

## **IX-033 - CRIDE: HERRAMIENTA DE ANÁLISIS MULTI-CRITERIO PARA EL SOPORTE DE TOMA DE DECISIONES EN EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN EL CAMPUS DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, SEDE BOGOTÁ**

**Sandra Lorena Galarza Molina** <sup>(1)</sup>

Ingeniera Civil de Pontificia Universidad Javeriana (PUJ). Magister en Hidrosistemas de PUJ. Estudiante de Doctorado en Ingeniería, PUJ, CeIBA-Complejidad, Colombia.

**Andrés Torres** <sup>(2)</sup>

Ingeniero Civil de PUJ. Magister en Ingeniería Civil en Institut National Des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon. Doctor en Ingeniería Civil de INSA de Lyon. Profesor Asociado, Director Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente, Pontificia Universidad Javeriana.

**Jaime Andrés Lara Borrero** <sup>(3)</sup>

Ingeniero Civil de PUJ. Magister en Ingeniería y Gestión Ambiental de Universitat Politècnica de Catalunya. Doctor en Territorio y Medio Ambiente de Universidad Politécnica De Madrid. Profesor Asociado, Director Maestría en Hidrosistemas de PUJ.

**Priscilla Moura** <sup>(4)</sup>

Ingeniera Civil de Universidad Federal de Minas Gerais. Magister en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la Universidad Federal de Minas Gerais. Doctora en Ingeniería Civil de INSA de Lyon. Profesora Adjunta de Universidad Federal de Minas Gerais.

**Dirección** <sup>(1)</sup>: Calle 40 No. 5-50, Edif. José Gabriel Maldonado S.J., Departamento de Ingeniería Civil - Facultad de Ingeniería. Bogotá D.C., Colombia Tel: +57 (01) 3208320 ext: 5259 – Fax: +57 (01) 3208320 ext: 5398- e-mail: [sgalarza@javeriana.edu.co](mailto:sgalarza@javeriana.edu.co)

### **RESUMEN**

El propósito de este trabajo es el desarrollo de una herramienta de análisis multi-criterio (AMC) como soporte para la toma de decisiones en el aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá (PUJB). La herramienta desarrollada CRIDE se basó en el método de AMC ELECTRE II e incorporando el método Monte Carlo para incluir incertidumbres como la variabilidad de las opiniones de expertos y las evaluaciones imprecisas de los criterios involucrados en la decisión. Se estableció una metodología para la evaluación de los escenarios: para el presente caso de estudio seis escenarios se plantearon, los cuales surgieron de un escenario ideal donde toda el agua lluvia de escorrentía generada en el campus era recogida y empleada para todos los usos (calidad de agua potable). Para la recolección y el tratamiento del agua lluvia se propusieron sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) y sistemas adicionales de tratamiento. Para la evaluación de los escenarios ocho criterios fueron propuestos, tales como: rendimiento hidráulico, nivel de compatibilidad con el Plan Maestro del campus, entre otros, incluyendo aspectos financieros. Al utilizar CRIDE como soporte a la toma de decisiones se generó una vista general de las posibles soluciones que pueden ser desarrolladas, como también la clasificación de las alternativas. CRIDE permite la evaluación de los criterios propuestos, realizando las pruebas de la robustez, redundancia y sensibilidad: utilizando los resultados de CRIDE en lugar de pruebas estadísticas convencionales, esta metodología puede ser útil en el proceso de establecimiento de criterios, considerado uno de los aspectos clave de la toma de decisiones.

**PALABRAS CLAVE:** Análisis multi-criterio, ELECTRE II, método Monte Carlo, aprovechamiento agua lluvia, herramienta de toma decisión.

### **INTRODUCCIÓN**

La toma de decisiones en la gestión del agua usualmente involucra múltiples objetivos medidos en diferentes unidades (Gough y Ward, 1996). Es necesario emplear un método que mejore la transparencia, la capacidad de auditoría y el rigor analítico en la toma de decisiones. Una de las opciones encontradas por varios investigadores es el Análisis Multi-Criterio (AMC) para la toma de decisiones (Hajkowicz y Higgins, 2006).

Hajkowicz y Collins (2006) revisaron 134 publicaciones de 34 países que aplicaban el AMC en la gestión del recurso hídrico, con el objetivo de entender el desarrollo y el estado actual de dicha herramienta en esta

disciplina. En este estudio se identificaron ocho clases de aplicaciones del AMC: gestión de cuencas y acuíferos, selección de infraestructura, valoración de proyectos, optimización de recursos hídricos limitados, política del agua y planificación de la oferta, gestión de la calidad del agua y de áreas marinas protegidas. Adicionalmente, Hajkowicz y Collins (2006) concluyeron que la mayoría de aplicaciones revisadas se encuentran entre las siguientes clases: (i) política del agua y planificación de la oferta y (ii) selección de infraestructura. Esto se debe a que estas decisiones generan impacto a numerosos actores involucrados e implican el manejo de objetivos múltiples (Hajkowicz y Collins, 2006). Para la fase de evaluación de los proyectos, generalmente se utilizan métodos que articulan la estructura de preferencia del decisor como los métodos de clasificación (por ejemplo Electre III). Sin embargo, el análisis del uso de estos tipos de sistemas demuestra que es preferible el desarrollo de herramientas específicas (Baptista *et al.*, 2004). Esta evidencia podría generalizarse para cualquier fase de los proyectos que involucren toma de decisiones.

En Colombia la mayoría de los métodos de AMC no se han tenido en cuenta para la gestión del recurso hídrico. Sin embargo se han encontrado esfuerzos específicos, como la selección del tratamiento de agua potable para pequeñas comunidades en Colombia (Lara Borrero *et al.*, 2004), o para soportar la toma de decisiones en el suministro de agua potable, tratamiento de agua residual y en salud (Villegas *et al.*, 2009; Galvis *et al.*, 2005; Vargas *et al.*, 2003).

