

# Metodología de apoyo a la decisión para la gestión integrada del agua en el sector institucional<sup>1</sup>

*Methodology of decision support for integrated water management in the institutional sector*

Adrián Augusto Perpiñán Guerra\*  
Ramiro Vicente Marbello Pérez\*\*

*Fecha de recepción: 21 de abril de 2014*

*Aceptación: 30 de octubre de 2014*

*Recibido versión final: 30 de octubre de 2014*

## Resumen

Este documento presenta una metodología de apoyo a la decisión para la gestión integrada del agua en el sector institucional, fundamentada en la aplicación de los métodos de análisis multiobjetivo ELECTRE III, Programación de Compromisos y Promedios Ponderados, considerando objetivos ambientales, económicos, sociales, técnicos y tecnológicos, e integrando la estructura de preferencias de distintos decisores simultáneos. Se desarrolla en seis etapas principales: diagnóstico de la gestión del agua; formulación de estrategias y metas de gestión; identificación y preparación de alternativas; establecimiento de criterios de evaluación; aplicación del método de análisis multiobjetivo; e identificación de las alternativas mejor calificadas. Esta metodología se aplicó al núcleo El Volador de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, evaluando siete alternativas, y como resultado se pudo establecer que, de acuerdo a las características específicas de la Institución, la modernización de la red de acueducto y de los sistemas hidrosanitarios, y el aprovechamiento de las aguas subterráneas, satisfacen las preferencias de los decisores, mientras que la alternativa menos favorable fue el tratamiento y reutilización de las aguas residuales.

## Palabras clave

Toma de decisiones, análisis multiobjetivo, gestión y uso eficiente del agua, autosuficiencia hídrica, sector institucional.

---

1. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

\* Magíster en Ingeniería de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Nacionalidad: colombiana. Correo electrónico: aaperpinang@unal.edu.co.

\*\* M.Sc., Ph.D (c), Profesor del Departamento de Geociencias y Medioambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Nacionalidad: colombiana. Correo electrónico: rymarbel@unal.edu.co.

## Abstract

This paper presents a decision support methodology for integrated water management in the institutional sector, based on the application of three multiobjective analysis methods: ELECTRE III, Schedule Commitments and Weighted Averages. The methodology considers environmental, economic, social, technical and technological objectives, and integrates structure preferences of different and simultaneous decision makers. It takes place in six major stages: diagnosis of water management; strategy formulation and management goals; identification and preparation of alternatives; establishment of evaluation criteria; application of the multi-objective analysis method; and identifying the best qualified alternatives. This methodology was applied to the core *El Volador* of the National University of Colombia (city of Medellín) and seven alternatives were evaluated. Results show that, according to the specific characteristics of the institution, the modernization of the water network and plumbing systems, as well as the use of groundwater, satisfy the preferences of decision makers, whereas treatment and reuse of wastewater was the less favorable alternative.

## Keywords

Decision making, multiobjective analysis, management and efficient water use, water self-sufficiency, institutional sector.

## Introducción

Durante los últimos 50 años se ha triplicado la demanda global de agua en el planeta (Gleick 2003) y de manera simultánea, las fuentes de suministro de agua dulce de fácil aprovechamiento, tales como ríos, lagos y acuíferos, tienden a ser cada vez más limitadas, como consecuencia directa de la explotación excesiva y el deterioro de su calidad. Adicionalmente, la evidencia del cambio climático global y variabilidad climática se constituyen en una real amenaza para la seguridad de la población humana.

De acuerdo a las estimaciones realizadas por las Naciones Unidas, los países latinoamericanos son predominantemente urbanos, dado que, en la actualidad, el 77% de la población habita en las ciudades. Se espera que para el año 2030, dicho porcentaje ascienda al 84%, lo cual supone un inmenso reto para los administradores locales, regionales y nacionales (Torres y García 2010).

En Colombia, más del 80% de las cabeceras municipales del país se abastecen de pequeñas

fuentes de agua (arroyos y quebradas) con bajas condiciones de regulación y alta vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático y el fenómeno de El Niño (MAVDT 2010). Ello conlleva a la necesidad de adoptar mecanismos de gestión para reducir los riesgos sociales, ambientales y económicos, y garantizar la sostenibilidad hídrica en las ciudades y centros poblados del país.

En la medida en que se implementen acciones de ahorro, uso eficiente y aprovechamiento de fuentes alternas de suministro de agua al interior de las ciudades, se reducirá la vulnerabilidad socioeconómica y ambiental ante la ocurrencia de eventos de sequías extremas (Makropoulos et al. 2008). El incremento de la capacidad de autoabastecimiento hídrico de las áreas urbanas se podría traducir en la disminución de la tasa de captación de agua desde las fuentes de abastecimiento externas, minimizando la generación de aguas residuales urbanas y, por tanto, el impacto sobre los ecosistemas asociados a los sistemas hídricos receptores. Todo esto contribuye con el aumento

de la capacidad autodepuradora de los ecosistemas acuáticos, especialmente en períodos secos, y con la mayor disponibilidad de agua para el ambiente y la conservación de hábitats nativos.

