

# Metodología para Priorización de Zonas de Intervención y Proyectos de Inversión en una Cuenca

Recibido para evaluación: 20 de Mayo de 2003  
Aceptación: 20 de junio de 2003  
Recibido versión final: 31 de Julio de 2003

Patricia Jaramillo<sup>1</sup>  
Ricardo A. Smith<sup>2</sup>  
Jaime Ignacio Vélez<sup>2</sup>

## RESUMEN

El ordenamiento de cuencas requiere de procesos complejos de toma de decisiones. La limitación en recursos económicos y técnicos hace necesario identificar en qué orden espacial y temporal deben ejecutarse las acciones, justificado en función de la productividad, eficiencia, equidad y sostenibilidad que puedan lograrse. Se presenta una metodología para la priorización de zonas de intervención y proyectos a realizar en esas zonas, en un programa de ordenamiento de cuencas, con base en un método de análisis multicriterio bajo incertidumbre. La metodología se aplica a la cuenca urbana La Iguaná (Antioquia, Colombia), la cual presenta graves problemas ambientales y sociales.

**PALABRAS CLAVE:** Manejo de Cuencas, Toma de Decisiones, Priorización, Métodos Multicriterio

## ABSTRACT

Watersheds planning and management requires complex decision processes. Constraints in technical and economical resources forces to identify in which spatial and temporal order actions must be executed. These prioritisation must be justified as a function of the productivity, efficiency, equity and sustainability that can be achieved. A methodology based on multicriteria analysis is presented for the prioritisation of intervention areas in a watershed and of the projects to be executed in those areas. The proposed methodology is applied to a very complex urban watershed (La Iguaná watershed) in a region of Colombia, with critical environmental and social problems.

**KEY WORDS:** Watershed Management, Decision Making, Priorization, Multicriteria Analysis

1. Instituto de Sistemas y Ciencias de la Decisión  
Escuela de Sistemas  
Facultad de Minas  
Universidad Nacional de Colombia,  
Sede Medellín  
gpjarami@unalmed.edu.co  
2. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente  
Facultad de Minas  
Universidad Nacional de Colombia,  
Sede Medellín

## 1. INTRODUCCIÓN

La priorización se define como "el arreglo ordenado de un conjunto de elementos, con base en algunas cualidades que todos ellos poseen en grado variable". Cuando se requiere ordenar una o varias cuencas, se hace necesaria la priorización por la limitación en recursos económicos o técnicos para intervenir simultáneamente todas las cuencas de interés o implementar todos los proyectos. Ella identifica en qué orden espacial y temporal deben ejecutarse las acciones, justificado en función de la productividad, eficiencia, equidad y sostenibilidad que puedan lograrse. El establecimiento de prioridades, constituye un proceso complejo debido a los diferentes intereses e implicaciones que hay que considerar. Este razonamiento justifica la conveniencia de utilizar una metodología de toma de decisión bajo múltiples criterios, pues éstas consideran los múltiples aspectos y puntos de vista del problema. El análisis multicriterio permite un análisis equilibrado de todas las facetas de los problemas de planificación y gestión, incluyendo varios efectos intangibles, como los sociales y las repercusiones ambientales. A esta dimensión multicriterio se le superponen otros elementos de complejidad como la intervención en el proceso de decisión de varios decisores con intereses en conflicto, y la incertidumbre en la valoración de las consecuencias de las diferentes acciones posibles sobre la cuenca.

Un proceso básico para la priorización bajo múltiples criterios cubre los siguientes pasos:

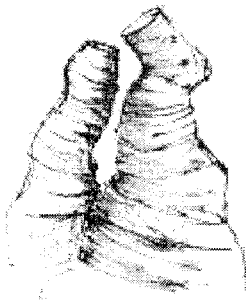
- Definición del grupo de expertos que ayudarán en la toma de decisión.
- Definición de objetivos prioritarios.
- Definición de los criterios de priorización.
- Generación de opciones: identificando las alternativas viables y ambientalmente aceptables para alcanzar los objetivos, con base en información multitemática.
- Evaluación de alternativas, según cada uno de los criterios establecidos. Estos valores indican el grado de cumplimiento de las alternativas.
- Resumen en matrices Alternativas - Criterios de la información obtenida en el paso anterior.
- Priorización de las alternativas usando métodos de análisis multicriterio.
- Presentación de recomendaciones para la implementación y el seguimiento del funcionamiento de las alternativas priorizadas, contrastado con los objetivos.

Se propone aquí una metodología que considera en forma independiente i) la priorización de zonas de intervención y ii) la priorización de proyectos en esas zonas. Sin embargo, ambos subproblemas son dos elementos de un único problema, por lo que el análisis debe siempre hacerse uno a la luz del otro. Ambas metodologías se basan en el uso de técnicas de múltiples objetivos, cuyo uso en problemas de priorización o toma de decisiones ha sido ampliamente reportado en la literatura (Smith *et al.*, 2000).