Por otro lado, el crecimiento de la población urbana, y por ende el aumento de la demanda de agua, ha generado una presión hídrica que –en muchas ciudades del mundo– se ha vuelto crítica debido a la poca oferta hídrica natural. Lo anterior ha generado una atención cada vez mayor en el aprovechamiento del agua lluvia como fuente potencial de agua (Hatt *et al.*, 2006), esta técnica tiene la ventaja de tener una mayor aceptabilidad social frente a otras fuentes alternativas: como el reciclado de las aguas usadas o la desalinización del agua de mar (Mitchell *et al.*, 2008, Brown y Davis, 2007; Coombes y Mitchell, 2006). Típicamente, hoy en día las preguntas sobre aprovechamiento de aguas lluvias a las que se quiere dar respuesta por medio de investigaciones o estudios de ingeniería son (Mitchell *et al.*, 2008): ¿Cuánta agua lluvia puede ser aprovechada?; ¿Qué tan confiable es esa fuente de agua alternativa? y ¿Cuáles son los requerimientos en infraestructura para lograr el aprovechamiento?

En Colombia se han desarrollado algunos trabajos de investigación, que contemplan el aprovechamiento de aguas lluvias para el abastecimiento de poblaciones (Sánchez L. y Caicedo Mosquera E., 2001) y para usos que no requieren agua potable –descarga de sanitarios y orinales, riego de jardines y limpieza de automotor– (Ballén *et al.*, 2004). Ballén *et al.* (2004) realizaron un trabajo teórico-práctico de aprovechamiento de aguas lluvias, el cual consistió en el análisis de las experiencias y técnicas desarrolladas por otros países que pudiesen ser utilizadas en Colombia y en el diseño de alternativas (instalaciones hidráulicas) en tres ciudades de Colombia. Los autores concluyeron que la factibilidad del aprovechamiento del agua lluvia depende de cinco variables: la precipitación de la zona, el área de la cubierta, la dotación a suplir, el precio por metro cúbico de agua y la inversión necesaria para la construcción y mantenimiento de los sistemas. A nivel financiero, el aprovechamiento del agua lluvia se ajusta mejor a desarrollos de tipo comunitario y no individual.

Adicionalmente en la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá, dentro del marco de Plan de Manejo Ambiental, se concibió un proyecto a través del cual se buscaba analizar la viabilidad económica y técnica del aprovechamiento del agua lluvia como una alternativa para el riego y el lavado de zonas duras y fachadas del campus de su sede en Bogotá. Este proyecto estuvo liderado por el Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y del Ambiente, mediante Tecnologías de Bajo Impacto, de la misma Universidad, y se inscribió en un estudio más amplio que buscaba determinar la cantidad de agua del campus de la Universidad potencialmente reutilizable, su calidad y posibles usos y la infraestructura necesaria para tal fin. Los primeros resultados demuestran la posibilidad de utilizar el agua lluvia para algunos usos, desde el punto de vista de la cantidad de agua (Lara Borrero *et al.*, 2007). Subsecuentemente, se realizaron campañas de medición y se determinaron los posibles usos (Torres *et al.*, 2011a). Teniendo en cuenta estos resultados, Torres *et al.* (2011b) realizaron un estudio para identificar los requerimientos de infraestructura para el aprovechamiento sostenible del agua lluvia en el campus. Demostraron que se podría suministrar una demanda máxima del 14% de agua en el campus (área total del campus 18.4 ha), requiriendo grandes inversiones y un cambio en el modelo cultural del aprovechamiento del agua. Este estudio generó un gran producto: el inventario de usos de agua dentro del campus. Pero, algunos beneficios, como los beneficios ambientales que se obtendrían al implementar un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias no se han determinado (Torres *et al.*, 2011b).

El objetivo de este artículo es mostrar el desarrollo de una herramienta de análisis multi-criterio (AMC) y el soporte que brinda a la toma de decisiones en el aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la PUJB.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de la herramienta CRIDE (herramienta de análisis multi-CRiterio para la toma de DEcisiones) se basó en el análisis multi-criterio utilizando el método ELECTRE II e incorporando el método Monte Carlo para incluir incertidumbres como la variabilidad de las opiniones de expertos y las evaluaciones imprecisas de los criterios involucrados en la decisión.

ELECTRE II hace parte de la familia ELECTRE y fue propuesto a finales de los años sesenta por Roy y Bertier (Roy y Bertier, 1971). Este fue el primer método especialmente diseñado para tratar los problemas de determinación del orden de las opciones (ranquin) (Figueira *et al.*, 2005).

Las razones que justifican escoger ELECTRE II son las siguientes: (i) permite un diálogo entre los diferentes tomadores de decisiones involucrados en el proceso de toma de decisiones, (ii) los criterios pueden ponderarse, lo cual permite que cada tomador de decisión pueda dar su opinión, (iii) las alternativas se comparan por pares definiendo las relaciones de superación, (iv) admite el uso de escalas ordinales para la calificación de las alternativas, sin necesidad de convertir las escalas originales en abstractas con un rango impuesto (como en ELECTRE I), (v) este método sólo emplea los umbrales de concordancia y discordancia, lo cual es simple comparado con ELECTRE III que utiliza tres umbrales (umbrales difusos de indiferencia, de preferencia y el de veto) (Figueira *et al.*, 2005; Figueira *et al.*, 2009).

Para realizar las comparaciones es necesario establecer criterios de evaluación y determinar el desempeño de las alternativas frente a estos. Estas evaluaciones son la base de la matriz de evaluación (matriz de alternativas). Los criterios de evaluación se ponderan de acuerdo a su importancia relativa, lo cual puede realizarse por medio de encuestas a los tomadores de la decisión. ELECTRE II emplea las matrices de concordancia y discordancia para las comparaciones del desempeño de las alternativas (Figueira *et al.*, 2005). Para definir las relaciones binarias, se estipulan tres umbrales de concordancia ( $c_{min,i}, i=1,2,3$  tal que  $c_{min,1} \geq c_{min,2} \geq c_{min,3} \geq 0$ ) y dos niveles aceptables o umbrales de discordancia ( $d_{max,i}, i=1,2$  tal que  $0 \leq d_{max,1} \leq d_{max,2} \leq 1$ ) por criterio (Roy y Bertier, 1971).