Así mismo, la reducción del consumo de agua en los centros poblados incrementa la vida útil de los sistemas de potabilización y de tratamiento de aguas residuales, disminuyendo también los costos de operación asociados (Lee et al. 2011). Esto puede reflejarse en la disminución de los costos en los servicios de acueducto y saneamiento básico, aspecto que favorecería la sostenibilidad económica de las familias colombianas, así como de las entidades públicas y las empresas privadas. En los sectores del país en donde el servicio de acueducto o alcantarillado operen mediante sistemas de bombeo, se reducirían los consumos energéticos de manera proporcional al ahorro del agua.

Aunque a nivel mundial se está trabajando en materia de innovación tecnológica asociada a la cadena del consumo doméstico de agua, las distintas opciones existentes en el mercado son poco conocidas y utilizadas por el grueso de la población (Shyama et al. 2011). En Colombia, la implementación de las opciones tecnológicas orientadas al ahorro de agua se ha realizado de manera aislada en algunos centros comerciales e instituciones educativas (Palacio 2010). Factores como la limitación de infraestructura y espacios físicos, los requerimientos energéticos, la discontinuidad y la complejidad tecnológica, los altos costos de inversión inicial y de mantenimiento, los estándares de calidad del agua, los bajos precios en el servicio de agua potable y los largos períodos de recuperación de la inversión (entre otros) se convierten en aspectos limitantes al momento de tomar la decisión de implementar alternativas técnicas y tecnológicas para el ahorro y uso eficiente del agua, y el aprovechamiento de fuentes alternas de suministro, dado el nivel de incertidumbre implícitamente asociado a la decisión.

Mediante la presente investigación se desarrolla una metodología fundamentada en la aplicación de técnicas de análisis multiobjetivo, considerando aspectos técnicos, tecnológicos, ambientales, sanitarios y económicos, y considerando la estructura de preferencias de distintos decisores simultáneos. La metodología se aplica al núcleo El Volador de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, y es una herramienta que podría contribuir a mejorar la gestión de la demanda de agua en cabeceras municipales y nuevos desarrollos urbanísticos, dado que los usos del agua en los campus universitarios de gran tamaño, si bien no son estrictamente iguales, pueden ser comparados con los usos dados en ciudades intermedias (Bonnet et al. 2001).

### **Metodología propuesta para apoyar la decisión en la gestión integrada del agua**

La metodología que se propone para apoyar la toma de decisiones para la gestión integrada del agua, comprende el desarrollo de distintas fases de levantamiento y análisis de información técnica, seguidas de la evaluación y selección de alternativas de aprovechamiento, ahorro y uso eficiente del agua, mediante la aplicación de los métodos de análisis multiobjetivo ELECTRE III, Programación de Compromisos y Promedios Ponderados. A continuación se indican los aspectos más importantes de cada fase:

#### **Diagnóstico situacional de la gestión del agua en el territorio**

Se deben reconocer con detalle todos los flujos, procesos, operaciones e instalaciones existentes que se relacionan o generan influencia sobre el recurso hídrico localmente. Para el núcleo El Volador de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, el modelo conceptual del ciclo hidrológico se sintetiza de acuerdo a lo presentado en la Figura 1.