## 2. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

### Problema 1. Priorización de zonas de intervención

Es frecuente que se requiera de la priorización de zonas de intervención ya sea a nivel de cuenca, subcuenca o región, pues no se cuenta simultáneamente con los recursos económicos para todas ellas y no todas las zonas presentan igual necesidad de intervención. Para la generación de alternativas, es decir para la definición de zonas, usualmente se recurre a nivel de subcuenca, pero no es necesario que sea así, pues, en ese caso sería conveniente considerar las interdependencias que generarían la intervención en una u otra área, o las reacciones en cadena que puedan surgir. Igualmente, se hace necesario considerar que a veces fenómenos en dos subcuencas son comunes y dependientes, que algunas intervenciones pueden hacerse simultáneamente entre varias subcuencas aprovechando la sinergia generada en ello; o que solucionar en una puede acarrear daños en otra. La llamada "línea de divorcio de aguas" no es más que una de tantas formas de definir límites espaciales. Recuérdese que con frecuencia, los límites de las aguas subterráneas no coinciden con los de las superficiales, o que intervenciones sobre el hábitat de una subcuenca influyen directamente sobre el de otra subcuenca.



Se propone entonces que una vez realizada una división primaria, por ejemplo, en subcuencas, se realice un diagrama causal en el que se establezcan diferentes tipos de relaciones entre subcuencas, por ejemplo: influencia directa positiva, influencia directa negativa, etc. Es posible que en esta evaluación se considere la necesidad de integrar en una zona de intervención más de una subcuenca, o todo lo contrario, que se considere una parte de la subcuenca como zona de intervención con significativas prioridades respecto a la otra. De no hacerlo así, al seguir la priorización obtenida se requeriría implementar todos los proyectos asignados a una zona, antes que los de la que le sigue en orden de prioridad, quizá ésta con mayor urgencia que una porción de la anterior.

• **Definición de criterios de priorización de zonas de intervención**

La definición de criterios de priorización debe hacerse a partir de una jerarquía de criterios de decisión que facilita el análisis de decisión y la definición y priorización de criterios (Figura 1). El primer nivel jerárquico corresponde a los objetivos de carácter general: *Equidad, Sostenibilidad y Productividad*. Cada uno de estos objetivos generales se subdivide en criterios de segunda jerarquía, que se describirán más adelante. En esta jerarquía los criterios deben considerar la eficacia, eficiencia, pertinencia, viabilidad e impacto respecto a los objetivos de la primera categoría; deben ser además, en lo posible, independientes entre sí y operacionales, es decir, que permitan ser valorados. Suele ser difícil cumplir a cabalidad el requerimiento de independencia, pero debe hacerse un esfuerzo por lograrlo.

La definición de criterios generales para la metodología de priorización de zonas debe dar holgura a la introducción de nuevos criterios específicos, o la eliminación de criterios que en la cuenca de estudio no permiten una clara diferenciación entre zonas de intervención o no se consideran relevantes.

Paralelo a los criterios de priorización seleccionados, debe definirse, por cada criterio, el atributo o escala de valoración que se usará para la calificación de las alternativas. Estos podrán ser valorados en unidades de medida como ha, m<sup>3</sup>, etc, o valorados en una escala cualitativa definida por los evaluadores.

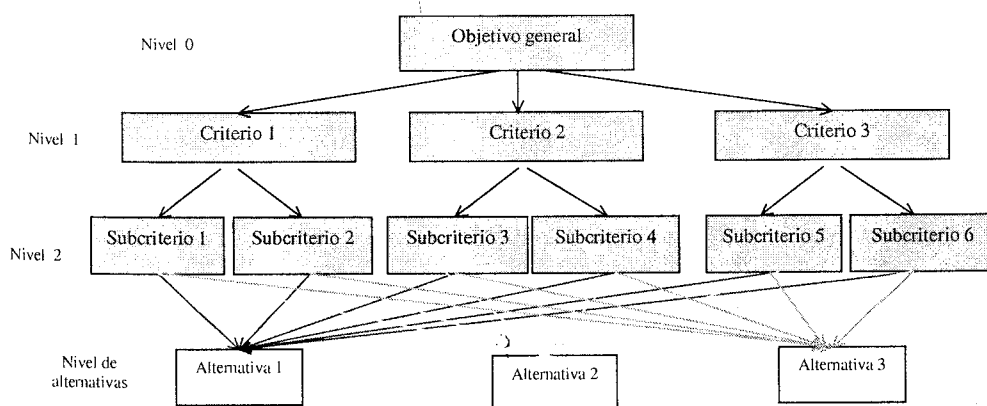


Figura 1. Estructura jerárquica del problema de decisión

• **Criterios para la priorización**

Se proponen algunos de los siguientes criterios:

**De Equidad**

- ❖ Mayor presión social: número de personas actuales y potenciales asentadas permanentemente.
- ❖ Mayor número de usuarios actuales y potenciales de los recursos naturales renovables de la cuenca.
- ❖ Menor cobertura de servicios (educación, salubridad, electrificación y acueductos).

### **De Sostenibilidad**

- ✦ Mayor conflicto entre usos potenciales y actuales (área en conflicto por sobreuso del suelo: uso actual mayor que uso potencial).
- ✦ Mayor área de zonas deforestadas: Áreas desprovistas de cobertura vegetal adecuada.
- ✦ Mayor erosión y producción de sedimentos.
- ✦ Mayor nivel de incidencia en inundaciones de zonas urbanas.
- ✦ Mayor desequilibrio demanda-oferta hídrica.
- ✦ Mayor respuesta potencial del plan de manejo.

### **De Productividad**

- ✦ Mayor productividad (hídrica, agrícola, energética, minera y forestal).
- ✦ Mayor relevancia política-económica (situación estratégica).