La última etapa consiste en el procedimiento de clasificación por medio de tres pasos (Roy y Bertier, 1971): (i) una clasificación indirecta, (ii) una clasificación directa, (iii) y el promedio entre las dos clasificaciones (la directa e indirecta).

Por otro lado, el método Monte Carlo permite resolver problemas matemáticos mediante el muestreo aleatorio de variables aleatorias (Halton, 1970; Caflish, 1998). Al problema matemático se le puede asociar un modelo probabilístico artificial (Ayyub y Mccuen, 2003). Monte Carlo fue empleado en CRIDE para crear valores aleatorios en: (i) la matriz de evaluación, (ii) los pesos de los criterios y (iii) los umbrales de concordancia. Estos valores fueron generados utilizando distribuciones de probabilidad Normal y Uniforme, de acuerdo a la naturaleza de la variable de cada problema.

CRIDE fue desarrollado para soportar el proceso de toma de decisión en el aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la PUJB. El campus se encuentra ubicado en noreste del centro de Bogotá (Colombia), el cual cuenta con 18.4 ha compuesto por 23.5 % de edificios (26 edificios académicos, una biblioteca central, un hospital, diez cafeterías, tres auditorios, un coliseo cubierto, una cancha de fútbol y varias instituciones bancarias), 50 % de áreas verdes (cerca de 7.4 ha de jardines y zonas verdes), 4 % de vías (incluye 1.7 ha de plazoletas peatonales) y 22.5 % para el desarrollo futuro del campus (Torres *et al.*, 2011b).

Se propusieron seis escenarios para el aprovechamiento de las aguas lluvias y ocho criterios para evaluar cada escenario. Los criterios fueron definidos con base a los criterios propuestos por Martin *et al.* (2007) y en un trabajo en conjunto con el departamento de Recursos Físicos de la universidad. Dentro de los criterios contemplados se tuvieron en cuenta aspectos técnicos (como hidráulicos y de calidad), de planeación (de acuerdo al plan maestro del campus) y financieros (como el valor presente neto). Los criterios se encuentran descritos en la Tabla 1.

**Tabla 1: Criterios definidos para la evaluación de las alternativas (Fuente: elaboración propia)**

<b>Rendimiento hidráulico:</b>	Es la capacidad que tiene cada alternativa de cumplir el objetivo del sistema pluvial, drenaje y control de las aguas lluvias generadas en la zona
<b>Eficiencia de retención de contaminantes:</b>	Es la capacidad que tiene cada alternativa para retener contaminantes, esta se evalúa como un porcentaje de reducción de contaminantes entre la entrada y la salida del sistema
<b>Probabilidad de falla del sistema:</b>	Este criterio determina la probabilidad que la estructura falle y no pueda cumplir su función.
<b>Necesidad y frecuencia de operación y mantenimiento</b>	Este criterio determina qué tan frecuente es la necesidad de operar y mantener el sistema para que tenga un funcionamiento adecuado.
<b>Nivel de compatibilidad con plan maestro:</b>	Es la no interferencia de cada alternativa con las políticas de desarrollo del campus.
<b>Impacto en fase de construcción Vs. cobertura:</b>	Este indicador muestra qué tanto impacta la construcción de la alternativa comparada con la cobertura que brindaría esta alternativa
<b>Valor Presente Neto (VPN):</b>	Representa el valor equivalente en pesos de hoy, de la ganancia o pérdida que se obtendrá al construir y operar cada alternativa
<b>Tasa Interna de Retorno del proyecto Vs. Tasa Interna de Retorno de otro proyecto externo:</b>	Este indicador permite comparar la TIR de cada alternativa con respecto a otra TIR de un proyecto externo a la universidad (p.e. un proyecto de inversión)

La información requerida para el cálculo de los criterios se muestra a continuación:

- El plano topográfico y la red existente de alcantarillado
- El inventario de usos y las cuenta contrato de la PUJ
- 75 años de registros diarios de lluvia provenientes de la Estación San Luis (Tipo: Pluviográfica, latitud: 4°39', longitud: 74°03' y elevación: 2959 m)

## RESULTADOS OBTENIDOS Y ESPERADOS

### CRIDE

Con el AMC ELECTRE II descrito anteriormente y con la generación de valores aleatorios usando Monte Carlo, se desarrolló CRIDE utilizando MatLab ®. Esta herramienta incluye variaciones como la diversidad de opinión, la incertidumbre e imprecisiones en las evaluaciones de los criterios.

Como experiencia previa y apoyo al desarrollo de la herramienta CRIDE, esta se implementó (sin considerar aleatoriedad) en el soporte para la selección de la comunidad objetivo del PROgrama Social de la Facultad de Ingeniería (PROSOFI) de la PUJB, permitiendo identificar que era necesario contemplar la diversidad en las opiniones de los tomadores de la decisión y la variabilidad en la matriz de evaluación, como también identificar errores. Adicionalmente, se colocó a prueba la herramienta implementando un ejemplo del libro Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbres de Smith *et al.* (2000), obteniendo resultados similares lo cual aportó consistencia y confiabilidad a la herramienta.

CRIDE está dividida en las siguientes cinco opciones:

- Opción 1: es la opción que sólo varía la matriz de evaluación entre los valores mínimos y máximos, utiliza los pesos de los criterios promedio y los umbrales de concordancia definidos por el usuario
- Opción 2: sólo se varían los pesos de los criterios entre los valores mínimos y máximos definidos por los participantes en la encuesta, y emplea la matriz de posibles soluciones promedio y los umbrales de concordancia definidos por el usuario
- Opción 3: se varían tanto la matriz de posibles soluciones como los pesos de los criterios, y se utilizan los umbrales de concordancia definidos por el usuario
- Opción 4: se utiliza la matriz de posibles soluciones promedio y los pesos de los criterios promedio, solamente se varían los umbrales de concordancia utilizando la distribución uniforme
- Opción 5: considera la variación de la matriz de posibles soluciones, los pesos de los criterios y los umbrales de concordancia.