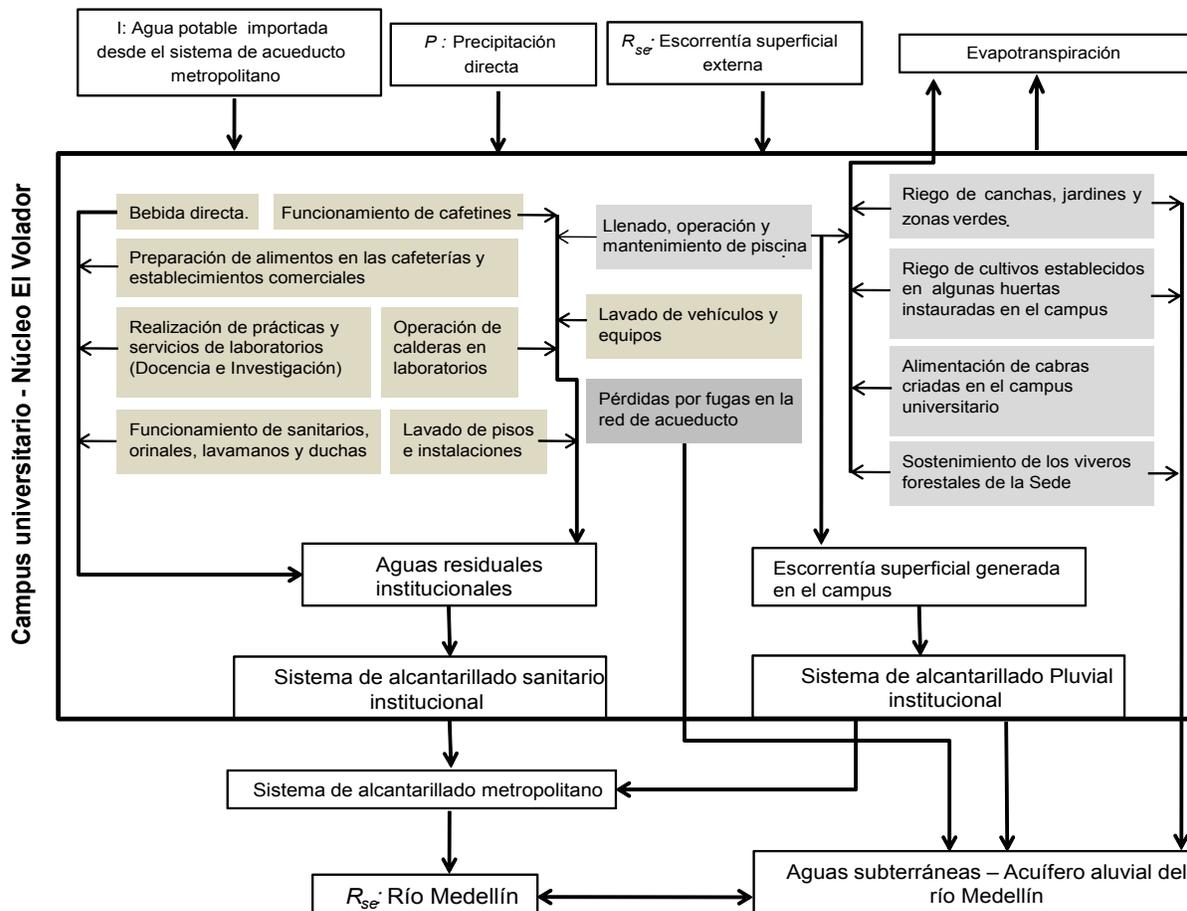


FIGURA 1. Modelo conceptual del ciclo hidrológico en el Núcleo El Volador. Fuente: elaboración propia.

Las anteriores consideraciones se sintetizan en la siguiente ecuación:

$$P + I + R_{se} = ETP + R_w + R_{si} + [\Delta_s f(I_i + R_w + I_s)] \quad \text{Ecuación 1. donde,}$$

$P$ : aguas lluvias directas;  $R_{se}$ : escorrentía superficial y subsuperficial proveniente de áreas externas al campus,  $I$ : agua potable importada desde la red de acueducto metropolitana.

$ETP$ : evapotranspiración;  $R_w$ : aguas residuales institucionales;  $R_{si}$ : escorrentía superficial y subsuperficial generada en el campus.

$\Delta_s$ : cambios en el almacenamiento;  $I_s$ : agua subterránea desplazada a través del acuífero aluvial del río Medellín;  $R_{wi}$ : aguas residuales infiltradas en el acuífero por medio de fugas;  $I_i$ : agua potable infiltrada en el acuífero por uso y por medio de fugas.

El comportamiento del ciclo hidrológico del núcleo El Volador permite identificar que el agua recibe los siguientes usos: consumo humano y doméstico, industrial, recreativo, pecuario y agrícola. Así mismo, permite identificar posibles fuentes de abastecimiento de agua adicionales al acueducto metropolitano, las cuales son: aguas lluvias, aguas subterráneas y aguas residuales generadas en el campus universitario. Una vez conocidos los usos específicos dados al agua en el territorio, es necesario cuantificar los consumos promedios, identificar la calidad actual y la calidad permitida para cada uso, tal y como se presenta en la Tabla 1.

TABLA 1. Distribución de los consumos de agua por usos en el núcleo El Volador.

USO ESPECÍFICO	CALIDAD ACTUAL	CRITERIO DE CALIDAD PERMISIBLE	CONSUMO PROMEDIO (l/día)	% REPRESENTATIVO
Bebida directa.	Agua potable	Agua potable	8.410	2,5%
Realización de prácticas y servicios de laboratorios (Docencia e Investigación).	Agua potable	Agua potable y agua segura	4.800	1,4%
Funcionamiento de cafetines.	Agua potable	Agua potable	1.680	0,5%
Funcionamiento de sanitarios.	Agua potable	Agua segura	152.280	44,5%
Funcionamiento de orinales.	Agua potable	Agua segura	17.640	5,2%
Funcionamiento de lavamanos.	Agua potable	Agua potable	57.000	16,7%
Funcionamiento de duchas.	Agua potable	Agua potable	8.560	2,5%
Lavado de pisos e instalaciones.	Agua potable	Agua segura	4.260	1,2%
Preparación de alimentos en las cafeterías y establecimientos comerciales presentes en la sede.	Agua potable	Agua potable	32.250	9,4%
Pérdidas por fugas en la red de acueducto.	Agua potable		21.600	6,3%
Riego de canchas, jardines y zonas verdes.	Agua potable	Agua segura	10.800	3,2%
Lavado de vehículos y equipos.	Agua potable	Agua segura	7.000	2,0%
Operación de calderas en el laboratorio de lácteos.	Agua potable	Agua segura	250	0,1%
Llenado, operación y mantenimiento de piscina.	Agua potable	Agua potable	6.000	1,8%
Alimentación de cabras criadas en el campus universitario.	Agua potable	Agua segura	1.500	0,4%
Sostenimiento de los viveros forestales de la sede.	Agua potable	Agua segura	5.000	1,5%
Riego de cultivos establecidos en algunas huertas instauradas en el campus.	Agua potable	Agua segura	3.000	0,9%
TOTAL (m <sup>3</sup> /día)			342,03	100%

Fuente: elaboración propia.

