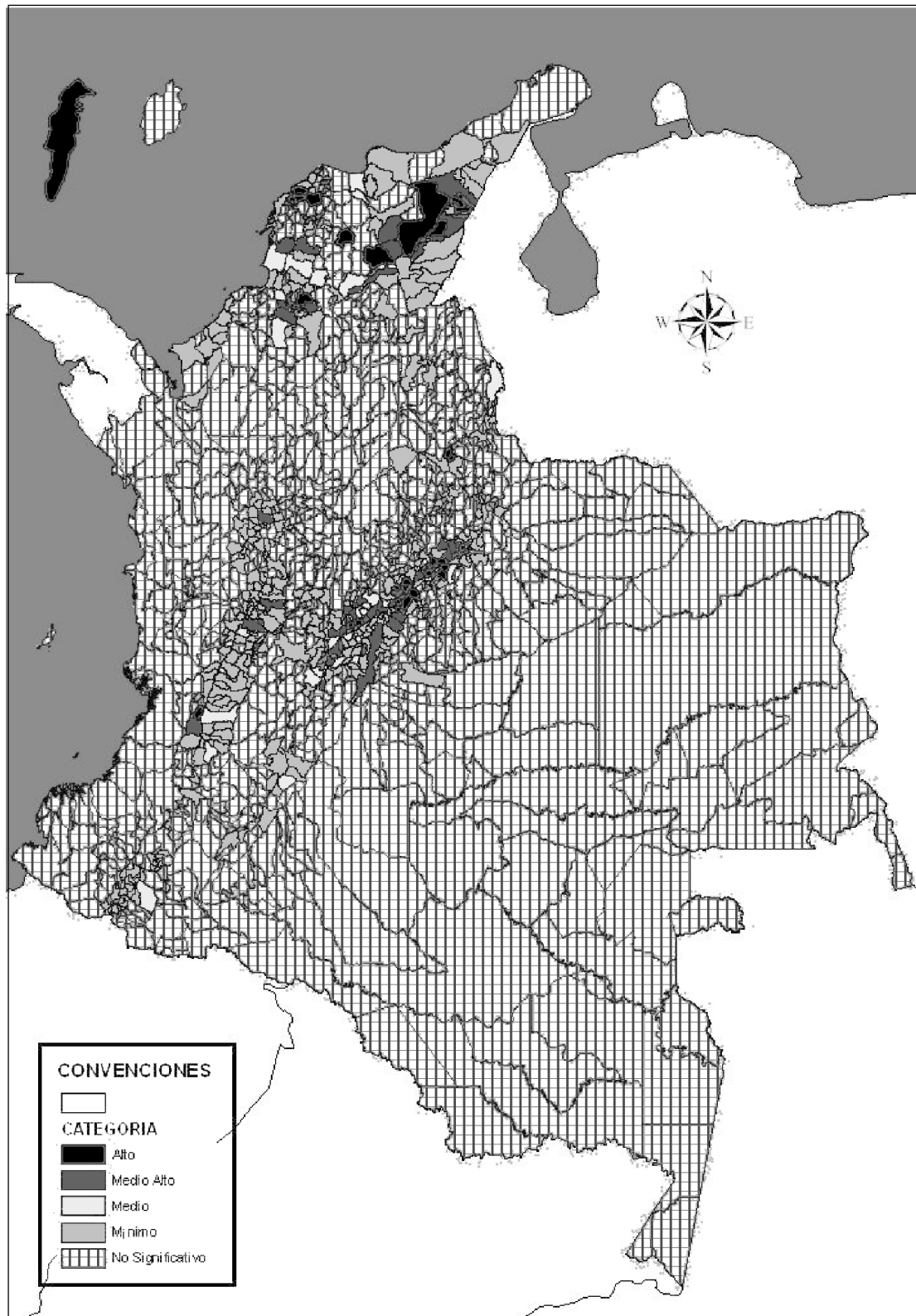


Figura 11. Índice de Escasez de Agua para un año de humedad normal (modal).

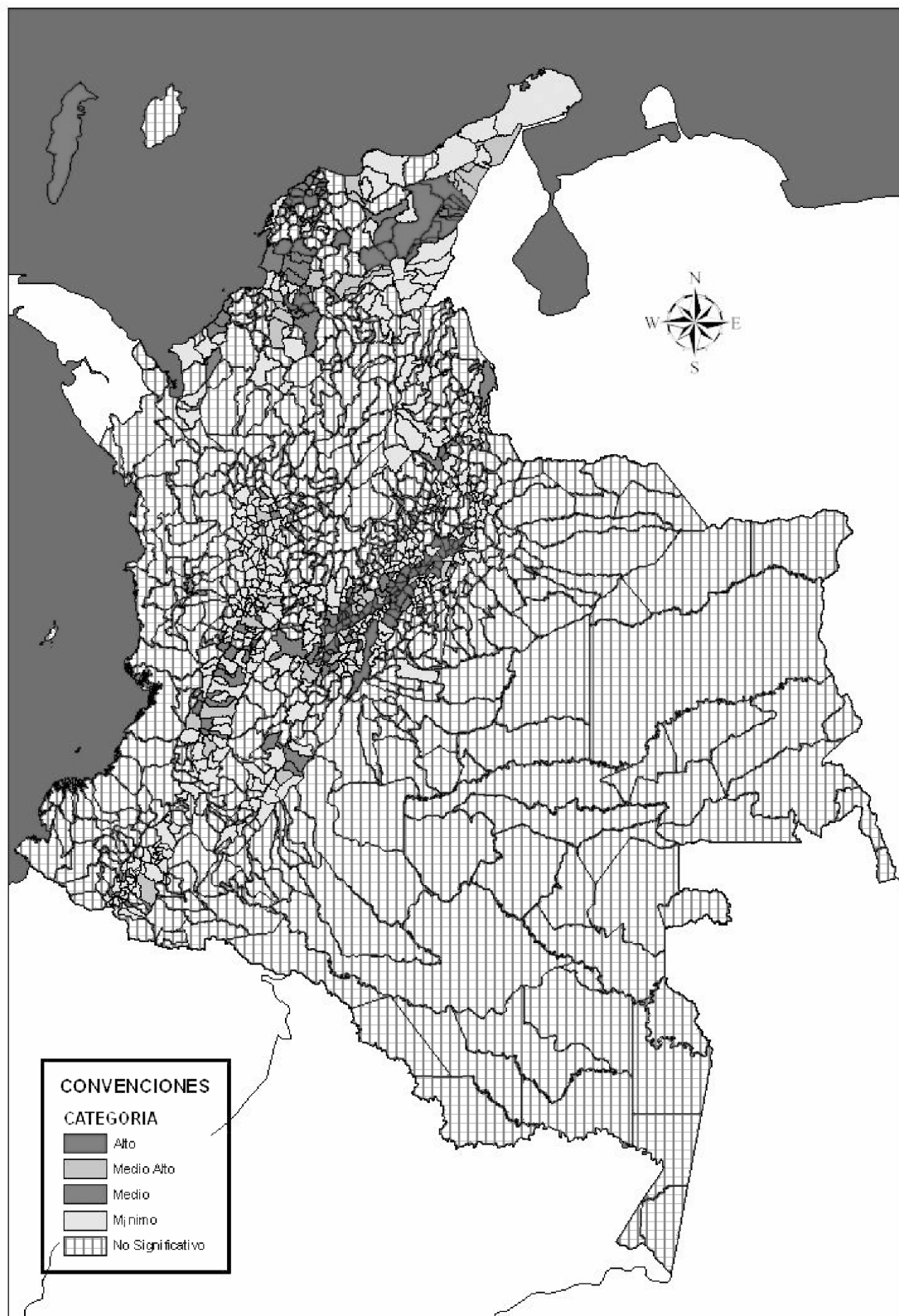


Figura 12. Índice de Escasez de Agua para un año seco (con probabilidad de excedencia del 97,5%).

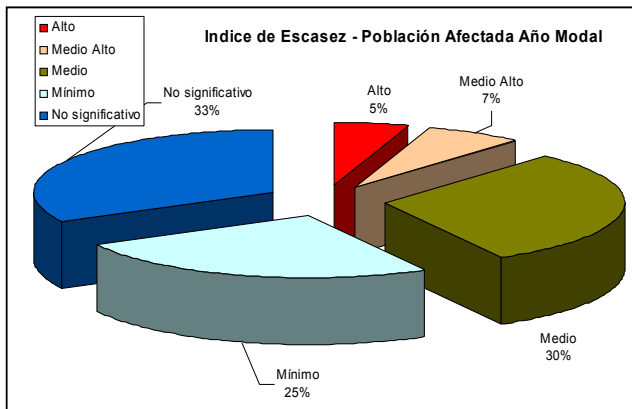


Figura 13. Distribución de la población según índice de escasez en un año normal.

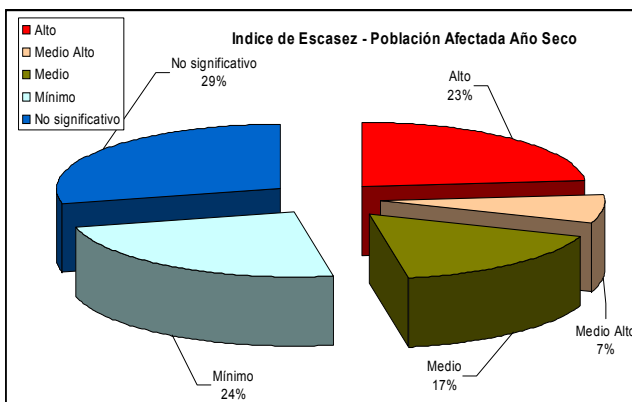


Figura 14. Distribución de la población según índice de escasez en un año seco.

desarrollo tecnológico que vendrá al país en los próximos diez o veinte años y que afectará el nivel de uso de los distintos insumos necesarios para los procesos productivos y para el consumo de agua de los diversos sectores que hacen parte de la economía nacional. Sin embargo, es preciso hacer una estimación así sea muy gruesa, de la demanda del recurso agua por parte de los grandes sectores económicos, pues siendo un recurso natural vital para el desarrollo del país, las instituciones encargadas de hacer prospectiva del desarrollo y bienestar de la población colombiana requieren tener unos elementos mínimos de comportamiento del recurso agua en los próximos veinte años.

Utilizando la información de demanda de agua del año 2004 como punto de partida, se estimó la demanda para el año 2025 teniendo en cuenta el crecimiento estimado de los sectores Agropecuario e Industrial, Consumo final de

Hogares y del sector Servicios, realizado dentro del estudio “Colombia en los próximos veinte años. El país que queremos”, elaborado por el Departamento Nacional de Planeación (Hommes R. Umaña C., 2005). De acuerdo con estos escenarios, manteniendo las conductas de producción actuales y suponiendo que la oferta hídrica superficial se mantiene en el nivel ofrecido por el régimen hidrológico existente se obtuvieron las siguientes proyecciones sobre el índice de escasez (véase figuras 15 y 16):

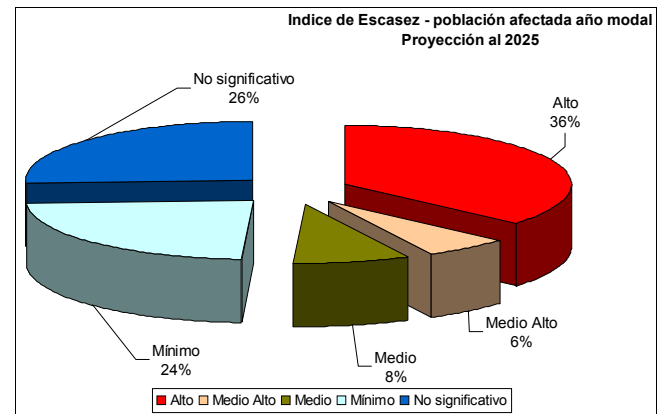


Figura 15. Proyección del índice de escasez para un año normal al 2025.

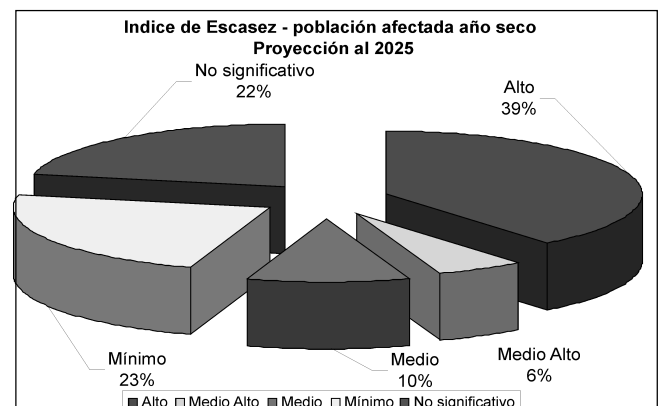


Figura 16. Proyección del índice de escasez para un año seco al 2025.

Conclusiones

Las relaciones demanda-oferta de agua para los sectores socioeconómicos de Colombia constituyen un indicador del estado del recurso hídrico en el país. Su expresión mediante el índice de escasez de agua permite vislumbrar un panorama en el que las magnitudes de demanda y de

oferta máximas no coinciden en el espacio, ocasionando conflicto y altos niveles de presión sobre el recurso hídrico. Esta situación, que refleja un uso inapropiado del territorio, es el resultado de una planeación con mecanismos inapropiados de asignación del agua, que en muchos casos, gracias a la ausencia de sistemas de seguimiento del estado del recurso hídrico amplifica la presión sobre el recurso hídrico dada la ausencia de elementos técnicos para la toma de decisiones en sectores de alta demanda hídrica.

La solución ante tal contexto consiste en el fortalecimiento de la gestión integral del recurso hídrico, especialmente en las estrategias no sólo de protección de la oferta hídrica existente, de la expansión de las redes hidrométricas y de otros mecanismos de seguimiento del recurso, sino también de reducción de la demanda de agua. La conclusión anterior es una invitación al fortalecimiento de los programas de ahorro y uso eficiente del agua y a la intensificación de los mecanismos limpios de producción. En este sentido es interesante observar y seguir de cerca la experiencia del sector hidrológico alemán que ha logrado significativas reducciones de la demanda de agua sobre fuentes alejadas aprovechando en forma creciente el agua de lluvia para sustituir el agua potable en retretes, lavamanos y riego de jardines (**Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Umwelt Bundes Amt für Mensch und Umwelt, 2001**).

En algunos lugares del país, de continuar la tendencia actual de presión sobre el recurso, será de obligación forzada la introducción de medidas estructurales para mitigar el estado de alta presión en que se encuentran las corrientes superficiales. A su vez, como estrategia de desarrollo sostenible, se recomienda a los municipios asociarse a fuentes seguras, mediante la implementación de acueductos regionales que presenten una buena relación costo beneficio. En el sector agrícola es necesario implementar programas de innovación tecnológica con el fin de reducir los altos niveles de pérdida de agua en este sector de gran demanda hídrica. Adicionalmente deben desarrollarse estrategias para la reducción de las cargas nutrientes aportadas por este sector, las cuales finalmente afectan a los cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

Aunque puede parecer que el índice de escasez es un indicador muy exigente al generar alarmas a partir del momento en que la demanda alcanza el 20% de la oferta neta, es importante tener presente que se están usando los umbrales recomendados por el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (**Shiklomanov, 1998**). Estos umbrales deben ser conservadores ya que deben tener en

cuenta las deficiencias del indicador como: a) la dificultad de considerar adecuadamente todos los factores que reducen la oferta total al estimar la oferta neta (ej. la calidad del agua y las necesidades ecológicas por encima de los caudales mínimos históricos); y b) la incertidumbre asociada a la escala de la información disponible (pocas veces se tiene información primaria a escala local forzando el uso de estimadores de la oferta y la demanda). Finalmente, al incrementar la intensidad de uso del agua de las corrientes superficiales se provoca un aumento en las tasas de vertimientos de aguas negras o grises a las mismas y por ende de los niveles de presión por contaminantes. Esto obliga a tener umbrales críticos por demanda más conservadores con el fin de evitar reacciones tardías no sólo ante limitaciones en cantidad sino también por restricciones en calidad.

Bibliografía

- Bendat J.S., Piersol A.G.** 1986. Random data analysis and measurements procedures. 540 p. John Wiley & Sons, New York.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Umwelt Bundes Amt für Mensch und Umwelt, 2001.** El sector hidrológico en Alemania. Métodos y experiencias. Berlin, 150 p.
- Drozdov O.A.** 1936. Método de construcción de redes meteorológicas en regiones planas, Trabajos del GGO edición 12 (3).
- Drozdov O.A., Shepeliowski A.A.** 1946. Teoría de la interpolación de un campo estocástico y su utilización en mapas meteorológicos y racionalización de la red, Trabajos del NIU – GUGMS, serie 1, vol. 13.
- Falkenmark, M.** 1999. Forward to the future: a conceptual framework for water Dependence (Volvo environment prize lecture 1998), en *AMBIO a journal of the human environment*, Royal Swedish Academy of Sciences, **XXVIII**(4): 356-361.
- Gardner-Outlaw, T., Engelman, R.** 1997. Sustainig water, easing scarcity: a second update. Population Action International. Fuente en Internet: www.populationaction.org. 20 p. Revisado el 06 de junio de 2005.
- Gandin L. S.** 1963. Análisis objetivo de campos meteorológicos, Guidrometeoizdat, Leningrado, 287 p.
- Gandin L. S.** 1976. Análisis tetradimensional de campos meteorológicos, Guidrometeoizdat, Leningrado, 61 p.
- Haan, T.C.** 2002. Statistical methods in hydrology. 378 p. Iowa state press, Iowa.
- Hombres R. Umaña C.** 2005. *Colombia en los próximos veinte años. El país que queremos / Archivos de Economía*, Dirección de Estudios Económicos, Documento 280, 36 p.
- IDEAM, 1998.** Estudio Nacional del Agua. IDEAM. Bogotá D.C., 253 p.
- IDEAM, 2004.** Informe anual sobre el estado del medio ambiente en Colombia, Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá, 256 p.

- Korzun, V.I., Sokolov, A.A., Budyko, M.I., Voskresensky, K.P., Kalinin, G.P., Konoplyantsev, A.A., Korotkevich, E.S. & L'vovitch, M. I., eds.** 1978. Atlas of world water balance. USSR National Committee for the International Hydrological Decade. English translation. Paris, UNESCO. 663 pp.
- L'vovitch, M. I.** 1970. World water balance (General Report). Symposium on the world water balance. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, Pub. No 93, Vol. II, pp. 401-415.
- L'vovitch, M.I.** 1986. Water and life. Moscow, Mysl.
- Martínez, L.F.** 2001. Control Estadístico de Calidad, Información Hidrológica Nivel Mensual. Automatización SPSS y DEMETRA. Investigación desarrollada para el IDEAM, Subdirección de Hidrología.
- Martínez, L.F. y Ruiz L.F.** 1998. Metodología para la estimación de datos faltantes en series temporales diarias, Investigación desarrollada para el IDEAM, Subdirección de Hidrología.
- Shiklomanov I.A.** 1998. World water resources a new appraisal and assessment for the 21st century. A summary of the monograph World Water Resources prepared in the framework of the International Hydrological Program, UNESCO, Paris, 40 p.
- UNESCO,** 1979. Balance hídrico mundial y recursos hidráulicos de la tierra / Estudios e informes sobre hidrología 25, 821 p, Madrid.
- UNESCO,** 2005. World Water assessment program, revisado el 01 de octubre de 2005, http://www.unesco.org/water/wwap/index_es.shtml.
- UN-Consejo Económico y Social,** 1997: Evaluación general de los recursos de agua dulce del mundo. Informe del Secretario General, Nueva York, 55 p.
- UN/WWAP (United Nations/World Water Assessment Programme).** 2003. UN World Water Development Report: Water for People, Water for Life. Paris, New York and Oxford, UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) and Berghahn Books.

Recibido: 11 de abril de 2007

Aceptado para su publicación: 13 de junio de 2008