La herramienta emplea una rutina clasificatoria que a su vez está compuesta por tres subrutinas, las cuales realizan las siguientes funciones: (i) Definir la comparación por pares entre alternativas a partir de la matriz de soluciones, los pesos de los criterios y los umbrales de concordancia y discordancia, (ii) eliminar de la comparación realizada las alternativas evaluadas y (iii) realizar las clasificación definitivas de las alternativas.

## APLICACIÓN DE CRIDE EN EL APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS

Otro resultado de este proyecto fue la metodología para la construcción de la matriz de evaluación y los resultados obtenidos aplicando CRIDE.

Para la construcción de escenarios o las posibles alternativas, el campus de la PUJB fue dividido en 12 cuencas. Esto se realizó basándose en las características de drenaje, tanto superficial como a partir de la topología de la red de alcantarillado y utilizando los planos suministrados por la Dirección de Recursos Físicos de la Universidad. Como resultado de esta información seis escenarios fueron construidos a nivel de factibilidad.

Los escenarios de entrada se generaron a partir de un escenario ideal, donde todas las aguas recolectadas en el campus se utilizan (volumen de la oferta máxima) con calidad de agua potable (máxima calidad). Los otros escenarios fueron creados disminuyendo la calidad del agua (menos usos) y la oferta (menos cuencas incluidas), obteniendo demanda y oferta de agua alta, media y baja. Lo anterior permitió el pre-dimensionamiento de los SUDS considerados y de los sistemas de bombeo y tratamiento. La descripción de los escenarios se encuentran en la Tabla 2.

**Tabla 2. Escenarios propuestos para el aprovechamiento de agua lluvia (Fuente: elaboración propia)**

No.	DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS
1	Recolección de la escorrentía generada en las 12 cuencas (volumen de suministro máximo) para uso potable (máxima calidad de agua).
2	Recolección de la escorrentía generada en las 12 cuencas para usos no potables (limpieza de pisos, descarga de sanitarios y riego de jardines).
3	Recolección de la escorrentía generada en las 12 cuencas para riego de jardines.
4	Recolección de la escorrentía generada en nueve cuencas para uso potable (máxima calidad de agua).
5	Recolección de la escorrentía generada en nueve cuencas para usos no potables (limpieza de pisos, descarga de sanitarios y riego de jardines).
6	Recolección de la escorrentía generada en nueve cuencas para riego de jardines.

Para la recolección de la escorrentía se propone el uso de SUDS (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible), los sistemas escogidos fueron Jardines de Bioretención, Pavimentos Permeables y Humedales artificiales. La selección del SUDS a emplear en cada cuenca se realizó basándose en las características de los posibles lugares (su uso actual y criterios estéticos).

Los pesos de los criterios se determinaron a partir de una encuesta realizada a los cuatro líderes del Departamento de Recursos Físicos de la Universidad y a cinco ingenieros expertos (ver Tabla 3).

**Tabla 3. Pesos definidos por los participantes (Fuente: elaboración propia)**

Criterios	Participantes										Promedio	Mínimo	Máximo
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
1 Rendimiento hidráulico	16%	25%	12%	3%	13%	36%	16%	18%	14%		17%	3%	36%
2 Eficiencia de retención de contaminantes	16%	5%	12%	10%	13%	21%	20%	18%	23%		15%	5%	23%
3 Probabilidad de falla del sistema	3%	5%	12%	17%	13%	7%	20%	18%	14%		12%	3%	20%
4 Necesidad y frecuencia de operación y mantenimiento	3%	25%	4%	10%	13%	7%	12%	18%	23%		13%	3%	25%
5 Contribución a las políticas de desarrollo del campus	16%	25%	4%	17%	13%	7%	12%	11%	14%		13%	4%	25%
6 Impacto en fase de construcción Vs. cobertura	16%	5%	19%	10%	13%	7%	8%	4%	5%		10%	4%	19%
7 Valor Presente Neto (VPN)	16%	5%	19%	17%	13%	7%	8%	4%	5%		10%	4%	19%
8 Tasa Interna de Retorno Vs. Tasa Inversión Externa	16%	5%	19%	17%	13%	7%	4%	11%	5%		11%	4%	19%

Los escenarios fueron evaluados con los criterios definidos y la matriz de evaluación fue construida con valores mínimos, máximos y promedios (ver Tabla 4).



**Tabla 4: Matriz de alternativas (Fuente: elaboración propia)**

Criterios	Unidades	Distribución de Probabilidad	Tendencia del criterio	Escenarios					
				S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	%	Normal	↓	(-0.18) 0.32 (+0.32)	(-0.18) 0.32 (+0.32)	0.32	0.35	0.35	0.35
2	%	Uniforme	↑	(-0.60) 0.78 (+0.95)	(-0.60) 0.78 (+0.95)	(-0.60) 0.78 (+0.95)	(-0.60) 0.78 (+0.95)	(-0.60) 0.78 (+0.95)	(-0.60) 0.78 (+0.95)
3	%	Normal	↓	(-1.00) 0.26 (+0.00)	(-1.00) 0.11 (+0.00)	(-0.93) 0.00 (+0.00)	(-1.00) 0.19 (+0.00)	(-1.00) 0.04 (+0.00)	(-0.90) 0.00 (+0.00)
4	%	Uniforme	↓	1.7	1.7	1.7	1.07	1.07	1.07
5	%	Uniforme	↑	0.42	0.42	0.42	0.33	0.33	0.33
6	%	Normal	↑	(-0.8) 0.8 (+1.44)	(-0.35) 1.34 (+2.32)	(-1.26) 4.27 (6.79)	(-1.12) 1.12 (+1.95)	(-2.31) 2.31 (+3.71)	(-6.10) 6.10 (+8.67)
7	años	Normal	↓	(-5) 5 (+6)	(-7) 8 (+8)	10	(-6) 7 (+7)	5	6
8	%	Normal	↑	(-1.28) 1.48 (+0.43)	(-1.00) 0.64 (+0.20)	(-0.54) 0.40 (+0.14)	(-1.37) 0.27 (+0.27)	(-1.70) 1.54 (+0.50)	(-1.35) 1.01 (+0.35)