En esta etapa se deben definir, con claridad y sin ambigüedades, los problemas, necesidades u oportunidades de mejora, considerando a su vez, sus causas y efectos, para lo cual se recomienda adoptar el método del Árbol del problema.

### Definición de estrategias y metas de gestión del recurso hídrico

Se realiza la comparación entre la situación actual obtenida a partir del diagnóstico, y la situación deseada

o esperada, para lo cual se recomienda aplicar el método del Árbol de objetivos, el cual se construye transformando en positivos los aspectos enunciados en el árbol del problema. A partir de las problemáticas u oportunidades de gestión identificadas en el núcleo El Volador, se propusieron las estrategias que se indican en la Tabla 2.

Luego de la definición de las dos estrategias propuestas, se establecieron las siguientes cuatro metas de gestión, a cumplir en el mediano y largo plazo: a) Eliminar las pérdidas de agua potable por fugas en la

red de distribución y en el sistema de aprovechamiento de agua del núcleo El Volador, disminuyéndolas desde 21.600 l/día a menos de 100,0 l/día. b) Disminuir el consumo per cápita del agua potable tomada desde la red de acueducto metropolitano, desde 40 l/persona-día hasta menos de 20 l/persona-día. c) Disminuir el costo per cápita de acceso al recurso hídrico en el

núcleo El Volador, pasando, en el mediano plazo, de un 100% (\$3.270 persona/mes) a, por lo menos, un 60% (\$1.962 persona/mes); esta meta considera la base de precios de diciembre de 2012. d) Suplir, por lo menos, el 20% de la demanda de agua en el núcleo El Volador, mediante el aprovechamiento de fuentes alternativas de suministro.

TABLA 2. Estrategias de gestión del agua en el núcleo El Volador

PROBLEMÁTICA U OPORTUNIDADES DE GESTIÓN IDENTIFICADAS	ESTRATEGIAS
Desaprovechamiento de las aguas lluvias, aguas subterráneas y las aguas residuales, como fuentes alternas de suministro.	Aprovechar las aguas lluvias, las aguas subterráneas o las aguas residuales como fuentes alternas para suplir parcialmente las demandas de agua en el campus universitario.
Descargas directas de aguas residuales al alcantarillado, sin tratamiento previo.	
Mezcla de la red de aguas lluvias con la red de aguas residuales institucionales.	
Consumo de agua potable en labores que requieren agua de inferior calidad.	
Eventos de inundación con aguas lluvias, en algunos sectores del campus.	Reducir los consumos de agua potable y la producción de aguas residuales en el campus universitario, rehabilitando la red de acueducto y modernizando las instalaciones y aparatos hidrosanitarios.
Excesivo consumo de agua potable en el campus, como consecuencia del mal estado y la obsolescencia de la red de acueducto y de las instalaciones y aparatos hidrosanitarios.	
Generación de altos volúmenes de aguas residuales.	
Elevados costos de funcionamiento causados por el pago de servicios de agua potable y alcantarillado.	
Inexistencia de herramientas de control, monitoreo y alerta sobre el estado del sistema de acueducto.	

Fuente: elaboración propia a partir de IDEA UN (2012).

## Identificación y preparación de alternativas de aprovechamiento, ahorro y uso eficiente del agua

Las soluciones para la gestión integrada del agua deben garantizar niveles aceptables de continuidad y calidad de servicio, ser acordes a la infraestructura existente en el territorio, generar un mínimo impacto negativo sobre el medio ambiente natural, y al mismo tiempo, deben ser social y económicamente aceptables. A partir de las estrategias propuestas para mejorar la gestión integrada del agua en el núcleo El Volador, se plantearon distintas alternativas dentro las cuales se seleccionaron siete, las cuales presentaban el mismo nivel de posibilidades de ser implementadas, y se encontraban en el mismo nivel

de importancia para el logro de las metas propuestas. Las alternativas propuestas son:

- Alternativa A1. Instalación de nuevas redes de acueducto + medidores de consumo en cada bloque + sanitarios eficientes (4,8 lpd) + orinales eficientes (0,5 lpd) (tecnología de sensor).
- Alternativa A2. Instalación de nuevas redes de acueducto + medidores de consumo en cada bloque + sanitarios eficientes (4,8 lpd) + orinales eficientes (0,5 lpd) (tecnología de *push*).
- Alternativa A3. Instalación de nuevas redes de acueducto + medidores de consumo en cada bloque + sanitarios ultra eficientes (3,8 lpd) + orinales secos (0 lpd).