## **Problema 2: Priorización de Proyectos en cada zona de intervención**

### **• *Formulación de proyectos para cada zona***

Normalmente en las zonas de intervención existen una serie de problemas que deben ser solucionados: problemas de índole físico como un deslizamiento o la erosión de ciertas áreas, problemas bióticos como la deforestación, problemas sociales como altos índices de violencia, etc. Se debe entonces identificar proyectos a ser implementados que pueden ser de los siguientes tipos (Universidad Nacional de Colombia *et al.*, 2003):

- ✦ Los que viabilizan la implementación de la zonificación. Estos proyectos generalmente representan reubicación de personas debido a que están localizadas en zonas de restricciones.
- ✦ Los que solucionan problemas existentes en la cuenca. Estos proyectos pretenden dar solución a los problemas identificados en el diagnóstico y dependerán directamente del tipo de problema que pretenden solucionar.
- ✦ Los asociados a la gestión. Este tipo de programas y proyectos representan aspectos de gestión que garanticen la adecuada implementación.

Un vez formulados los proyectos compiten entre sí para su priorización. Antes de priorizar se hace necesario evaluar qué restricciones tiene el proceso, por ejemplo, qué proyectos están en conflicto temporal, espacial o de propósito. Estas restricciones limitan el número de posibilidades de ordenamiento de proyectos.

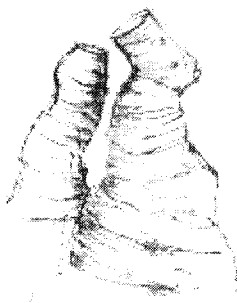
### **• *Esquema de priorización de proyectos***

Tiene dos etapas: i) supervisada ii) no supervisada. La primera etapa exige de los decisores una clasificación directa en niveles jerarquizados según los intereses relevantes en la zona. Por ejemplo, en el primer nivel agrupar los proyectos relacionados con la solución de ocupación de zonas de alto riesgo, en un segundo nivel proyectos para la mejor convivencia ciudadana, etc. Así, todos los proyectos situados de un grupo superior se realizarían antes que todos los proyectos de un grupo inferior. La etapa no supervisada considera la priorización de proyectos al interior de cada nivel jerárquico por el método de análisis multicriterio propuesto. En caso de que haya proyectos relacionados con más de un grupo, el proyecto se colocará en el grupo de prioridad superior de esos grupos.

### **Etapa supervisada**

Se recomienda la siguiente jerarquía, pero bien podría ser diferente en virtud de la zona de intervención que se está evaluando (Universidad Nacional de Colombia *et al.*, 2003):

- ✦ **Primer nivel de prioridad**  
Proyectos relacionados con la solución de ocupación de zonas de alto riesgo.
- ✦ **Segundo nivel de prioridad**  
Proyectos que conduzcan a una mejor convivencia ciudadana y a una disminución de los índices de violencia.
- ✦ **Tercer nivel de prioridad**  
Proyectos orientados a la protección y conservación de los recursos naturales, tales como nacimientos, ecosistemas estratégicos, zonas de recarga de acuíferos, retiros de quebradas, control de la calidad del agua, suelo y aire, conservación de espacios públicos, bosques y otros.



- ❖ **Cuarto nivel de prioridad**  
Proyectos orientados a mejorar la calidad de vida de los habitantes tales como mejoras en las comunicaciones, mejoras en los servicios públicos, mejoras en los equipamientos y servicios de salud, mejoras en el sistema educativo, mejoras en las ofertas de habitaciones, y otros.
- ❖ **Quinto nivel de prioridad**  
Proyectos que no pueden ser clasificados en los grupos anteriores, como proyectos que desarrollen actividades recreativas, desarrollo de infraestructura turística, apoyo al desarrollo de industrias, y otros.

**Etapa no supervisada**

Al interior de cada grupo se hace la priorización no supervisada de proyectos mediante análisis multicriterio. En cada grupo se usarán criterios diferentes.

Se presenta a continuación la propuesta de criterios evaluadores para cada uno de los grupos de priorización propuestos anteriormente. En esta propuesta se trata, en la medida de lo posible, que los criterios sean evaluados de manera cuantitativa y no cualitativa, para disminuir la subjetividad en la priorización de los proyectos. Los criterios propuestos son entonces los siguientes:

- ❖ **Primer nivel de prioridad**  
Proyectos relacionados con la solución de ocupación de zonas de alto riesgo. Se proponen los siguientes criterios para este grupo:
  - Pérdidas de vida. Evaluado por el número de vidas que se podrían perder si el proyecto no se implementa.
  - Pérdidas de viviendas. Evaluado por el número de viviendas que se verían afectadas si el proyecto no se implementa.
  - Pérdida de infraestructura. Evaluado por el valor de la infraestructura que se podría perder si no se implementa el proyecto.
  - Total de población afectada. Evaluado por el total de la población que podría afectarse si no se implementa el proyecto.
  - Costo del proyecto.
  - Total de población beneficiada. Évaluado por el total de la población beneficiada por la implementación del proyecto.
- ❖ **Segundo nivel de prioridad**  
Proyectos o programas para la convivencia ciudadana y disminución de los índices de violencia. Se proponen los siguientes criterios para este grupo:
  - Disminución esperada de índices de violencia.
  - Total de población beneficiada.
  - Costo del proyecto o programa.
  - Favorabilidad de la convivencia (valoración cualitativa, alta-media-baja).
- ❖ **Tercer nivel de prioridad**  
Proyectos y programas orientados a la protección y conservación de los recursos naturales.
  - Población beneficiada.
  - Impacto positivo ecológico o ambiental al implementarse el proyecto o programa. Requiere valoración cualitativa, tal como se presenta en la Tabla 1.

Calificación	Definición
Alto	Por ejemplo, logra la conservación de un nacimiento, la protección de una zona de bosques que representa un ecosistema estratégico, la construcción de colectores a ambos lados de una quebrada controlando el problema de su contaminación, etc.
Medio	Similares a los anteriores pero que no beneficiarían a la población directamente por no estar ubicados en zonas urbanas, o no son ecosistemas estratégicos, o no son tan indispensables.
Bajo	Tienen un bajo impacto ambiental en el sentido de que la población beneficiada es muy poca, o las repercusiones en la protección de ecosistemas es muy baja, o no son indispensables.

Tabla 1.  
Escala de valoración para el criterio: Impacto positivo ecológico o ambiental

- Costo del proyecto.
- Mejoramiento de la calidad del agua. Disminución en el índice agregado de calidad del agua con la implementación del proyecto.
- Conservación. Capacidad de conservación de elementos que se consideran importantes de conservar. Se evaluaría de manera cualitativa de acuerdo con la Tabla 2.

**Tabla 2.**  
Escala de valoración para el  
criterio: Conservación

Calificación	Definición
Alto	Está directamente relacionado con la conservación de: nacimientos, ecosistemas estratégicos, quebradas, patrimonio histórico o cultural y parques.
Medio	No está directamente relacionado con la conservación de los elementos anteriores sino que colabora con esa conservación. También proyectos relacionados con la conservación de: zonas verdes puntuales, viviendas de interés especial, áreas de riesgo alto o mediano sin ocupación.
Bajo	El proyecto colabora muy marginalmente con la conservación de los anteriores elementos.

✦ **Cuarto nivel de prioridad**

Proyectos orientados a mejorar la calidad de vida de los habitantes. Los criterios recomendados son:

- Población beneficiada
- Costo económico del proyecto.
- Beneficio económico neto del proyecto.
- Aceptabilidad comunitaria.
- Generación de empleo.
- Impacto sobre la calidad de vida. Se valora según la Tabla 3.

**Tabla 3.**  
Escala de valoración para el  
criterio: Impacto sobre la calidad  
de vida

Calificación	Definición
Alto	El proyecto tiene un alto impacto sobre la calidad de vida. En este sentido haría disponible para una población que no tiene ningún tipo de servicio público, agua potable, energía eléctrica, servicios de salud, educación, comunicaciones, ofertas de vivienda, u otros.
Medio	El proyecto tiene un impacto medio en la calidad de vida de los habitantes. Por ejemplo, se mejoraría la calidad de un servicio que ya existe, o se implementan servicios que no se consideran tan importantes como los anteriores, tales como recreación y esparcimiento.
Bajo	El proyecto tiene un bajo impacto sobre la calidad de vida de los habitantes, solo contribuye de una manera marginal o muy baja a mejorar esa calidad de vida.

✦ **Quinto nivel de prioridad**

Otros proyectos que no pueden ser clasificados en los grupos anteriores. Los criterios recomendados son:

- Población beneficiada.
- Costo del proyecto o programa.
- Beneficio neto del proyecto o programa.
- Generación de empleos.
- Aceptabilidad comunitaria (valoración cualitativa).

### 3. METODOLOGÍA MULTICRITERIO PARA LA PRIORIZACIÓN

La priorización en manejo de cuencas usualmente ha sido hecha mediante técnicas de análisis multicriterio elementales, en especial, mediante índices que caracterizan a cada alternativa usando la suma ponderada de las calificaciones en cada criterio. Este método deja de lado (Jaramillo, 1999):

- La consideración de la incertidumbre en esas valoraciones.
- La consideración de valores extremos que superan valores límites de satisfacción o puntos de saturación.
- Un reescalamiento de los valores que reflejen la verdadera importancia de los criterios. Esto debido a que los atributos con los que se cuantifican los criterios no tiene porqué ser linealmente correspondientes a la escala de preferencias de los decisores.
- La variabilidad de las valoraciones que representan a cada alternativa, pues es posible que con este método un solo valor extremo en un criterio defina una alta prioridad de la alternativa, a pesar de que en los demás criterios dicha zona no sea determinante.

Existen otros métodos muy útiles de análisis multicriterio como Programación de Compromiso, Programación por Metas, Función de Utilidad Multiatributo, etc. (Smith *et al.*, 2000). Sin embargo, estos métodos no solventan todas las carencias enumeradas anteriormente. Por eso se recomienda la siguiente metodología para la priorización en los problemas 1 y 2.

**a. Definición de grupos de expertos que ayudarán a la toma de decisión**

El grupo de expertos debe estar conformado por especialistas en diferentes disciplinas y con diferentes intereses, que representen diversos sectores políticos, sociales y económicos, con un alto grado de conocimiento de la zona de intervención. Ellos estarán en obligación de: definir zonas de intervención, establecer criterios de priorización, evaluar las alternativas respecto a los criterios de jerarquización, y participar en el proceso de análisis multicriterio, el cual requiere de la asignación de una gama de valores de carácter subjetivo.

**b. Descripción de las alternativas**

En el problema 1 las zonas de intervención corresponden a las alternativas a priorizar y en el problema 2, los proyectos a implementar en cada zona de intervención.

**c. Asignación de valores a cada alternativa para cada uno de los criterios establecidos. (Matriz de pagos)**

Cada alternativa debe evaluarse a la luz de los diferentes criterios de última jerarquía. Estas valoraciones indican el grado de cumplimiento de los criterios de decisión de las alternativas. Si en la evaluación de un criterio, se percibe que hay incertidumbre, es decir, su valoración depende de la presencia o no de condiciones inciertas en el futuro, este criterio debe evaluarse como "criterio bajo incertidumbre", como se explica más adelante. Los valores pueden organizarse en una matriz de pagos como se presenta en la Tabla 4.

Alternativas	Criterios			
	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	...	Z <sub>p</sub>
A <sub>1</sub>	Z <sub>11</sub>	Z <sub>21</sub>	...	Z <sub>p1</sub>
A <sub>2</sub>	Z <sub>12</sub>	Z <sub>22</sub>	...	Z <sub>p2</sub>
...	...	...	...	...
A <sub>n</sub>	Z <sub>1n</sub>	Z <sub>2n</sub>	...	Z <sub>pn</sub>

Tabla 4.  
Matriz de pagos: Criterios - Alternativas

Donde *n* es el número de alternativas y *p* el número de criterios de última jerarquía. Esta matriz tendrá una valoraciones  $Z_{ij}$  por cada criterio  $Z_i$  y alternativa  $A_j$ . Los criterios estarán valorados en diferentes unidades.

**d. Metodología multicriterio**

♦ **Definición de pesos de los objetivos**

A todos los criterios debe asignársele un peso de importancia relativa. Para ello se requiere de la evaluación del equipo de expertos de apoyo a la priorización. La definición de pesos se hará por consenso del grupo. A cada criterio debe asignársele un peso de importancia relativa respecto a los otros criterios del mismo grupo jerárquico. Un grupo jerárquico consiste en el grupo de criterios de la jerarquía *m* que comparten el mismo criterio de nivel *m-1* o "criterio padre".

Para ello puede usarse uno de los siguientes procesos:

- Asignación directa de los pesos de importancia, tal que su suma al interior de su propio grupo jerárquico sea uno.

-Uso de la técnica ideada por Saaty para el método AHP (*Analytic Hierarchy Process*, Saaty, 1980) que consiste en que para cada uno de los grupos jerárquicos se genera una matriz de comparaciones entre pares de criterios (# de criterios · # de criterios). Cada elemento de la matriz define cuantas veces es más importante el criterio de la fila respecto al criterio de la columna con relación a su "criterio padre". De esta matriz puede obtenerse el autovector (o vector principal), el cual definirá los pesos de cada uno de los criterios dentro de su respectivo grupo jerárquico. La suma de todos los pesos de un grupo jerárquico da como resultado la unidad.

Como en la matriz de pagos solo van las valoraciones respecto a los criterios de última jerarquía, debe obtenerse el peso global de estos criterios. El peso global de cada criterio de la segunda jerarquía, será el valor resultante de multiplicar el peso local (dentro de su grupo jerárquico) por el peso local de su "criterio padre". Si el criterio es de tercera jerarquía el peso correspondiente será el valor resultante de multiplicar, su peso local dentro del grupo jerárquico por el peso local de su "criterio padre" por el peso local de su "criterio abuelo". La suma de todos los pesos globales da uno.

♦ **Normalización de la matriz de pagos**

Cada uno de las valoraciones de la matriz de pagos debe reescalarme a valores dentro del rango 0-1, con el fin de llevar todas las valoraciones  $Z_{ij}$  a una escala común.

Para cada criterio  $i$  debe definirse, entonces, una función de reescalamiento o función de valor, que debe cumplir las siguientes condiciones (considerando criterios que se desean maximizar; si se desea minimizar se hace lo contrario):

- Debe asignar a la mayor valoración del criterio el valor de 1 y a la menor valoración del criterio el valor 0.
- Valoraciones que estén por debajo de un límite de satisfacción  $L_{1i}$ , fijado por los decisores deben tomar el valor de 0. Este límite indicará qué alternativas con valoraciones menores a él no urgen de una rápida implementación (considerando únicamente el criterio en cuestión).
- Valoraciones que superen un valor  $L_{2i}$ , fijado por los decisores debe tomar el valor de 1. Este límite indicará qué alternativas con valoraciones mayores a él urgen de una rápida implementación (considerando únicamente el criterio en cuestión).
- A las valoraciones intermedias entre  $L_{1i}$  y  $L_{2i}$  asignar valores entre 0 a 1. Según la importancia del criterio, la función de reescalamiento puede ser cóncava, convexa o lineal. Este reescalamiento indicará qué tan importante es o no la diferencia entre valoraciones específicas del criterio, ya que la pendiente puede cambiar a lo largo del rango  $L_{1i} - L_{2i}$  (Figura 2).

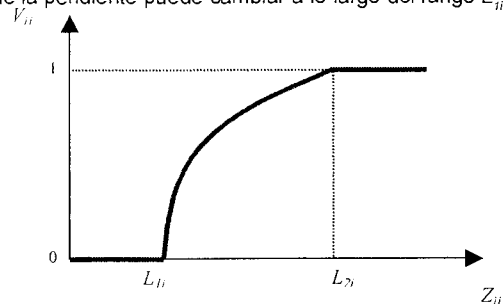


Figura 2.  
Función de Valor de un criterio

Una vez se definan todas las funciones de valor para todos los criterios de última jerarquía se conforma la matriz de pagos normalizada, mediante las transformaciones correspondientes. La nueva matriz normalizada estará, entonces, conformada de valores  $V_{ij}$  entre 0 y 1, siendo  $j$  la alternativa e  $i$  el criterio correspondiente.

♦ **Priorización**

A cada alternativa  $j$  se le asignará un índice de prioridad  $I_j$  definido por al ecuación (1):

$$I_j = \left[ \sum_{i=1}^p [w_i (1 - V_{ij})]^2 \right]^{1/2} \tag{1}$$



Donde  $p$  es el número de criterios de última jerarquía y  $w_j$  los pesos respectivos. El orden de prioridad será definido así: entre menor  $I_j$ , mayor prioridad. En la formulación anterior se destacan varias características del método. La función de distancia define el denominado "arrepentimiento", es decir distancia al ideal normalizado 1. El exponente 2 castiga fuertemente a las alternativas con valores extremos bajos. Bajo esta formulación puede resultar mejor ordenada una alternativa con valores medios en todos los criterios que una alternativa con excelentes valores en unos criterios y pésimos valores en otros. El uso de la métrica 1 es muy insensible a estos casos.

La priorización generada al ordenar las alternativas de menor a mayor índice  $I$ , no puede considerarse como definitiva sin hacer una evaluación de los resultados, lo cual implica:

- Revisar si alternativas que subjetivamente se consideraban prioritarias, no fueron muy favorecidas por el método. Si este es el caso, revisar la evaluación de la alternativa respecto a los criterios, o la incorporación de valoraciones subjetivas dentro del método multicriterio.
- Hacer análisis de sensibilidad. Éste evalúa como pueden afectar las posibles variaciones de algunos de los parámetros subjetivos usados, a los resultados finales. Los pesos asignados a los diferentes criterios solo pueden considerarse valores aproximados de los verdaderas preferencias del decisor. Debe evaluarse entonces qué tanto varía el orden de prioridad de las alternativas ante algunos cambios en los pesos. Puede hacerse evaluando por un lado, la estabilidad de cada alternativa en el ordenamiento ante la variación de los valores de los pesos, y de otro lado, en que rangos de valores de los pesos no cambia significativamente el orden resultante.

#### 4. CRITERIOS BAJO INCERTIDUMBRE

Un criterio  $k$  debe considerarse bajo incertidumbre si al definir la matriz de pagos y evaluar cada una de las alternativas, no es posible asignar un único valor sino una serie de valores asociados a la posible ocurrencia en el futuro de ciertos eventos excluyentes entre sí. Esos eventos futuros no se encuentran bajo el control del decisor pero afectan los resultados finales del problema y se les denomina estados de la naturaleza (Smith *et al.* 2000).

Generalmente, es posible establecer una lista discreta de posibles eventos futuros y asociarles una probabilidad de ocurrencia. Debido a que la lista debe ser completa y excluyente, la suma de probabilidades debe dar uno. Bajo el esquema del riesgo o la incertidumbre, el criterio  $k$  tendrá tantos valores por alternativa como estados de la naturaleza se consideren (Tabla 5), así:

Alternativas	Criterio $k$			
	$\theta_1$	$\theta_2$	...	$\theta_e$
$A_1$	$Z_{11k}$	$Z_{21k}$	...	$Z_{e1k}$
$A_2$	$Z_{12k}$	$Z_{22k}$	...	$Z_{e2k}$
...	...	...	...	...
$A_n$	$Z_{1nk}$	$Z_{2nk}$	...	$Z_{enk}$
$P[\theta_i]$	$P[\theta_1]$	$P[\theta_2]$	$P[\theta_3]$	$P[\theta_4]$

Tabla 5.  
Matriz de Pagos: Estados de la naturaleza – Alternativas

Donde:  $\theta_j$  representa al estado de naturaleza  $j$ ,  $P(\theta_j)$  es el valor de probabilidad de ocurrencia asociado al estado de naturaleza  $j$ ,  $A_i$  representa a la alternativa  $i$ ,  $Z_{ijk}$  es el valor de la alternativa  $i$  ( $A$ ) respecto al criterio  $k$  bajo las condiciones del estado de naturaleza  $j$ ,  $e$  es el número de estados de naturaleza y  $n$  el número de alternativas.

Es posible entonces que una alternativa, en todos los estados de la naturaleza tenga valores apreciables, pero es posible también que para algunos estados de la naturaleza tenga valores muy altos y en otros estados valores muy bajos. Esta variabilidad hace que no existe una única manera de valorar una alternativa respecto a un criterio bajo incertidumbre, pues si bien, es posible que en promedio esa alternativa se valore bien, la presencia de valores extremos hace que el simple valor promedio no sea completamente adecuado al valorar el riesgo asociado. Se han desarrollado, entonces, diferentes evaluadores de riesgo de la alternativa respecto al criterio  $k$ . Se propone usar los siguientes:

Valor esperado: Para cada alternativa  $i$  se calcula:

$$E[A_i] = \sum_{j=1}^e Z_{ijk} P(\theta_j) \quad (2)$$

Funciones de arrepentimiento (vulnerabilidad): Este criterio compara las alternativas con respecto al nivel de retorno ideal  $Z_{j,max,k}$  sobre cada estado de la naturaleza  $\theta_j$ . Para cada alternativa  $i$  se calcula:

$$D[A_i] = \left( \sum_{j=1}^e ((Z_{j,max,k} - Z_{ijk}) P(\theta_j))^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

Donde  $Z_{j,max,k}$  es el mejor valor posible respecto al estado  $\theta_j$

$\beta$ -Robustez: El cálculo del criterio  $\beta$ -robustez, se realiza con respecto a un nivel de aceptabilidad  $\beta$ , en donde  $\beta$  representa la máxima diferencia con respecto al valor de referencia  $Z_{j,max,k}$  que se considera aceptable por el decisor, así:

$$R[A_i] = \sum_{j=1}^e \phi_j(Z_{ijk}) P(\theta_j) \quad (4)$$

$\phi_j(Z_{ijk})$  es una función que indica si la alternativa  $A_i$  es aceptable en el estado  $\theta_j$  y se define según la siguiente expresión:

$$\phi_j(Z_{ijk}) = \begin{cases} 1 & \text{si } \frac{Z_{j,max,k} - Z_{ijk}}{Z_{j,max,k} - Z_{j,min,k}} \leq \beta \\ 0 & \text{si } \frac{Z_{j,max,k} - Z_{ijk}}{Z_{j,max,k} - Z_{j,min,k}} > \beta \end{cases} \quad (5)$$

Donde  $Z_{j,min,k}$  es el peor valor posible respecto al estado  $\theta_j$ .

Se debe tener presente que todos los evaluadores descritos tratan de valorar un comportamiento particular de las alternativas, bajo diferentes puntos de vista. Es por ello que un buen análisis del problema, siempre debe incluir varios evaluadores ya que ninguno de ellos por si solo es capaz de representar fielmente el comportamiento global de las alternativas.

El criterio  $k$  puede ahora representarse como en la Tabla 6.

Tabla 6.  
Matriz: Evaluadores bajo  
Incertidumbre - Alternativas

Alternativas	Valor esperado $k$	Vulnerabilidad $k$	Robustez $k$
$A_1$	$Z_{11}$	$Z_{21}$	$Z_{31}$
$A_2$	$Z_{12}$	$Z_{22}$	$Z_{32}$
...	...	...	...
$A_n$	$Z_{1n}$	$Z_{2n}$	$Z_{3n}$

En el árbol jerárquico de criterios de priorización, el criterio *k* debe subdividirse en un grupo de 3 criterios: valor esperado, vulnerabilidad y robustez (Figura 3).

Además en la matriz de pagos la columna del criterio *k* debe entonces reemplazarse por tres columnas correspondientes a los 3 nuevos criterios. Una vez realizado esto se continúa con la metodología descrita anteriormente.

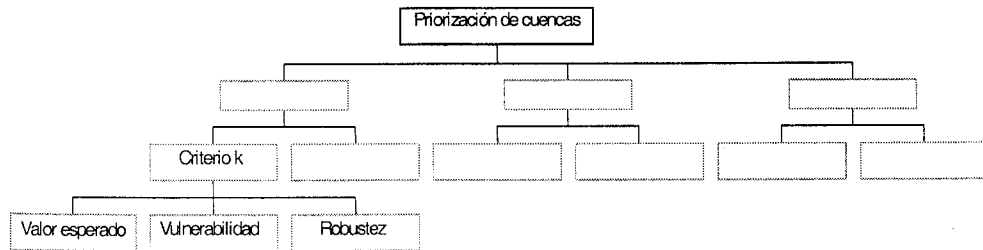


Figura 3. Estructura jerárquica de un criterio bajo incertidumbre

## 5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LA MICROCUENCA LA IGUANÁ

La metodología propuesta se aplicó a la priorización de programas y proyectos dentro del Plan de Ordenamiento y Manejo de la Quebrada La Iguaná, que es afluente al río Medellín. En la cuenca del río Medellín existen numerables estudios que reportan en forma independiente los problemas que están asociados al uso, explotación del suelo y urbanismo de las cuencas (Universidad Nacional de Colombia *et al.*, 2003). En el proceso de formulación se identificaron 27 proyectos que se agruparon en los diferentes grupos propuestos en la metodología presentada, y dentro de cada grupo se procedió a hacer las priorizaciones respectivas usando los criterios propuestos para tal efecto.

En resumen para Medellín, como principal centro urbano, se han identificado los siguientes problemas:

- Se ha superado ampliamente la capacidad de recuperación de las aguas frente al deterioro derivado de vertimientos líquidos de diferente composición.
- Hay alteraciones de la geometría y propiedades hidráulicas de su cauce y se ha limitado la existencia de condiciones físicas esenciales para la configuración de hábitats.
- En tramos no saneados, es el receptor y portador de desechos.
- Las necesidades de desarrollo vial y urbanístico, han reducido una estructura compleja y diversa a una en la que se privilegia la capacidad hidráulica.
- Muchas de las quebradas son torrenciales, por lo que, aun con bajos caudales, tienen riesgos asociados a los períodos de lluvia, ocasionando inundaciones y deslizamientos.
- Las condiciones naturales de sus áreas de retiro están altamente intervenidas.
- Las zonas de nacimiento de agua están degradadas y en algunos casos, ocupadas por grupos sociales armados.
- La invasión de los retiros ha impedido un diseño adecuado y económico de los alcantarillados como sistema básico de saneamiento y ha creado condiciones sanitarias contraproducentes.
- Hay arrastres de sedimentos, basuras y escombros.
- Con el objeto de habilitar áreas, se construyen coberturas de las quebradas con lo cual se deterioran y pierden definitivamente condiciones naturales de estas.

En general, todos estos problemas se presentan en las distintas quebradas de la cuenca del río Medellín, en mayor o menor intensidad. Muchos de ellos no son independientes entre sí, algunos de ellos son causantes de los otros y viceversa. En ocasiones ocurre el efecto en cadena: un problema lleva a otro que a su vez lleva a otro, y así de manera sucesiva.

### Priorización de proyectos

En la Tabla 7 se presenta la priorización de proyectos resultante de aplicar la metodología

propuesta (por razones de espacio no se presentan las matrices de valoraciones). En la tabla, el orden de prioridad se expresa respecto al nivel correspondiente. Estos resultados fueron obtenidos usando pesos de importancia relativa dentro de todos los grupos. En el cuarto nivel no se realizó una verdadera priorización porque todos los proyectos hacían parte de un mismo programa (Universidad Nacional de Colombia *et al.*, 2003). En el quinto nivel solo se formuló un proyecto.

Tabla 7.  
Priorización de los Proyectos del  
Plan de Ordenamiento y Manejo  
de la Parte Baja de la Cuenca de  
la Quebrada La Iguana

Proyecto	Orden de prioridad
<b>Primer Nivel: Solución de ocupación de zonas de alto riesgo</b>	
Evaluación de sismo-resistencia de edificaciones estratégicas y de ocupación masiva	1
Plan de prevención y atención de desastres por riesgo de inundación	2
Plan de prevención y atención de desastres en las zonas calificadas como de riesgo alto y moderado en la subcuenca	2
Intervención social en los comités de prevención y atención de desastres	3
Plan de Reubicación de familias asentadas en zona de alto riesgo no mitigable	4
<b>Segundo Nivel: Mejoramiento de la convivencia ciudadana</b>	
Red de mesas barriales de convivencia	1
Capacitación de jóvenes para el empleo	2
Empleo y mejoramiento de ingresos para mujeres cabeza de hogar	3
<b>Tercer Nivel: Protección de Recursos naturales</b>	
Saneamiento y recuperación de la microcuenca de la Quebrada La Iguana	1
Manejo integral de residuos sólidos	2
Plan de ordenamiento y manejo del recurso agua	3
Plan de valoración, ordenación y manejo de ecosistemas boscosos pertenecientes a la zona de protección forestal	4
Evaluación de alternativas de producción	4
Producción más limpia en el sector agropecuario	4
Plan de mejoramiento del saneamiento básico y el servicio de agua potable en la zona rural	4
Aspectos económicos del manejo de residuos sólidos en la microcuenca de La Iguana	5
Protección de cauces y nacimientos de corrientes de agua que abastecen acueductos comunales en la vereda El Yolombo	5
Muestreo de fauna terrestre y acuática en zonas de importancia ecológica de la microcuenca de la quebrada La Iguana	6
Red de medición de variables hidroclimatológicas y de calidad del agua en las cuenca	7
Aire Limpio como Símbolo de Calidad de Vida	8
Proyecto de control del tráfico de fauna en la microcuenca de la quebrada La Iguana	9
Programa de educación y gestión ambiental participativa	10
Impulso, apoyo e implementación del Consejo Ambiental Municipal	11
<b>Cuarto Nivel: Mejoramiento de la calidad de vida</b>	
Redefinición de la estructura urbana de la microcuenca de la quebrada La Iguana	1
Reordenamiento del sistema vial de la microcuenca de la quebrada La Iguana	1
Reordenamiento del sistema de transporte público a lo largo de la microcuenca de la quebrada La Iguana	1
Elaboración del plan de vivienda para el área de la microcuenca de la quebrada La Iguana	1
<b>Quinto Nivel: Otros</b>	
Plan de ordenamiento turístico y cultural	1

## 6. CONCLUSIONES

El ordenamiento de cuencas exige de procesos de toma de decisiones complejos. Las metodologías de uso frecuente para la priorización de zonas de intervención y de proyectos, simplifican excesivamente el proceso, evitando considerar aspectos complejos, determinantes en el éxito o no de la práctica ambiental. La propuesta metodológica hecha es un intento por superar estas barreras, involucrando aspectos relevantes como los múltiples criterios, la incertidumbre, y las interrelaciones entre los elementos de decisión. El proceso de priorización propuesto para programas y proyectos de inversión en una cuenca tiene como ventaja que minimiza las posibilidades de manipular subjetivamente el orden de importancia de los proyectos. Primero se definen los niveles de prioridad, y los programas y proyectos de un nivel superior son siempre prioritarios sobre los de los niveles inferiores.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Mi Río y a la Corporación Autónoma Regional CORANTIOQUIA por el apoyo brindado dentro del proyecto "Diseño de la Metodología para la Formulación de Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas (PIOM) y su Aplicación en la Parte Baja de la Cuenca Hidrográfica de la Quebrada La Iguaná".

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Jaramillo, P. 1999., Desarrollo de un sistema soporte a la decisión para la asignación de recursos naturales con satisfacción de múltiples objetivos y múltiples decisores. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Saaty, T. L. 1980., The Analytic Hierarchy Process: Planing, Priority Setting, Resources Allocations. McGraw-Hill International Book Co., New York.
- Smith, R., Mesa O., Dyner I., Jaramillo P., Poveda G. y Valencia D., 2000. Decisiones con Múltiples Objetivos e Incertidumbre. 2ª edición. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Medellín, Colombia.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, CORANTIOQUIA, INSTITUTO MI RÍO., 2003. Diseño de la Metodología para la Formulación de Planes de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas – PIOM – y su Aplicación a la Parte Baja de la Cuenca de la Quebrada La Iguaná. Informe Final. Medellín, Colombia.