↑significa: entre más puntaje tenga la alternativa es mejor, ↓ significa: entre más puntaje tenga la alternativa es peor.  
(-###)=> valor mínimo; ###=> valor medio (+###) => valor máximo

Para los umbrales de concordancia se eligieron los siguientes niveles aceptables  $c_{\min,1}=0.7>c_{\min,2}=0.6>c_{\min,3}=0.50$ . Los umbrales de discordancia (dos por criterio) se determinan por medio de las máximas diferencias entre las alternativas de cada criterio: percentil 20 para el primer umbral ( $d_{\max,1}$ ) y percentil 35 para el segundo umbral ( $d_{\max,2}$ ).

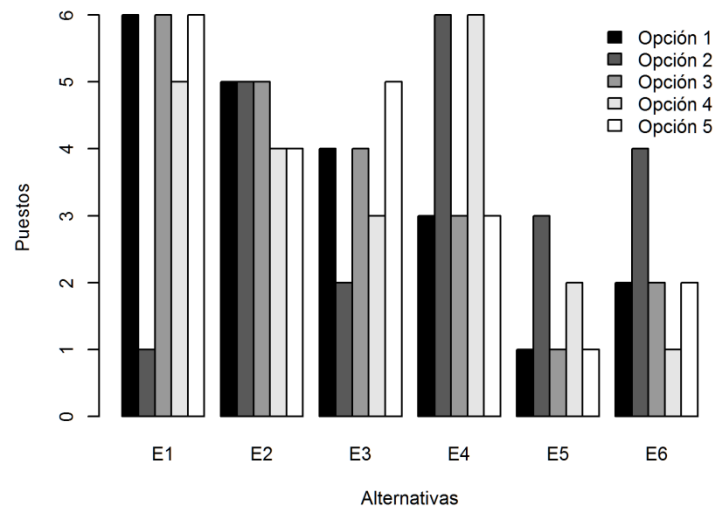
## RESULTADOS USANDO CRIDE

Los resultados se obtuvieron de tres ejecuciones: (i) resultados de las opciones de CRIDE, (ii) resultados evaluando la influencia de los pesos de los criterios definidos por los participantes y la creación de participantes y grupos virtuales y (iii) resultados que evalúan la importancia y redundancia de los criterios y la sensibilidad de la herramienta en la variación de los pesos de los criterios.

Para definir el número mínimo de simulaciones CRIDE fue ejecutada 10000 veces y las posiciones que ocupaba cada alternativa fueron graficadas. Se observó que en la número 6000 todas las alternativas se estabilizaban, es decir tienden a ocupar el mismo puesto. Los resultados obtenidos con cada una de las variaciones se compararon con la ejecución de referencia (Ejecución con la mayor variación, matriz, pesos y umbrales aleatorios).

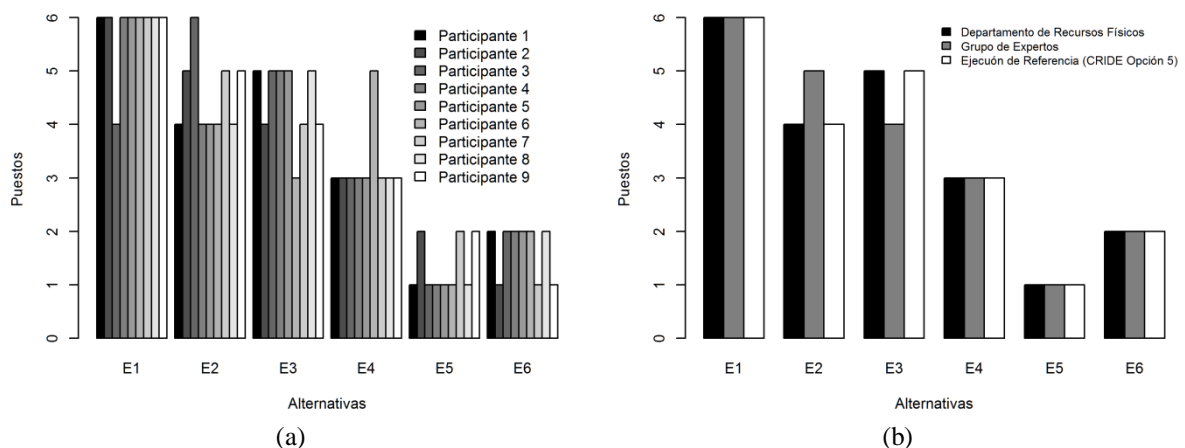
Los resultados de todas las opciones de CRIDE se observan en la Figura 1. La ejecución de referencia es la opción cinco: el primer puesto es para el Escenario 5 (inversión inicial US\$252,918; 5 años para el retorno de la inversión; porcentaje de ahorro 61%), el cual cubriría los usos no potables para todas las cuencas excepto para 1 de ellas (Cuenca 7). El segundo puesto lo ocupó el Escenario 6 (inversión inicial \$ 483,508,167; 6 años para el retorno de la inversión; porcentaje de ahorro 48%), el cual contempla cubrir sólo el riego de jardines para las mismas cuencas contempladas en el Escenario 5. El tercer puesto lo ganó el Escenario 4 (inversión inicial \$ 514,693,107; 7 años para el retorno de la inversión; porcentaje de ahorro 76%), que implica el aprovechamiento de las aguas lluvias recolectadas para todos los usos (potables y no potables) para todas las cuencas excepto para 1 de ellas (Cuenca 7). Los últimos puestos los ocuparon los Escenarios 3, 2, y 1 (cuarto, quinto y sexto puesto), los cuales cubren todas las cuencas (doce en total) y los usos varían: el Escenario 3 sólo cubriría el uso de riego, el Escenario 2 los usos no potables y el Escenario 1 todos los usos (potable y no potables).