- Alternativa A4. Conservación de la actual red de acueducto + un medidor de consumo central + sanitarios eficientes (4,8 lpd) + orinales eficientes (0,5 lpd) (tecnología de *push*).
- Alternativa A5. Sistema de tratamiento de aguas residuales tipo Lodos Activados por aeración extendida + planta de potabilización compacta + sistema de bombeo + almacenamiento + conducción + distribución + aprovechamiento.
- Alternativa A6. Captación de aguas subterráneas + planta de potabilización compacta + sistema de bombeo + almacenamiento + conducción + distribución + aprovechamiento.
- Alternativa A7. Captación de aguas lluvias por bloques + planta de potabilización compacta + sistema de bombeo + almacenamiento + conducción + distribución + aprovechamiento.

Para obtener un mayor nivel de confianza en el proceso de evaluación, se analizaron para cada una de las alternativas los siguientes aspectos básicos: consumo per cápita global esperado; costo per cápita global esperado; costos de inversión; requerimiento de insumos; requerimientos de energía para la operación; frecuencia de mantenimiento estimada;

exigencias de personal técnico y/o especializado para la operación y mantenimiento; generación de residuos y/o subproductos; vida útil de los constituyentes del sistema; requerimiento de espacios físicos; afectación de la configuración paisajística y estética del territorio; y vulnerabilidad ante acciones de vandalismo.

## Establecimiento de objetivos y criterios de evaluación

Toda decisión debe ser analizada únicamente en función de los objetivos fundamentales, los cuales son aquellas razones esenciales para tomar la decisión en un contexto específico (Keeney 1996). Es importante estructurar adecuadamente los objetivos, de tal forma que no se presente duplicidad de los mismos, y en lo posible, se debe manejar un número reducido de criterios para reducir la sensibilidad de los métodos de análisis multiobjetivos (Smith et al. 2000). Para las condiciones del núcleo El Volador se establecieron cinco objetivos y siete criterios, a los cuales se le definió un indicador, con el propósito de obtener un patrón de comparación para las alternativas evaluadas. En la Tabla 3 se presentan los objetivos, criterios e indicadores definidos para el caso de estudio.

TABLA 3. Objetivos, criterios e indicadores asociados al proceso de evaluación.

OBJETIVOS	CRITERIOS	INDICADORES	UNIDAD
Ambiental	C <sub>1</sub> Minimizar el consumo de agua potable hasta los niveles mínimos necesarios	Consumo global de agua esperado	l/persona-día
	C <sub>2</sub> Maximizar el aprovechamiento de fuentes alternas de suministro de agua en el territorio	Autosuficiencia hídrica	%
Económico	C <sub>3</sub> Minimizar los costos de sostenibilidad (operación y mantenimiento)	Costos operativos	\$/persona-mes
	C <sub>4</sub> Minimizar la inversión inicial	Costo de inversión	\$
Sanitario	C <sub>5</sub> Minimizar los riesgos sobre la salud de la comunidad universitaria	Riesgos sobre la salud	1 – 10*
Técnico	C <sub>6</sub> Maximizar la continuidad del servicio	Continuidad del servicio	1 – 10**
Tecnológico	C <sub>7</sub> Maximizar la vida útil del sistema	Tiempo de vida útil	años

\*1 representa mínimo riesgo, y 10 representa riesgo máximo.

\*\*1 representa mínima continuidad, y 10 representa máxima continuidad.

Fuente: elaboración propia

## Asignación de pesos a las distintas alternativas según los objetivos propuestos

Dado que el ejercicio de la toma de decisión está a cargo de un comité o junta de decisores simultáneos, se realizó el siguiente paso metodológico: a) Cada uno de los decisores, mediante un cuestionario, asigna un peso o valor de ponderación a los objetivos, en valores comprendidos entre 1 y 100, de tal forma que la suma de los pesos asignados por cada decisor a los objetivos sea igual a 100. b) Para establecer el factor de ponderación de cada objetivo, se determina la media aritmética obtenida sobre todos los valores

asignados por los decisores al objetivo. c) Luego de preparar cada alternativa, se realiza la asignación de los pesos  $Z_{ij}$  de cada una de ellas respecto a los objetivos de evaluación, conformando una matriz de pagos.

Es importante resaltar que, para algunos criterios, la asignación de los pesos a las alternativas se realiza de manera directa, tal como sucede con los criterios  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  y  $C_7$ , ya que son netamente cuantitativos y su valoración está implícita en las características técnicas de cada alternativa. No obstante, para la calificación de los criterios  $C_5$  y  $C_6$ , por ser cualitativos, es necesario tener en cuenta las consideraciones que se presentan en la Tabla 4.