De acuerdo a la Figura 1 los primeros puestos fueron ocupados por los Escenarios 4, 5, y 6, el mejor Escenario es el quinto, porque en la mayoría de la variaciones, excepto en las Opciones 2 y 4, este Escenario obtuvo el primer puesto. Lo anterior se debe a que los Umbrales definen qué tan exigente es el decisor comparando las alternativas, por lo tanto ese primer puesto puede ser ocupado por cualquiera de los Escenarios 5 y 6.



**Figura 1: Resultados obtenidos con todas las opciones de CRIDE (Fuente: elaboración propia).**

Los resultados utilizando la opción cinco con los pesos definidos por los participantes se muestran en Figura 2a y la Figura 2b muestra la comparación entre los resultados ejecutando la opción 5 para cada uno de los grupos decisores: (i) líderes de DPR y (ii) Expertos.



**Figura 2: Evaluando la influencia de los pesos de los criterios definidos (a) por los participantes y (b) grupos decisores (Fuente: elaboración propia).**

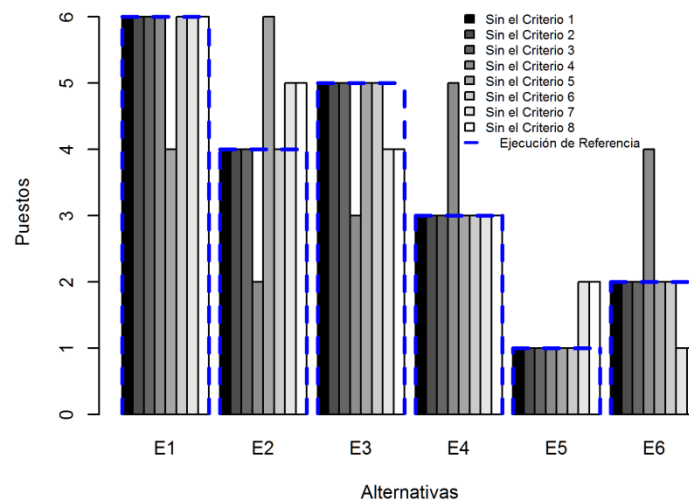
De la ejecución evaluando la influencia de los pesos de los criterios definidos por los participantes (Figura 2a), se puede observar que la mayoría coincidió que la peor alternativa es el Escenario 1. Seis de los nueve participantes estuvieron de acuerdo con el Escenario 5 ocupara el primer lugar. Para los puestos del Escenario 6 seis de nueve coincidieron en que ocupara el segundo lugar. El Escenario 4 la mayoría de los participantes estuvieron de acuerdo excepto un participante en que este escenario obtuviera el tercer puesto.

De los resultados de la ejecución por grupos (Figura 2b) se observó que el grupo integrado por la Dirección de Planta Física de la Universidad coincidió totalmente con el escenario de referencia. En cambio, para el grupo conformado por los expertos en el tema, los puestos de las alternativas dos y tres variaron con respecto a la ejecución de referencia.

Para evaluar la variabilidad de las encuestas y para conocer si era necesario realizar más encuestas se utilizaron los participantes y grupos virtuales. Los participantes virtuales se crearon a partir de la aleatoriedad de los pesos definidos por los nueve participantes. Para los 6000 participantes virtuales generados, las posiciones de los Escenarios uno y dos fueron diferentes con respecto a la ejecución de referencia: sexta y quinta posición respectivamente para los participantes virtuales. Los grupos virtuales se crearon agrupando los

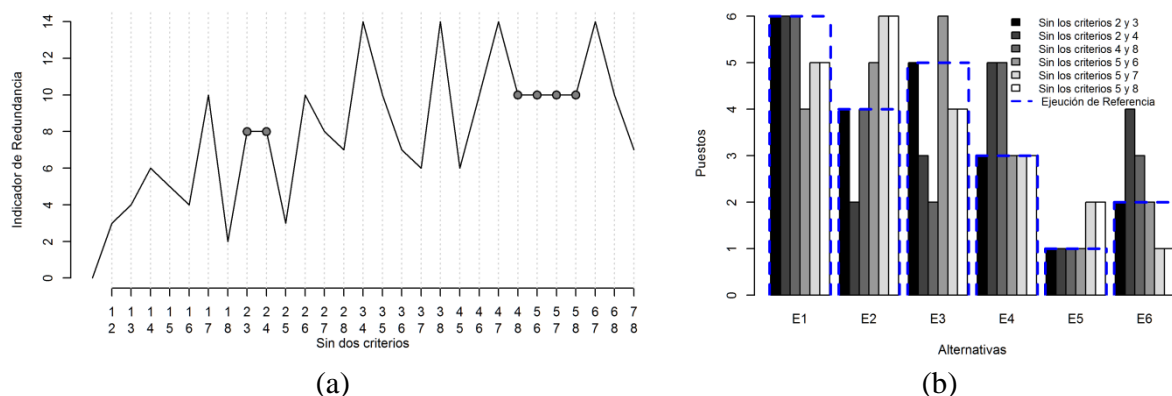
participantes virtuales creados anteriormente. Esta ejecución mostró que se requieren más de 5000 miembros para construir un grupo virtual para obtener resultados equivalentes a la ejecución de referencia. Estos resultados reflejan la variabilidad de las opiniones de los nueve participantes.

Por otro lado, con el objetivo de probar el desempeño de CRIDE y los criterios definidos, se ejecutaron algunas pruebas. La primera prueba, para evaluar la estabilidad de la herramienta, se realizó quitando cada uno de los criterios en cada ejecución (Figura 3). Los resultados mostraron que: (i) Para conocer el primer puesto es necesario contar con los criterios 7 y 8, alguno de los demás criterios pueden no estar, (ii) si se requiere conocer el segundo puesto es necesario contar con los criterios mencionados anteriormente y el criterio 4, y (iii) si sólo se desea conocer los primeros tres puestos se podría quitar alguno de los criterios excepto los mencionados anteriormente.



**Figura 3: Posición de las alternativas retirando uno a uno los criterios**

El segundo test se refiere a la redundancia de los criterios considerados. Inicialmente, se combinaron los criterios por pares, se ejecutó la opción 0 de CRIDE (sin variabilidades), y se graficó las diferencias de cada puesto con el puesto de referencia (Indicador de redundancia) (Figura 4a). Se observó que probablemente las parejas de criterios que pueden ser redundantes (en el cual el indicador de redundancia no varía) son los criterios 2 – 3, los criterios 2 – 4 los criterios 5 – 6, los criterios 5 – 7 y los criterios 5 – 8. Se ejecutó CRIDE sin cada una de estas parejas y los resultados se compararon con la ejecución de referencia (Figura 4b). De acuerdo a la Figura 4b las parejas de criterios 5 – 7 y 5 – 8 generan los mismos resultados, de lo cual se puede concluir que los criterios 7 y 8 son redundantes para el presente caso de estudio.

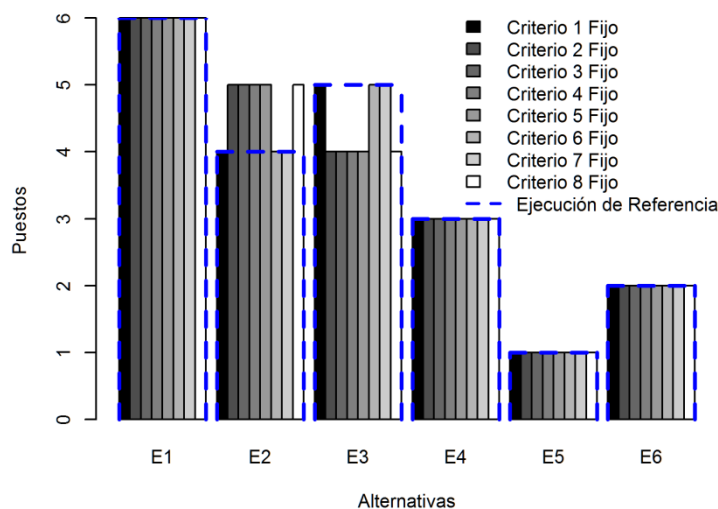


**Figura 4: (a) Indicador de redundancia vs. Parejas de los criterios, (b) resultados de cada ejecución quitando parejas de criterios, comparándolos con la ejecución de referencia.**

Finalmente, con el objetivo de evaluar la sensibilidad del modelo, la opción 5 de CRIDE se ejecutó dejando el peso promedio de un criterio y para los demás pesos se considera su variación, esto se realizó para cada uno de los criterios. Los resultados se muestran en la Figura 5, lo cual muestra que se puede utilizar el peso promedio



de uno de los pesos excepto para los criterios uno, seis y siete. Si se dejan el promedio de los pesos de estos criterios las alternativas E2 y E3 cambian de posición.



**Figura 5: Resultados dejando el peso de uno de los criterios fijo (peso promedio) (Fuente: Elaboración propia)**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el desarrollo de CRIDE como herramienta para soportar el proceso de toma de decisiones se propone un nuevo método basado en Monte Carlo, con el propósito de contemplar variabilidades como la diversidad de opinión, la incertidumbre y las evaluaciones imprecisas de los criterios. Al utilizar CRIDE para apoyar la toma de decisiones en el aprovechamiento de las aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, se generó un panorama de las posibles opciones en las que se podría llevar a cabo este aprovechamiento.

La nueva herramienta permite realizar una evaluación por grupos claves y virtuales, lo que permite comparaciones entre ellos y con la ejecución de referencia, así como la propuesta de la cantidad de encuestas, teniendo en cuenta la variabilidad y la complejidad del problema: CRIDE puede ser utilizado para diferentes tipos y nivel de complejidad de problemas de decisión de no clasificación y clasificación, por medio de inclusión de las posibles variaciones de las alternativas de desempeño de acuerdo a las incertidumbres, los criterios de peso y los niveles de concordancia.

Adicionalmente, la metodología desarrollada en CRIDE permite la evaluación de los criterios propuestos, realizando las pruebas de la robustez, redundancia y sensibilidad: utilizando los resultados de CRIDE en lugar de pruebas estadísticas convencionales, esta metodología puede ser útil en el proceso de establecimiento de criterios, considerado uno de los aspectos clave de la toma de decisiones.

CRIDE soportó el proceso de toma de decisión del aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de PUJ. Como resultado del proceso de decisión, el escenario sugerido es el Escenario 5, con una inversión inicial de US\$252,918, cinco años para el retorno de la inversión y con un 61% de ahorro. Este escenario que considera la recolección de la escorrentía generada en nueve cuencas (14 ha) para usos no potables (limpieza de pisos, descarga de sanitarios y riego de jardines), se va a construir por el departamento de Recursos Físicos de la Universidad.

A pesar de que en este proyecto se evaluaron algunas características claves para la definición de los criterios a utilizar en una actividad de toma de decisiones, para futuros proyectos de investigación es necesario concentrarse en la evaluación de los criterios contemplando los siguientes aspectos: idoneidad, accesibilidad, fidelidad, objetividad, precisión y robustez, (vi) sensibilidad y univocidad (Moura P, 2008). Lo anterior pone de manifiesto un desafío en cuanto al desarrollo de herramientas de AMC para condiciones no ideales de trabajo: ¿Cómo desarrollar una herramienta de AMC que otorgue resultados fieles a las opiniones del grupo decisor y/o de los encuestados sin que necesariamente se garantice un juego de criterios que cumpla con las características enunciadas anteriormente?

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ayyub B., Mccuen R. Probability, Statistics, and Reliability for Engineers and Scientists, Chapman and Hall / CRC Press LLC, Boca Raton, 2003
2. Ballén J. A., Galarza M. Á., Ortiz R. O. Sistemas de aprovechamiento de agua lluvia para vivienda urbana - VI SEREA - Seminario iberoamericano sobre sistemas de abastecimiento urbano de agua, João Pessoa Brasil, 2006
3. Baptista M., Barraud S., Alfakih E., Nascimento N., Fernandes W., Moura P., Castro L. Performance-cost evaluation for urban storm drainage. *Water Science & Technology*, v.51, n.02, p. 99–107. 2005
4. Brown R.R., Davies P. Understanding community receptivity to water re-use: Ku-ring-gai Council case study. *Water Science and Technology*, v.55, n.4, p.283–290, doi: 10.2166/wst.2007.119. 2007
5. Caflisch R.E. Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods, *Acta Numérica* 7, p.1–49, doi: 10.1017/S0962492900002804. 1998.
6. Coombes P.J., Mitchell V.G. Australian runoff quality: Roofwater, storm water, and wastewater reuse. Eds. T.H.F. Wong, The Institution of Engineers Australia, Sydney. 2006
7. Figueira J., Greco S., Roy B. ELECTRE methods with interaction between criteria: An extension of the concordance index. *European Journal of Operational Research*, v.199, p.478–495, doi: 10.1016/j.ejor.2008.11.025. 2005
8. Figueira J., Mousseau V., Roy B. Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys: ELECTRE methods, eds. J. Figueira, G. Salvatore and M. Ehrgott, Springer Science + Business Media, Inc., p. 133–162, Boston, 2005.
9. Galvis A., Cardona D. A., Bernal D.P. Modelo conceptual de la selección de tecnología para el control de la contaminación por aguas residuales domesticas en localidades colombianas menores a 30.000 habitantes, Seltar - Conferencia Internacional Agua 2005: De la Acción Local a las Metas Globales, pp. 1–10, Santiago de Cali, 2005
10. Gough J.D., Ward J.C. Environmental decision making and lake management. *Journal of Environmental Management*, v.48, n.1, p.1–15, doi: 10.1006/jema.1996.0063. 1996
11. Hajkowicz S., Collins K. A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management. *Water Resource Management*, v.21, p.1553–1566, doi: 10.1007/s11269-006-9112-5. 2006
12. Halton J.H. A Retrospective and Prospective Survey of the Monte Carlo Method. *SIAM Review*, v. 12, n.1, p. 1–63, doi: 10.1137/1012001. 1970
13. Hatt B.E., Deletic A., Fletcher T.D. A review of integrated storm water treatment and re-use in Australia. *Journal of Environmental Management*, v.76, p.102–113, doi: 10.1016/j.jenvman.2005.06.003, 2006
14. Lara Borrero J.A., Quijano Nieto J., Riveros D., Torres A., and Forero Lunal C. Optimización de sistemas expertos de apoyo a la toma de decisiones multicriterio - XXIX Congreso de la asociación interamericana de ingeniería sanitaria y ambiental (AIDIS 2004), San Juan, de Puerto Rico, 2004.
15. Lara Borrero J.A., Torres A., Campos Pinilla M.C., Duarte Castro L., Echeverri Robayo J.I., Villegas González P.A. Aprovechamiento del agua lluvia para riego y para el lavado de zonas duras y fachadas en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá). *Ingeniería y Universidad*, v.11, n.2, p.193–2007.
16. Martin C., Ruperd Y., Legret M. Urban stormwater drainage management: The development of a multicriteria decision aid approach for best management practices. *European Journal of Operational Research*, v.181, p.338–349, 2007
17. Mitchell V.G., McCarthy D.T., Deletic A., Fletcher T.D. Urban stormwater harvesting – sensitivity of a storage behaviour model. *Environmental Modelling & Software*, v. 23, p.782–793, doi: 10.1016/j.envsoft.2007.09.006. 2008
18. Moura P. (2008). Méthode d'évaluation des performances de systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain. Thèse pour obtenir le grade de docteur, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France.
19. Roy B., Bertier B. La méthode ELECTRE II: une méthode de classement en présence de critères multiples, Direction scientifique Nota de travail N° 142, SEMA METRA International, Paris, 1971
20. Sánchez L.S., Caicedo E. Uso del Agua Lluvia en la Bocana- Buenaventura - AGUA 2003 Internacional: Usos Múltiples del Agua Para la Vida y el Desarrollo Sostenible. Cartagena, 2003.
21. Smith Q. R., Mesa S. O., Dynner R. I., Jaramillo A. P., Poveda J. G., Valencia R. D. Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbres. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín Facultad de Minas, Medellín, 2000.
22. Torres A, Lara-Borrero J.A., Torres O., Estupiñán J., Mendez-Fajardo S. Aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá (PUJB). En *Gestión integrada del Recurso Hídrico Frente al Cambio Climático*, eds. L.D. Sánchez Torres, A. Galvis Castaño, I. Restrepo Tarquino and

- M.R. Peña Varón. Programa Editorial Universidad Del Valle, pp. 325 – 336, ISBN: 978958670914-9, Cali, 2011a.
23. Torres A., Estupiñan J. and Zapata H. Proposal and assessment of rainwater harvesting scenarios on the Javeriana University campus, Bogota - 12th International Conference on Urban Drainage (ICUD), Porto Alegre, 2011b.
  24. Vargas Franco V., Galvis A. Modelo de Selección de Tecnología y Análisis de Costos en el Tratamiento de Agua para Consumo Humano, Agua 2003 - Seminario Internacional: La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, Cartagena, 2003
  25. Villegas P., Obregón N., Lara Borrero J., Méndez S., Vargas A. Herramienta informática como apoyo en la toma de decisiones en proyectos de agua y saneamiento en comunidades indígenas. Avances en recursos hidráulicos, v.19, p. 39 –55. 2009