TABLA 4. Factores para la calificación de los criterios  $C_5$  Minimizar los riesgos sobre la salud de la comunidad universitaria; y  $C_6$  Maximizar la continuidad del servicio

FACTORES	CALIFICACIÓN DE LA AMENAZA
<b>Calidad de la fuente de abastecimiento</b>	
Aguas negras	10
Aguas grises	8
Agua superficial de calidad deficiente	8
Aguas subterráneas urbanas	6
Aguas lluvias	4
Agua superficial con calidad natural	2
Acueducto municipal	1
<b>Estado de la red de distribución</b>	
Red de distribución con presencia recurrente de fugas de agua potable (3 o más fugas promedio año).	10
Red con edad de operación superior a 30 años	8
Red con edad entre 10 a 30 años de operación	6
Red con edad menor a 10 años	2
Red con bajo índice de fugas de agua	1
<b>Contacto con aparatos hidrosanitarios</b>	
Aparatos con válvula tipo perilla	6
Aparatos con descarga tipo <i>push</i>	4
Aparatos con descarga tipo sensor	1
<b>Disponibilidad de agua en la fuente de suministro</b>	
Acueducto municipal	10
Agua subterránea	8
Agua superficial de fuente natural	6
Aguas residuales	4
Aguas lluvias	2

Probabilidad de fallo de las tecnologías	
Tecnología mecánica	8
Tecnología con aparatos y/o equipos electromecánicos	6
Tecnología electrónica	2
Según el estado de la red de distribución de agua	
Red con edad menor a 10 años	8
Red con edad entre 10 a 30 años de operación	4
Red con edad de operación superior a 30 años	2

Nota: en los casos en los que la alternativa combina distintos factores, se estima el promedio de la calificación de los factores incluidos.

Fuente: elaboración propia.

## Aplicación de métodos de análisis multiobjetivo – AMO

Para la solución de problemas específicos se recomienda el uso de distintas metodologías, preferiblemente pertenecientes a diferentes grupos, de tal manera que se pueda obtener un mayor nivel de confianza sobre los resultados, sobre la formulación del problema o sobre la representación de la estructura de preferencias del decisor (Smith et al. 2000). Teniendo en cuenta dicho postulado, esta metodología aplica tres métodos de análisis multiobjetivo: Promedios Ponderados, del grupo de los métodos basados en utilidades o valores; Programación por Metas, perteneciente al grupo de métodos basados en distancia; y ELECTRE III, del grupo de los métodos de clasificación.

Para la aplicación de los métodos seleccionados se empleó el software SIAM 1.0 Beta (Sistema de Análisis Multiobjetivo), desarrollado en el Posgrado de Gestión Ambiental de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. En las Tablas 5 y 6 se indican los datos de entrada requeridos por la aplicación para los tres métodos AMO escogidos. Para el método ELECTRE III, adicionalmente, se deben definir los umbrales difusos de Indiferencia, Preferencia y Veto. Es importante resaltar que a cada método se le debe realizar un análisis de sensibilidad. Una vez el decisor haya logrado satisfacción en la respuesta, se procede a la elección de la alternativa o las alternativas que mejor solución le brinden al problema.

TABLA 5. Matriz de pagos de alternativas y objetivos

ALTERNATIVAS	CRITERIOS						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
A1	27,9	0%	\$169,6	\$2.854'239.263	1	6	15
A2	27,9	0%	\$84,8	\$2.721'055.448	2	9	15
A3	25,5	0%	\$99,4	\$2.489'035.223	3	9	10
A4	30,47	0%	\$189,4	\$ 972'749.211	4	2	5
A5	16,71	58,90%	\$569,4	\$ 2.716'032.160	10	5	25
A6	16,71	58,90%	\$569,4	\$1.800'543.670	6	7	25
A7	31,66	22,20%	\$395,8	\$865'275.429	4	4	25

Fuente: elaboración propia.

TABLA 6. Factores de ponderación y umbrales difusos asignados a cada criterio

ESTRUCTURA DE PREFERENCIA	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Factor de ponderación (W <sub>j</sub> )	18	9	12	11	19	17	14
Umbral difuso de indiferencia (q)	20%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
	3,34	5,89	\$ 8,48	\$86.527.542,92	0,10	0,90	2,50
Umbral difuso de preferencia (p)	50%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
	8,36	14,73	\$ 21,20	\$216.318.857,30	0,25	2,25	6,25
Umbral difuso de veto (v)	70%	40%	40%	40%	40%	40%	40%
	11,70	23,56	\$ 33,92	\$346.110.171,67	0,40	3,60	10,00

Fuente: elaboración propia.

## Resultados y Discusión

En el núcleo El Volador de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, para todos los usos, se capta agua potable importada desde la red de acueducto metropolitano de Medellín, presentando un nivel de autosuficiencia hídrica igual al 0%. Sin embargo, en el sector en donde se localiza el núcleo El Volador, se registran en promedio 224 días de precipitación al año, equivalentes al 62% del tiempo, con una precipitación promedio de 1.429 mm/año. Así mismo, las unidades hidrogeológicas identificadas en inmediaciones del campus universitario, ofrecen la posibilidad de explorar y explotar aguas subterráneas desde el acuífero del río Medellín.

En cuanto a las demandas de agua en el campus universitario, para el periodo de estudio (año 2012) se estimó un consumo global per cápita de 40 l/persona-día, valor que es susceptible de disminuirse, dado que existe la posibilidad de aprovechar las aguas lluvias, aguas subterráneas o aguas residuales para suplir diversos usos que no requieren agua 100% potable (lavado de pisos e instalaciones, riego de canchas, jardines, cultivos y zonas verdes, lavado de vehículos, funcionamiento de orinales y sanitarios).

Adicionalmente, dadas las deficientes condiciones de algunos elementos constitutivos del sistema de acueducto y aprovechamiento del agua en el núcleo El Volador, durante el periodo de investigación se registró una pérdida promedio de agua potable de 21.600 l/día. Este aspecto, entre otros, repercute de manera directa en los costos de acceso al servicio

de acueducto y alcantarillado en la Institución, los cuales se estimaron en el valor de \$3.270 persona/mes, a precios de diciembre de 2012.

Los volúmenes de agua captados en el núcleo El Volador se emplean para suplir las demandas locales, cuyo uso se clasifica como: consumo humano y doméstico, industrial recreativo, pecuario y agrícola.

Las siete (7) alternativas propuestas responden a las necesidades locales para la gestión del agua, y coinciden con las tendencias actuales, nacionales y mundiales planteadas para los mismos efectos. Considerando que la implementación de cualquiera de las siete opciones generaría impactos positivos para mejorar el aprovechamiento y uso del agua en el núcleo El Volador, para todos los casos se hizo necesario describir y/o caracterizar cada alternativa de manera homogénea, de tal modo que todas se analizaron con el mismo nivel de detalle.

Las alternativas A1, A2, A3 y A4 involucran especialmente los componentes de ahorro y uso eficiente del agua, contemplando intervenciones sobre la red de distribución de aguas y la modernización de los aparatos hidrosanitarios existentes. Por otro lado, las alternativas A5, A6 y A7 incluyen el componente del aprovechamiento de los recursos hidráulicos eventualmente disponibles en el campus universitario, contemplando el aprovechamiento de las aguas residuales, las aguas subterráneas y las aguas lluvias, respectivamente. Aunque en todas las alternativas los costos podrían resultar elevados a primera vista, se debe resaltar que se trata de intervenir edificaciones

existentes, lo cual implica actividades adicionales, tales como demoliciones y reconstrucciones, las cuales incrementan los costos de implementación de las alternativas. Es altamente probable que, al implementar las alternativas en edificaciones que están por construirse, se requieran menores recursos financieros por metro cúbico de agua, en comparación con edificaciones existentes.

Para la evaluación de las alternativas se propusieron objetivos ambientales, sociales, económicos, técnicos y tecnológicos, enmarcados en el concepto de desarrollo sostenible y en la Política Hídrica Nacional de Colombia, por lo cual se podrían adoptar estos mismos objetivos en la aplicación de la presente metodología en otros contextos espaciales distintos al institucional.

Al introducir al SIAM 1.0 Beta los datos de entrada de las siete (7) alternativas evaluadas, se generó una ponderación de cada uno de los objetivos, obteniendo como resultado que la alternativa A5 no está al nivel de las demás, por lo cual debió ser eliminada de manera previa, antes de aplicar cualquier método en el proceso de evaluación. Dicha alternativa se fundamenta en la implementación de un sistema de tratamiento y reutilización de una fracción de las aguas residuales del núcleo El Volador, que serían empleadas para suplir algunos usos en el campus universitario que no requieren agua 100% potable. Si bien, para los objetivos C1, C2 y C7, la alternativa A5 resultaría ser dominante debido a que su implementación permitiría reducciones hasta del 58,9% en el consumo de agua potable, una autosuficiencia hídrica 58,9% y una vida útil de 25 años, no sucede lo mismo para los objetivos C3, C4 y C5, en ésta tiende a ser dominada por todas las demás alternativas, por representar mayor riesgo sobre la población objetivo, además de presentar elevados costos de inversión inicial y de operación y mantenimiento. En el objetivo C6, la alternativa A5 es dominada por más del 50% de las otras opciones evaluadas.

El método de los *Promedios ponderados* arrojó como resultado que la alternativa más favorable sería la A6 (Aprovechamiento de aguas subterráneas), mientras que la aplicación de los métodos Programación de Compromiso y ELECTRE III, arrojó que la alternativa en primer orden de preferencias es la A2. Mediante su implementación se espera un consumo

per cápita de agua potable de 27,9 l/persona-día, equivalente a un costo per cápita de \$2.214/persona-día, además de un mayor control sobre el sistema y un bajo riesgo sobre la salud de la comunidad universitaria, ya que está basada en una tecnología universalmente aceptada, de fácil apropiación por la comunidad, cuyos elementos constitutivos no requieren el suministro de energía eléctrica, ni insumos adicionales, salvo que se presenten fallas o daños en los sistemas. La alternativa A2 no requiere de espacios físicos adicionales para su funcionamiento, no representa afectaciones sobre el paisaje y la estética del campus universitario durante su operación, tiene muy baja generación de residuos y baja vulnerabilidad ante el vandalismo.

Al comparar los resultados del análisis de sensibilidad de cada método, se puede evidenciar que los métodos Promedios Ponderados y de la Programación de Compromiso son medianamente sensibles ante las variaciones en los pesos de los objetivos, mientras que, por su lado, el método ELECTRE III resulta ser menos sensible a los cambios en los pesos o factores de ponderación de los objetivos, ya que admite que estos últimos presenten grandes variaciones, en todos los casos, en rangos superiores al 50%.

La Alternativa A2 constituye un primer paso en el proceso de optimización de la gestión de los recursos hidráulicos en el núcleo El Volador, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. La implementación de la Alternativa A6, que ocupa una segunda posición de preferencia y que propone el aprovechamiento de las aguas subterráneas del campus, no quedaría taxativamente excluida, ya que resultaría ser complementaria a la A2, dado que considera el aprovechamiento de una fuente alterna de agua que se encuentra disponible en el territorio de estudio y con la cual se incrementaría la autosuficiencia hídrica de la Institución, reduciendo, al mismo tiempo, el pago por el acceso a los servicios públicos de agua potable y alcantarillado.

## Conclusiones

Ante la finita disponibilidad de recursos financieros para la implementación de acciones en el marco de la gestión integrada del agua al interior de una institución, es fundamental reducir la incertidumbre asociada a la

toma de las decisiones, y es este el propósito básico de la metodología presentada en el presente documento.

Las tendencias del mundo moderno exigen contemplar distintos enfoques en el análisis de las posibles soluciones a un problema determinado, más allá de la tradicional visión financiera. Es por ello que la metodología propuesta para apoyar la toma de decisiones en materia de aprovechamiento, ahorro y uso eficiente del agua se adapta a las necesidades del mundo actual. La metodología presentada se fundamenta en la aplicación de los métodos de análisis multiobjetivo ELECTRE III, Programación de Compromisos y Promedios Ponderados, considerando objetivos ambientales, económicos, sociales, técnicos y tecnológicos, e integrando la estructura de preferencias de distintos decisores simultáneos.

Al aplicar la metodología en el núcleo El Volador se identificaron y evaluaron siete alternativas, y como resultado se pudo establecer que, de acuerdo a las características específicas de la Institución, la modernización de la red de acueducto y de los sistemas hidrosanitarios, y el aprovechamiento de

las aguas subterráneas, satisfacen las preferencias de los decisores; mientras que la alternativa menos favorable es el tratamiento y reutilización de las aguas residuales.

La implementación de la metodología propuesta, además de clasificar las alternativas de manera jerárquica, también podría orientar al decisor, objetivamente, sobre el orden de prioridades temporales. Con ello, se podrían implementar distintas alternativas que no son excluyentes y que resultan ser complementarias para el logro de las políticas y fines propuestos.

Adicionalmente, por su estructura adaptable, la metodología propuesta podría contribuir a mejorar la gestión de la demanda de agua en pequeñas cabeceras municipales y en nuevos desarrollos urbanísticos.

En este sentido, pese a que los métodos de los Promedios Ponderados y de la Programación de Compromiso son más sencillos de aplicar que el ELECTRE III, este último ofrece mayor robustez y consistencia en los resultados de su implementación, lo cual resulta ser ventajoso para su utilización en distintos contextos espaciales y territoriales.

## Referencias

- Bonnet, J., Devel, C., Faucher, P. y Roturier, J. 2001. "Analysis of electricity and water end-uses in university campuses: case-study of the University of Bordeaux in the framework of the Ecocampus European Collaboration." *Journal of Cleaner Production* Vol. 10: 13-24.
- Gleick, P. 2003. "Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21<sup>st</sup> century". *Science* Vol. 302: 1524-1528.
- Instituto de Estudios Ambientales-IDEA UN. 2012. *Plan Integral de Gestión Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*. Tomo 1. Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Keeney, R. 1996. "Value-focused thinking: Identifying decision opportunities and creating alternatives". *European Journal of Operational Research* Vol. 92: 537-549.
- Lee, M., Tansel, B. y Balbin, M. 2011. "Influence of residential water use efficiency measures on household water demand: A four year longitudinal study". *Resources, Conservation and Recycling* Vol. 56: 1 - 6.
- Makropoulos, C.K., Natsis, K., Liu, S., Mittas, K. y Butler, D. 2008. "Decision support for sustainable option selection in integrated urban water management". *Environmental Modelling & Software*, Vol. 23: 1448-1460.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial-MAVDT. 2010. *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial. Colombia.
- Palacio, N. 2010. Propuesta de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, como alternativa para el ahorro de agua potable, en la Institución Educativa María Auxiliadora de Caldas, Antioquia. Monografía, Especialización en manejo y gestión del agua, Universidad de Antioquia.
- Ramani S., SadreGhazi, S. y Duysters, G. 2011. "On the diffusion of toilets as bottom of the

pyramid innovation: Lessons from sanitation entrepreneurs". *Technological Forecasting & Social Change* Vol. 79: 676–687.

Smith, R., Mesa, O., Dyner, I., Jaramillo, P., Poveda G. y Valencia, D. 2000. Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre. Posgrado

en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, 2ª Ed

Torres, P. y García, M. 2010. *Las ciudades del mañana*. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington.