

Priorización de zonas de retiro con análisis multiobjetivo: Aplicación en la Cuenca de la Quebrada Santa Elena

Recibido para evaluación: 23 de Enero de 2005

Aceptación: 22 de Mayo de 2006

Recibido versión final: 15 de Junio de 2006

Luis Fernando Carvajal¹

Julián Zuluaga²

RESUMEN

Este trabajo presenta una metodología de Análisis Multiobjetivo (AMO), método ELECTRE III con Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la priorización de zonas de retiro por microcuencas en la red de drenaje de la cuenca de la quebrada Santa Elena, zona centro oriental de Medellín. En este caso se tienen 38 alternativas (microcuencas) evaluadas con 7 criterios a partir de información de campo y presentada en forma de mapas. Los criterios son: susceptibilidad de movimientos en masa, erosión en área, erosión en línea, conflicto por uso del suelo, estado de la red hídrica en los aspectos hidráulico, geológico y antrópico.

El método ELECTRE III, permite hacer la priorización de las zonas de retiro por microcuencas en el cual los valores de los umbrales de indiferencia, de aceptación, de veto y de credibilidad son importantes, así como los valores de ponderación de los criterios. Los resultados muestran que la zona norte de la cuenca es la más afectada, comuna 8, especialmente la quebrada La Castro. El análisis de sensibilidad muestra que la solución obtenida es robusta y que los criterios antrópicos y geológicos son los más importantes.

PALABRAS CLAVE:

Zonas de Retiro, Protección Contra Inundaciones, Análisis Multiobjetivo, Sistemas de Información Geográfica. Cuenca de la Quebrada Santa Elena

ABSTRACT

This paper shows a Multiobjective Analysis (AMO-ELECTRE III) with Geographical Information System (GIS) to establish priorities of buffer zones on the drainage network of the Santa Elena.

Creek, Medellín middle-east zone. 38 alternatives (small catchments) are evaluated with seven criteria, from field work, and maps. The criteria are: susceptibility to mass sliding, surface and lineal erosion, conflict by land use, and state of the waterways network in respect to hydrology, geology and human impact. The ELECTRE III method allows establishing priorities of buffer zones for each catchment; the indifference, acceptance, veto, and credibility threshold values, as well as those for criteria weighting factors are very important. The results show that the north zone of the catchment, commune 8, in particular La Castro creek, is most affected. The sensitivity analysis shows that the obtained solution is robust, and that the anthropic and geologic criteria are paramount.

KEY WORDS:

Buffer Zones, Flood Protection, Multiobjective Analysis, Santa Elena Creek Catchment, Geographic Information System.

1. Ingeniero Civil. Magister en Recursos Hidráulicos. Profesor Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. lfcavaj@unal.edu.co

2. Estudiante Escuela de Ingeniería Civil. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta una metodología para la priorización de zonas de retiro por microcuencas empleando Análisis Multiobjetivo (AMO) y Sistemas de Información Geográfica (SIG). La metodología es aplicada a las zonas de retiro de la cuenca de la quebrada Santa Elena, zona centro-oriental del municipio de Medellín. La priorización de zonas de retiro se hace por microcuencas, definidas como los afluentes principales a la quebrada Santa Elena (37) y el propio cauce. Para este caso se emplea como AMO el método ELECTRE III que permite incorporar en el proceso de toma de decisiones la estructura de preferencias del decisor. El AMO permite introducir en el análisis información subjetiva y cualitativa. Para la evaluación de las zonas de retiro, se consideran 7 criterios representativos de la problemática de la red de drenaje: conflicto por uso del suelo, procesos erosivos de área y en línea, susceptibilidad a los movimientos en masa y el estado de la red hídrica en los aspectos geológico, hidráulico y antrópico. La información para este trabajo proviene de la Geodatabase de la Secretaría del Medio Ambiente (SMA) y de la información levantada en campo en la cuenca; ambas actividades desarrolladas por la Universidad Nacional para la SMA (UNAL-SMA, 2005). Este trabajo también se apoya en los SIG para el manejo de la información y presentación de los resultados.

El AMO suministra metodologías, lineamientos y criterios que permiten por medio de una integración de las diferentes dimensiones de la realidad en un solo marco de análisis, un desarrollo integral de los recursos naturales (Smith et al, 2000; Munda, 1994; Goicoechea y otros, 1982). La evaluación del estado actual, y no el futuro, de los recursos naturales, permite realizar una clasificación del territorio según su grado de deterioro. Por lo tanto es posible hacer la valoración del estado del territorio en función de múltiples variables que pueden ser de carácter natural o producto de la acción del hombre. La necesidad de involucrar la componente geográfica en el proceso de decisión evidencia la importancia de herramientas que permitan la manipulación de información espacialmente referenciada.

En general se pueden identificar tres etapas en el proceso de decisión: la etapa de información, la etapa de diseño y la etapa de decisión. Estas tres etapas de decisión no necesariamente deben seguir una ruta lineal de estos tres componentes. La necesidad de los sistemas de apoyo a la toma de decisiones espaciales (MC-SDSS, Multicriteria Spatial Decision Support System) se deriva de situaciones donde es difícil para los decisores definir y articular completamente los objetivos dentro de un contexto espacial determinado. Densham (1991) describe las características que debe poseer el SDSS (ver Figura 1):

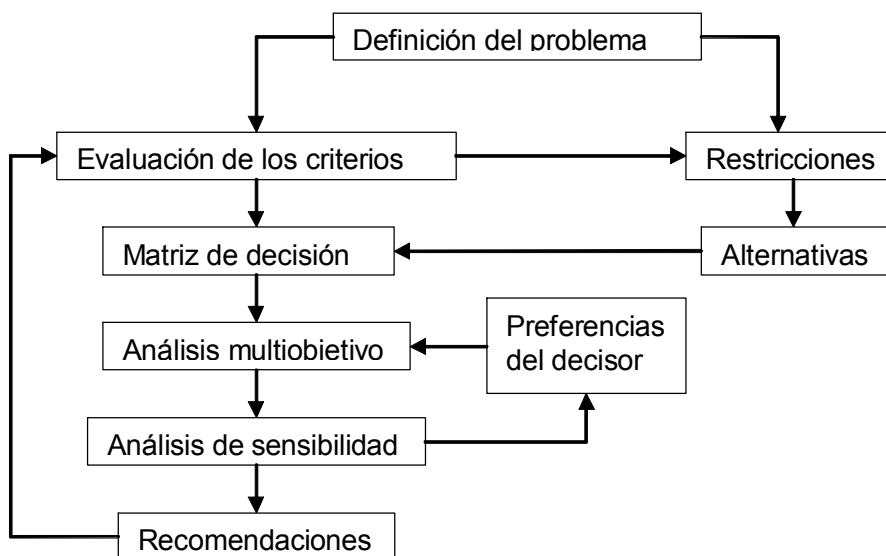


Figura 1.
Etapas del proceso de decisión.

Los SDSS se componen típicamente de tres sistemas: un sistema para el manejo de base de datos, uno para el modelamiento y procedimientos de análisis y otro para la presentación de los resultados. La eficiencia y calidad de los MC-SDSS dependerá en cada caso de las características de sus componentes principales dando lugar a un solo sistema o a sistemas separados (Nyerges, 1993). En el primer caso, las rutinas de AMO hacen parte integral de un sistema de información geográfica (software), lo que permite un análisis simultáneo. En el segundo caso se combina las capacidades de los SIG y MCDM por separado, a partir de la transferencia de la información de un SIG con una estructura apropiada para la aplicación del AMO.

Existen múltiples aplicaciones de Análisis Multiobjetivo y SIG (Botero 1994; Osorio y Pineda, 1999; Botero y otros, 2003; UNAL-SMA, 2004; Romero, 1993; Joerin y Musy, 2000; Rivera, 2001; Carvajal y otros, 2005; Jaramillo y Vinasco, 2005). Estas aplicaciones van desde la obtención de mapas temáticos y álgebra de mapas hasta la utilización de lógica difusa para la evaluación de proyectos lineales, priorización de puntos críticos, selección de alternativas y zonificación de cuencas urbanas.

2. METODOLOGÍA PARA LA PRIORIZACIÓN DE ZONAS DE RETIRO DE UNA RED HÍDRICA

A continuación se resumen las etapas necesarias que permitieron llevar a cabo la aplicación de la metodología de priorización:

- a. Definición del problema: priorización de zonas de retiro por microcuencas. Se definen 30 m a cada lado de los cauces que componen la red de drenaje de la cuenca.
- b. Definición y evaluación de criterios: conflicto por uso del suelo, procesos erosivos de área y en línea, susceptibilidad a los movimientos en masa, estado de la red hídrica en los aspectos geológico, hidráulico y antrópico. La evaluación de cada criterio se hizo en forma cualitativa
- c. Alternativas: se consideran en total 38 alternativas. Los afluentes de la quebrada Santa Elena y la propia corriente de la cuenca.
- d. Matriz de pagos: una matriz con 38 filas (microcuencas) y 7 columnas (criterios).
- e. Análisis Multiobjetivo: método ELECTRE III
- f. Análisis de sensibilidad: se dejan constantes todos los pesos de los criterios menos uno y se encuentra el rango de variación de la solución en cada caso.
- g. Conclusiones

A continuación se presenta en forma breve el método ELECTRE III (Smith et al, 2000). Para la aplicación del método se requiere definir una serie de parámetros y matrices de la siguiente forma:

- ❖ Umbral difuso de preferencia y umbral difuso de indiferencia

A partir de la comparación entre dos alternativas es posible establecer un modelo de preferencia, según la evaluación (calificación, a_{ij}) de un criterio dado. Se define un valor q llamado Umbral difuso de indiferencia que representa el mínimo valor para el cual la diferencia entre la evaluación de dos alternativas es importante. Además, puede ocurrir que exista una zona en la cual la preferencia de una alternativa sobre la otra puede clasificarse como “débil” (q). Por esta razón se ha introducido el concepto de “Umbral difuso de preferencia”, p , que representa la diferencia mínima entre la evaluación de dos alternativas para la cual la preferencia de una alternativa sobre otra puede clasificarse como “fuerte”. De esta manera las relaciones de preferencia quedan de la siguiente forma:

iPj: La alternativa i es preferida fuertemente a la alternativa j si $Z(i) > Z(j)$

iQj: La alternativa i es preferida débilmente a la alternativa $q < Z(i) - Z(j) \leq p$



ij: La alternativa i es indiferente a la alternativa j si $|Z(i) - Z(j)| \leq q$

❖ Matriz de concordancia

Si definimos la relación entre alternativas iSj según la premisa “i es al menos tan preferida como j”, definimos la concordancia entre las alternativas como el grado en el cual se cumple esta premisa.

$$C_k(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si } Z(j) - Z(i) \leq q \\ 0 & \text{si } Z(j) - Z(i) \geq p \\ \frac{p + Z(i) - Z(j)}{p - q} & \text{en otro caso} \end{cases} \quad K = 1, \dots, n. \quad (1)$$

Teniendo en cuenta la expresión anterior es posible calcular un valor de concordancia entre alternativas (m) según un criterio (n) a la vez, obteniéndose n matrices cuadradas y cada una de orden m x m. A partir de las n matrices obtenidas, se calcula una matriz de concordancia “total”, C, con la siguiente expresión:

$$C(i, j) = \frac{1}{\sum_{k=1}^n w_k} \sum_{k=1}^n w_k C_k(i, j) \quad (2)$$

Siendo w_k y $C_k(i, j)$ el peso de ponderación y la matriz de concordancia del criterio k, respectivamente. El peso de ponderación de cada criterio expresa su importancia relativa respecto a los demás criterios, y se constituye en el primer parámetro subjetivo que involucra el método. La gráfica de la Figura 2 muestra la función de concordancia para el criterio i.

❖ Matriz de discordancia

La discordancia entre dos alternativas muestra el grado en que la premisa iSj no se cumple. Si definimos el valor v como el valor de la diferencia entre la evaluación de alternativas para el cual es posible refutar totalmente la afirmación “i es al menos tan preferida como j”, la expresión a partir de la cual es posible calcular la discordancia entre alternativas para cada criterio, es:

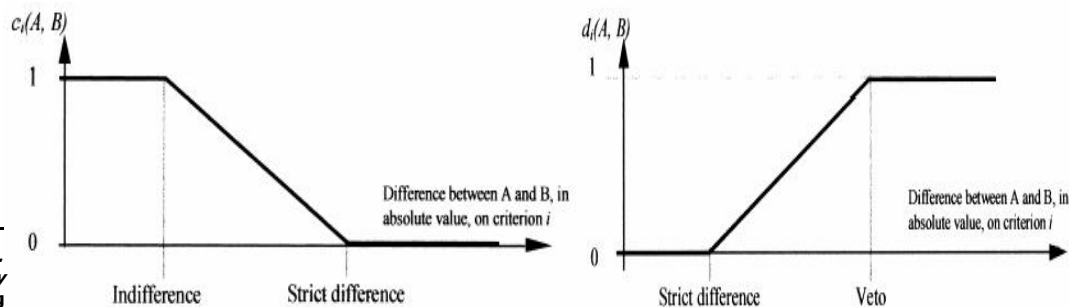


Figura 2. Funciones de concordancia y discordancia, tomado de Joering y Musy, 2000.

$$P_k(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{si } Z(j) - Z(i) \leq p \\ 1 & \text{si } Z(j) - Z(i) \geq v \\ \frac{Z(j) - Z(i) - p}{v - p} & \text{en otro caso} \end{cases} \quad k = 1, \dots, n. \quad (3)$$

El valor v se denomina "Umbral difuso de veto". La gráfica de la Figura 2 muestra la función de discordancia para el criterio i .

A pesar de que los límites de indiferencia y preferencia son en realidad muy difíciles de valorar, cualquiera que sean los valores que se les asigne, suelen ser más realistas que asumirlos como cero. Aunque estos parámetros se asumen constantes durante el ejercicio de priorización, es posible asumirlos como funciones que dependen del valor del criterio, es decir, si el rango de variación de la evaluación de un criterio es grande, pueden asumirse unos valores de los parámetros también grandes.



❖ Matriz de credibilidad

Para realizar una clasificación de las alternativas, es necesario hacer una integración de los cálculos realizados hasta el momento. Se debe realizar una comparación entre la matriz de credibilidad C (agregación de las C_k), y cada una de las matrices de discordancia calculadas en el paso anterior. Para el caso en el cual la concordancia entre alternativas, según un criterio dado, sea mayor que la discordancia, no se debe hacer modificación del valor de la concordancia en la matriz C . En caso contrario, es necesario afectar este valor por un factor.

Si definimos $K(i, j)$ al conjunto de criterios en los cuales se cumple que $d_k(i, j) > C_k(i, j)$, la matriz de credibilidad queda definida como:

$$e(i, j) = \begin{cases} C(i, j) & \text{si } K \text{ es vacío} \\ C(i, j) \prod_{k \in K(i, j)} \frac{1 - d_k(i, j)}{1 - c(i, j)} & \text{si } K \text{ no es vacío} \end{cases} \quad (4)$$

La clasificación de las alternativas se realiza teniendo en cuenta que los valores de la matriz de credibilidad sean mayores que un valor de credibilidad mínimo λ definido por el decisor. De esta manera se obtiene una matriz T como sigue:

$$t(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si } e(i, j) > \lambda \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5)$$

Así, la calificación de una alternativa i corresponde a la suma de los términos de la fila i menos la suma de los términos de la columna i en la matriz T , es decir, el número de alternativas dominadas por i menos el número de alternativas que la dominan. El proceso de clasificación comienza, asignando a las alternativas con una mayor calificación, la clasificación de uno. El proceso se repite, después de haber eliminado la fila y la columna correspondientes a las alternativas ya clasificadas. Así, por ejemplo, después de haber eliminado dichos valores, la clasificación dos será asignada a las alternativas con mayor calificación.

3. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA SANTA ELENA E INFORMACIÓN UTILIZADA

La cuenca de la quebrada Santa Elena está localizada en la zona centro-oriental de Medellín. Esta cuenca limita al norte con las cuencas El Ahorcado y El Molino de la zona Nororiental y con la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, que también sirve de límite al oriente. Al sur, limita con el municipio de El Retiro y las cuencas de las quebradas La Presidenta y La Poblada de la zona Suroriental. El área total de la cuenca es de 45.61 Km², con una longitud de cauce principal de 14.53 Km. La quebrada nace en el cerro Espíritu Santo en la cota 2720, recorriendo tramos rurales y urbanos y desemboca al río Medellín en la cota 1453. El área urbana la conforman las comunas Villa Hermosa (08), Buenos Aires (09) y La Candelaria (10). La cuenca de la quebrada Santa Elena se subdivide en 19 microcuencas en la vertiente norte y 18 en la vertiente sur; se destacan por su longitud La Espadera y La Castro con un cauce de más de 4 km, el doble del promedio que se encuentra alrededor de 2 Km. Sólo 14 quebradas nacen en una cota por debajo de los 2000 msnm. La Figura 3 muestra la ubicación de la cuenca dentro del Valle de Aburrá.



Figura 3.
Cuenca de la quebrada Santa Elena respecto en el Valle de Aburrá

La distribución espacial de la microcuenca se muestra en la Figura 4 y las microcuencas que se consideran en el estudio se presentan en la Tabla 1. A partir de recorridos a lo largo de toda la red de drenaje, y de una evaluación del estado de la cuenca, se generaron los siguientes mapas:

- Susceptibilidad a los movimientos en masa (Z_1)
- Conflicto por uso del suelo (Z_2)
- Procesos erosivos área (Z_3)
- Procesos erosivos línea. (Z_4)
- Estado de la red hídrica: criterio antrópico. (Z_5)
- Estado de la red hídrica: criterio geológico. (Z_6)
- Estado de la red hídrica: criterio hidráulico (Z_7)

Microcuenca	Nombre	Area (Km ²)	Microcuenca	Nombre	Area (Km ²)
1	La Castro	4,20	20	El Chupadero	0,93
2	La Loca	2,37	21	Sin nombre	0,05
3	Chorro Hondo	1,13	22	Los Cauces	0,34
4	La Aguadita	0,81	23	La Seca	0,20
5	El Dato	3,46	24	La Salada	0,13
6	Pativilca	0,29	25	Media Agua	0,58
7	La Planta	0,39	26	La Espadera	4,59
8	La Gallinaza	0,75	27	Bonanza	0,77
9	La Cangreja	1,21	28	La Aguada	1,12
10	La Mica	0,51	29	Sin nombre	0,33
11	El Chiquero	0,74	30	Sin nombre	0,42
12	La India	0,75	31	Sin nombre	0,25
13	La Borrachera	0,60	32	Sin nombre	1,11
14	El Vergel	0,22	33	Sin nombre	2,08
15	Sin nombre	0,19	34	Sin nombre	0,50
16	Santa Bárbara	1,73	35	Sin nombre	0,72
17	Chirimolla	0,11	36	Sin nombre	0,13
18	La Pastora	1,38	37	La Palencia	1,33
19	El Aserradero	0,16	38	La Milagrosa	0,27

Tabla 1.
Microcuencas de la quebrada Santa Elena.

Cada uno de estos mapas corresponde a un criterio que se considera en la aplicación del AMO. Su evaluación se realizó utilizando una escala cualitativa. Cada alternativa, es decir cada microcuenca, tiene una calificación según una agregación de los aspectos evaluados. La presente aplicación del AMO tiene por objetivo priorizar las zonas de retiro de las quebradas. Esta zona corresponde a una franja de 30 m a cada lado de las corrientes que conforman la red de drenaje, valor que se establece como límite para la evaluación de los indicadores en recorridos de campo.

Las Figuras 5 y 6 muestran la susceptibilidad al movimiento en masa y el conflicto por uso del suelo. Para el mapa de susceptibilidad se ponderó por el área calificada y se normalizó sobre el área total de la cuenca, obteniéndose tres grados de susceptibilidad. Para el caso de conflicto por uso del suelo, se considera 0 si no existe y 1 si existe, sin tener en cuenta el tipo de conflicto. El proceso erosivo por área se muestra en la Figura 7, en el cual se considera, grado de actividad, volumen y grado de erosión en una escala de 1, 2 y 3. Para el caso de proceso erosivo línea, se consideraron los mismos criterios que en el caso de erosión por área y se ponderó por la longitud del proceso (ver Figura 8). Para la evaluación de la red hídrica se emplearon los indicadores de la Tabla 2. La calificación asignada es: 0 si no hay problema o es leve, 1 si el problema existe pero no requiere atención inmediata y 2 si el problema existe y requiere atención inmediata. Cada uno de los indicadores representa el estado de un tramo de la red según un problema específico.



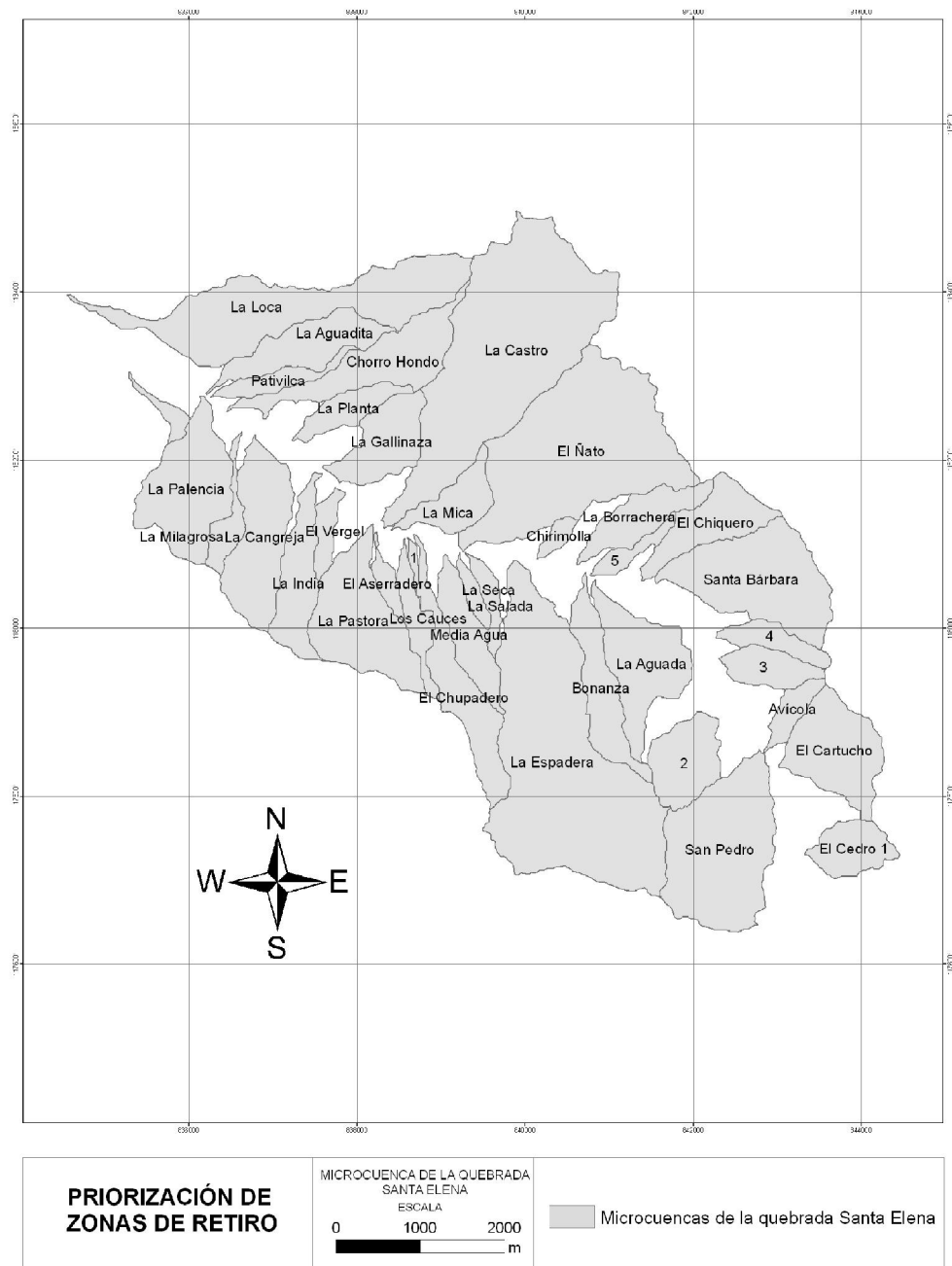


Figura 4.
Mapa de la cuenca de la
quebrada Santa Elena

Para la calificación de cada uno de los criterios se realizaron recorridos de campo a lo largo de la red de drenaje de la cuenca. Las comisiones estaban compuestas por profesionales en el área de la geología y de la hidráulica, en donde, a partir de las escalas definidas en la evaluación, se realizó la recolección de la información necesaria.

INDICADORES.		
Geológicos. Inestabilidad Geológica.	Hidráulicos. Represamiento de la estructura hidráulica.	Antropicos. Acumulación de basuras en el cauce.
Afloramiento de aguas naturales.	Incapacidad de la estructura hidráulica.	Acumulación de escombros en el cauce.
Filtración de aguas.	Socavación de la estructura hidráulica.	Contaminación por descarga de material particulado al cauce.
Hundimiento del terreno por aguas subterráneas.	Colmatación de la estructura hidráulica.	Ocupación de la zona de retiro.
	Fallas en la estructura hidráulica.	Contaminación hídrica por descarga de aguas residuales.
	Cobertura obstruida por rocas.	Presencia de banquetes o excavaciones inadecuadas.

Tabla 2.
Indicadores para evaluación del estado de la red hídrica.

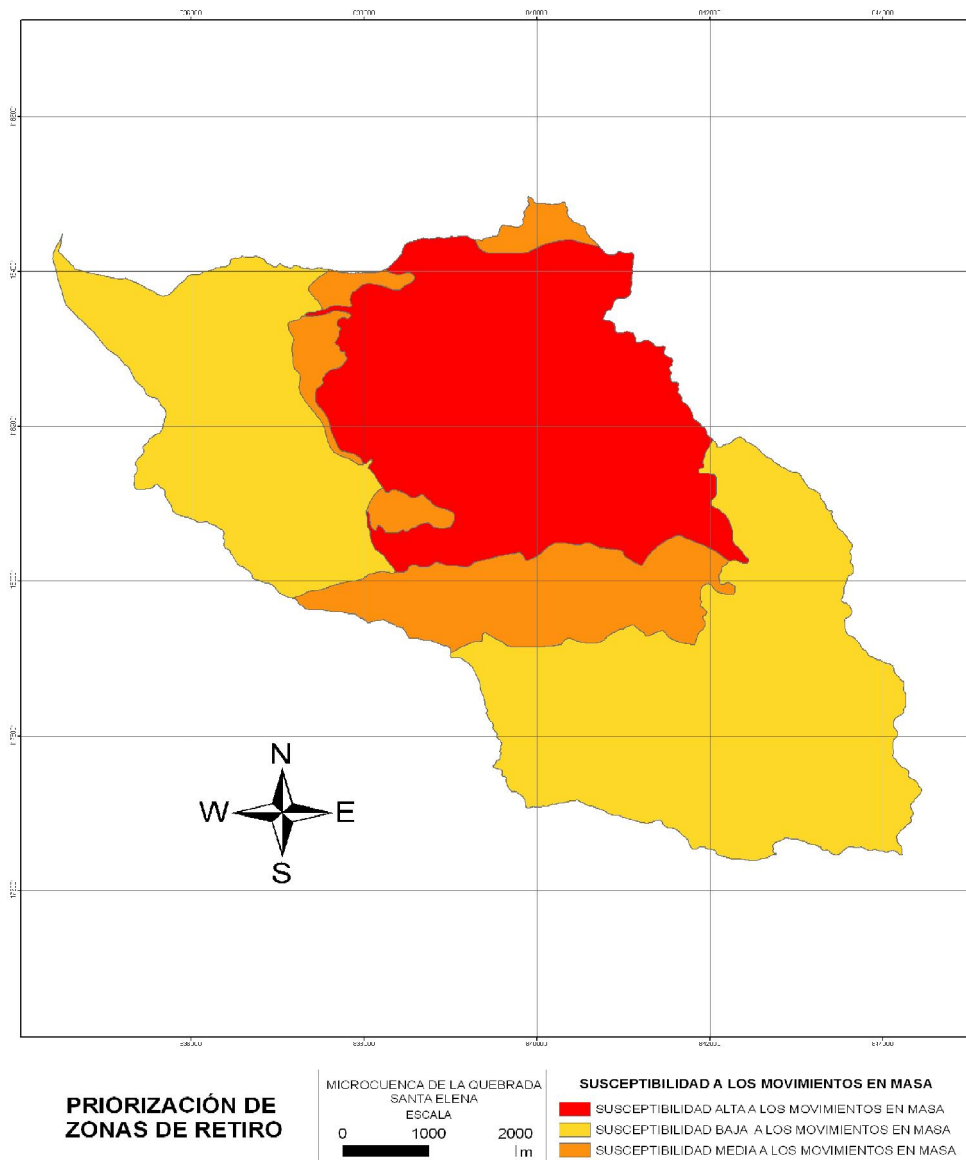


Figura 5.
Susceptibilidad a los movimientos en masa de la cuenca de la quebrada Santa Elena.

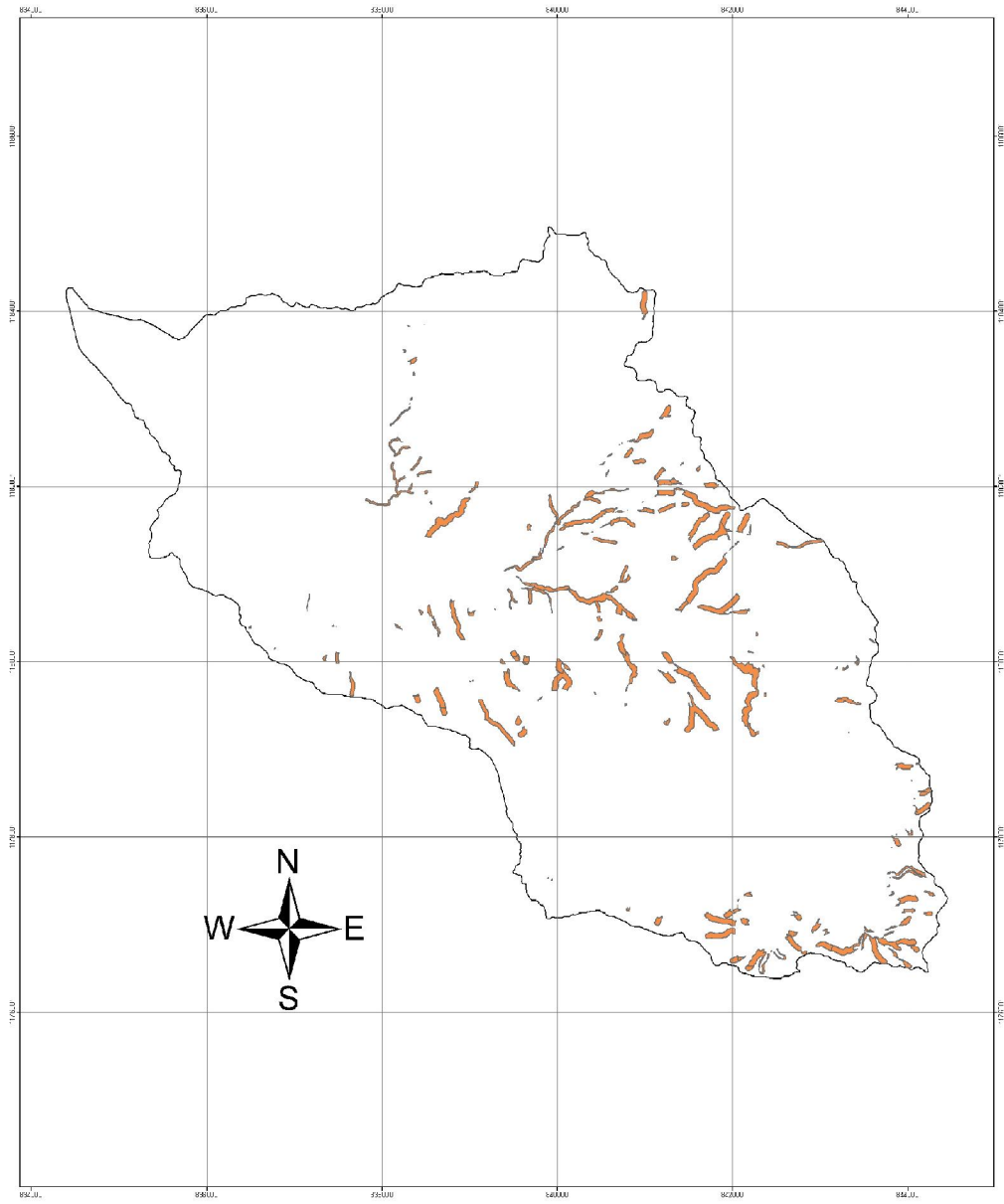
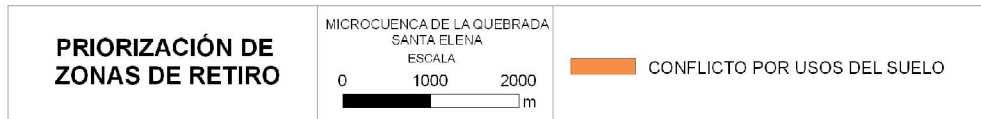


Figura 6.
Conflicto por uso del suelo de la cuenca de la quebrada Santa Elena.



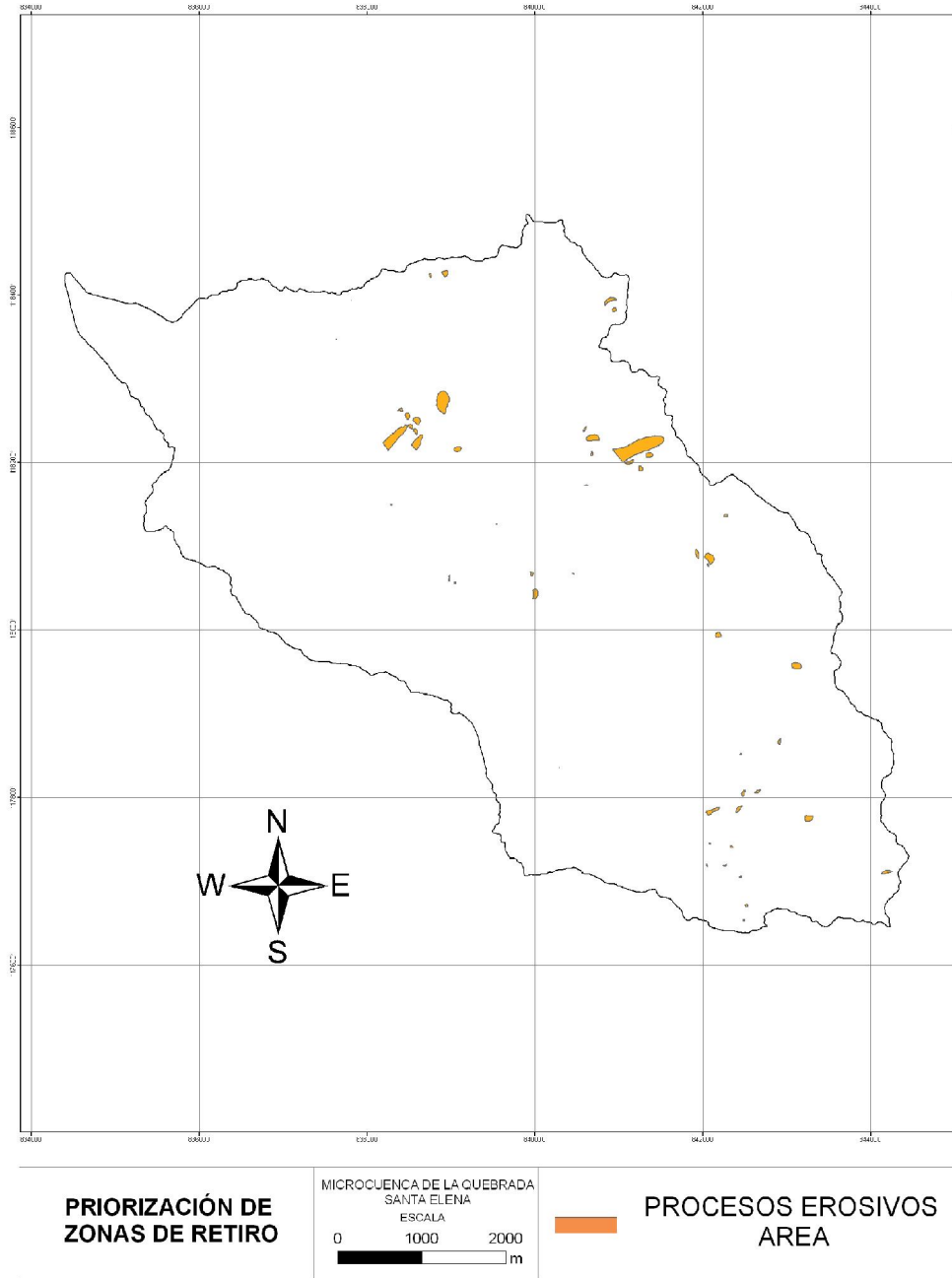


Figura 7.
Procesos erosivos área en la cuenca de la quebrada Santa Elena

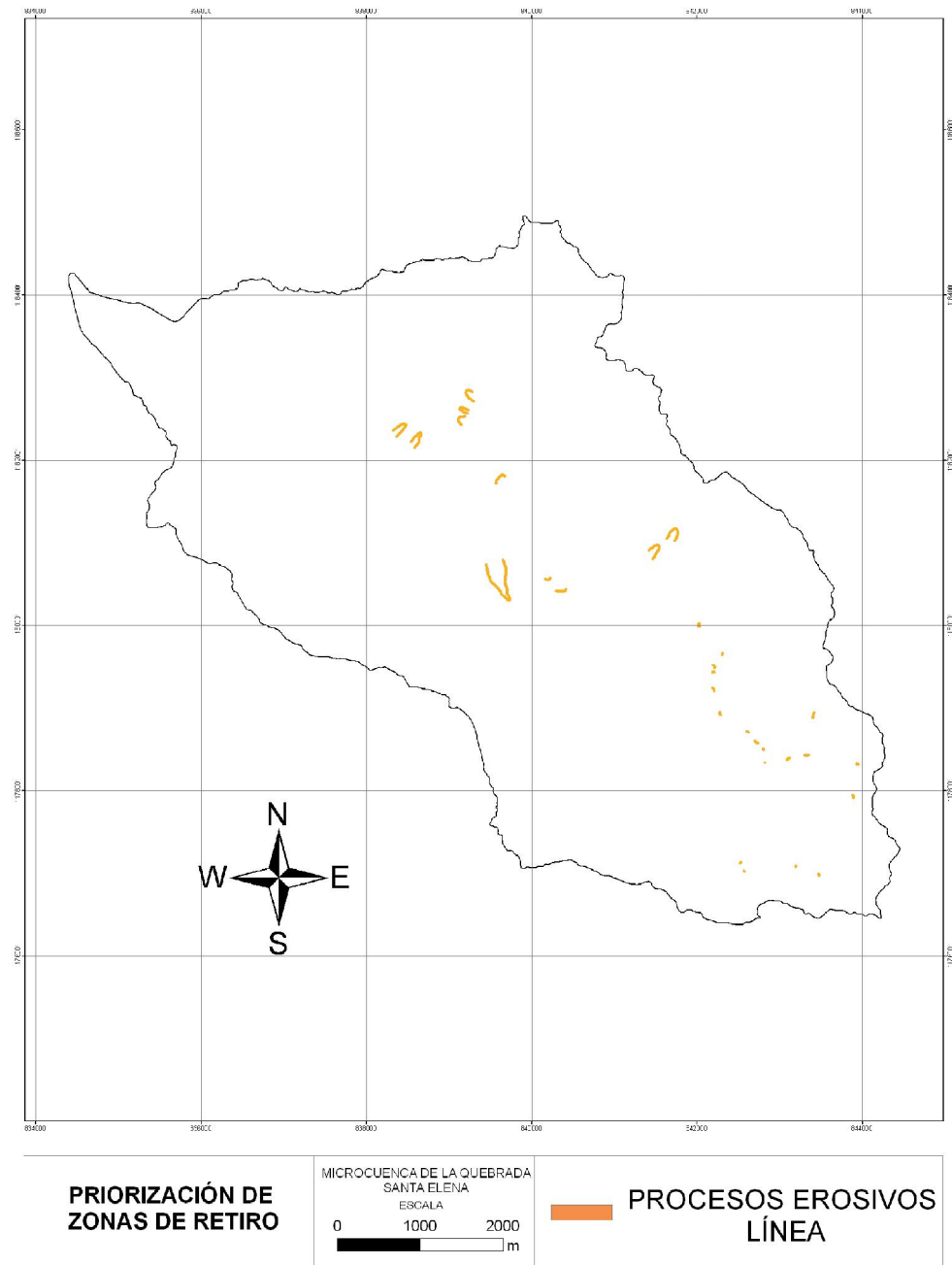


Figura 8.
Procesos erosivos línea en la cuenca de la quebrada Santa Elena

4. APLICACIÓN DEL MÉTODO ELECTRE III A LA PRIORIZACIÓN DE ZONAS DE RETIRO POR MICROCUENCAS

Una vez definidos y evaluados los criterios Z_i , $i = 1, \dots, 7$, empleados para la aplicación de la metodología se determina la matriz de pagos (ver Tabla 3).

Alternativas	Criterios						
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
1	1.00	25.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.00	3.79	0.00	656.66	0.00	0.00	0.00
3	1.00	4.36	0.00	175.12	0.00	0.00	0.00
4	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	1.00	0.00	19.69	0.00	2.00	2.00	0.00
6	1.00	1.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	1.00	1.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	2.10	36.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	2.15	43.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	1.63	13.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	2.32	4.83	28.40	0.00	0.00	0.00	0.00
12	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	2.34	19.69	1.09	0.00	8.00	0.00	0.00
14	2.95	0.08	0.00	0.00	6.00	0.00	0.00
15	2.66	14.20	0.00	3049.85	9.00	0.00	0.00
16	2.48	8.64	0.00	0.00	6.00	0.00	0.00
17	2.16	26.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	2.42	1.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	3.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	1.89	16.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	3.00	0.00	0.00	0.00	24.00	0.00	0.00
22	2.17	49.11	3.87	173.77	0.00	0.00	0.00
23	3.00	8.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	1.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	1.00	0.62	0.00	0.00	5.00	0.00	0.00
26	2.98	20.04	0.00	0.00	42.00	0.00	0.00
27	1.00	0.06	0.00	0.00	7.00	0.00	0.00
28	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.00
29	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.00
30	3.00	24.61	3.34	0.00	2.00	0.00	0.00
31	2.68	5.09	0.00	0.00	50.00	0.00	0.00
32	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	16.00
33	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
34	1.83	0.46	0.00	0.00	18.00	0.00	8.00
35	2.28	1.65	0.00	0.00	16.00	0.00	0.00
36	3.00	20.56	7.20	0.00	30.00	0.00	4.00
37	1.52	0.05	0.01	0.00	7.00	0.00	2.00
38	1.64	14.87	1.03	1717.25	55.00	6.00	12.00

Tabla 3.
Matriz de pagos para la cuenca de la quebrada Santa Elena



Para la valoración de los aspectos geológico, hidráulico y antrópico, un grupo de expertos reunidos en un taller técnico y conocedores de la problemática de la cuenca presentaron los siguientes valores: 0.24 para el geológico, 0,32 para el hidráulico y 0.44 para el antrópico.

El método ELECTRE III requiere una serie de parámetros presentados en el numeral 2. Estos son: porcentaje del rango de variación del umbral de indiferencia con un 10 %, preferencia con 20% y de veto con 40%. Los valores de éstos para cada criterio se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.
Parámetros para la aplicación del método ELECTRE III

	Criterios						
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
w	60.00	100.00	60.00	60.00	100.00	60.00	70.00
q	0.25	5.00	3.00	305.00	5.50	0.60	1.60
p	0.50	10.00	6.00	610.00	11.00	1.20	3.20
v	1.00	20.00	12.00	1220.00	22.00	2.40	6.40

Teniendo en cuenta un valor de credibilidad mínimo, λ , de 0.4, se calcula la matriz T, que contiene, para cada alternativa i, el número de alternativas a las que domina al igual que el número de alternativas a las que sobreclasifica. A partir de esta matriz, se realiza la priorización de las alternativas. La priorización obtenida presenta un gran número de "empates", ésto debido a que la calificación de las alternativas definida para la priorización (suma fila i – suma columna i), toma en muchos casos el mismo valor para varias alternativas simultáneamente. Por esta razón, se redefinirá la matriz T como sigue:

$$t(i, j) = \begin{cases} e(i, j) & \text{si } e(i, j) > \lambda \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (6)$$

De esta manera el número de empates se reduce notablemente y la clasificación cubre un mayor número de alternativas. El cambio propuesto se puede entender como una ponderación de la calificación de la alternativa en la priorización (suma fila i – suma columna i) con la credibilidad asociada. La priorización se presenta en la Tabla 5, donde se incluye el nombre de cada microcuenca. Los resultados de la anterior priorización se presentan en el mapa de la Figura 9, en donde las microcuencas simbolizadas con un color más oscuro corresponden a las más "críticas".

Tabla 5.
Priorización "alternativa" de microcuencas.

Alternativa	Posición	Microcuenca	Alternativa	Posición	Microcuenca
1	23	Sin Nombre	20	26	La Pastora
2	30	Sin Nombre	21	13	El Sapero
3	32	Sin Nombre	22	4	El Chiquero
4	32	Sin Nombre	23	14	La Borrachera
5	21	Sin Nombre	24	32	El Vergel
6	32	Sin Nombre	25	32	La India
7	32	Sin Nombre	26	2	La Gallinaza
8	9	La Aguada	27	31	La Cangreja
9	5	Bonanza	28	20	La Milagrosa
10	27	Santa Barbara	29	29	Zanjon Bogota
11	8	La Espadera	30	10	El Dato
12	18	Sin Nombre	31	6	La Planta
13	12	Media Agua	32	19	Pativilca
14	16	La Salada	33	32	La Palencia
15	3	La Seca	34	15	La Aguadita
16	22	Los Cauces	35	24	Chorro Hondo
17	11	El Chupadero	36	1	La Castro
18	25	El Aserradero	37	28	La Loca
19	17	Chirimolla	38	7	Santa Elena

El análisis de sensibilidad se realizó sobre el valor de los pesos de ponderación de los criterios. El método a emplear consiste en fijar todos los valores de los pesos de ponderación menos uno (sobre el que se realizará el análisis). El valor de este peso se varía de tal manera que sea posible conocer los límites, por encima y por debajo del valor original, entre los cuales la solución no cambia. De esta manera se puede conocer que tan robusta es la solución respecto a cada criterio. Los resultados del análisis de sensibilidad se presentan en la Tabla 6.

Criterio	Peso	Variación (+)	% (+)	Variación (-)	% (-)
Suscept. mov masa	60	66.5	10.83	58.1	3.17
Conflicto uso suelo	100	101.1	1.10	85.6	14.40
Erosión área	60	215.4	259.00	55.2	8.00
Erosión línea	60	73	21.67	54.6	9.00
Antrópico	100	139.1	39.10	94.6	5.40
Geológico	60	229.1	281.83	39.9	33.50
Hidráulico	70	126	80.00	64.6	7.71

Tabla 6.
Análisis de sensibilidad sobre los pesos de ponderación.

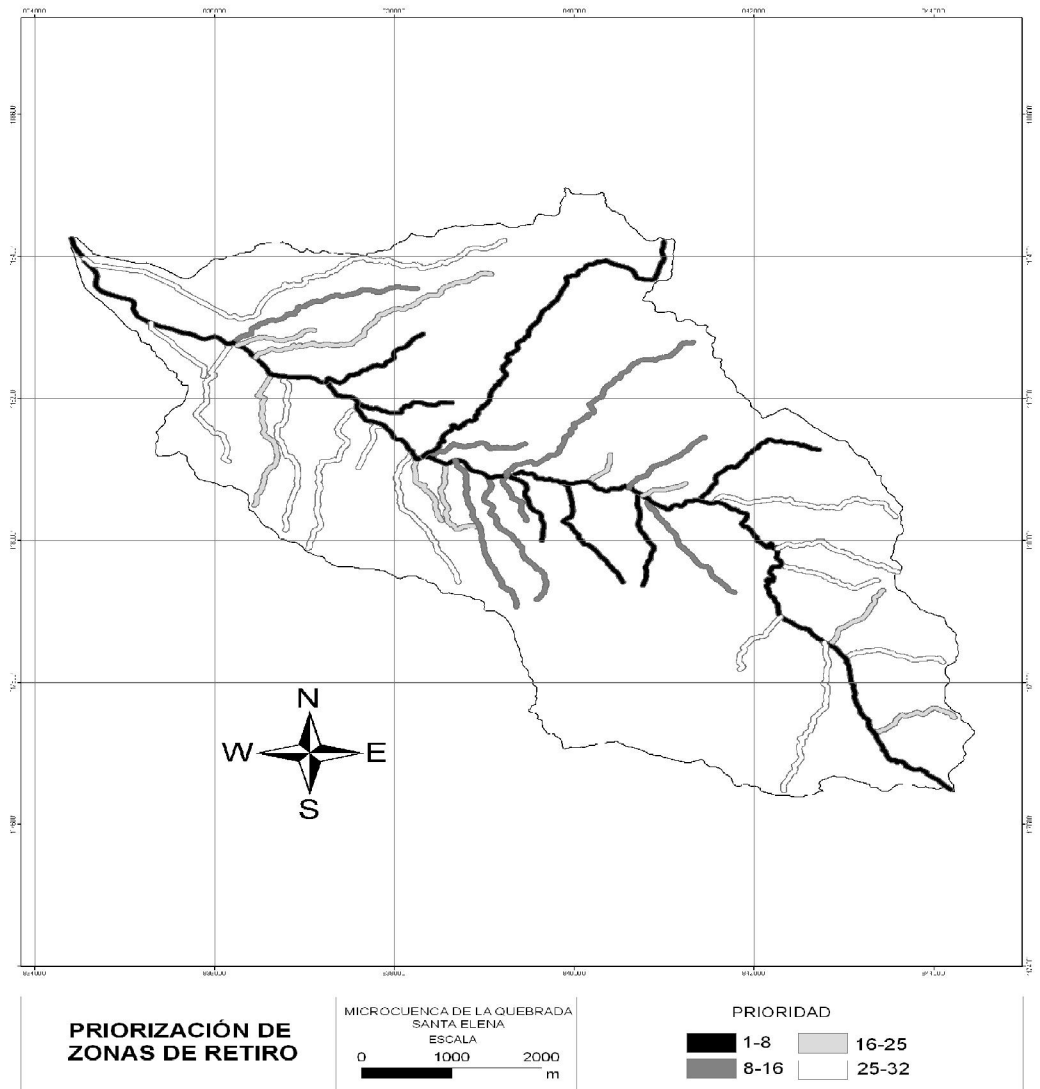
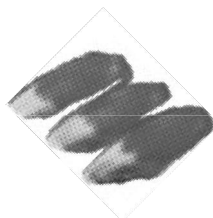


Figura 9.
Priorización de zonas de retiro por microcuencas para la cuenca de la quebrada Santa Elena.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de revisar la información a partir de la cual se realizó el ejercicio de priorización, se puede observar claramente que, sobre las zonas de retiro, excluyendo el criterio de “Susceptibilidad a los movimientos en masa” que fue evaluado sobre toda el área de la cuenca, los criterios más influyentes son los de origen antrópico. El mapa de “conflicto por usos del suelo” muestra claramente que el desarrollo de problemáticas de esta índole se concentra principalmente a lo largo de las zonas de retiro de las quebradas, y en un mayor porcentaje en las zonas urbanas, en donde evidentemente, la acción antrópica es mucho más importante. El estudio, ya citado, realizado en la cuenca de la quebrada Santa Elena, por la *Universidad Nacional (2005)*, confirma en su aparte de “Puntos críticos”, que las problemáticas de tipo antrópico son las de más alta prioridad en toda la cuenca, en este caso la invasión de las zonas de retiro, contaminación de las quebradas, etc, son características que reflejan la situación de una cuenca fuertemente antropizada.



Se debe tener presente en el Método ELECTRE III que los valores de los umbrales de preferencia, indiferencia y veto, son apenas aproximaciones a la “realidad”, es decir, son producto exclusivamente del concepto subjetivo del decisor. Su valoración presenta alguna dificultad debido a que la escala de evaluación es cualitativa y es difícil considerar órdenes de magnitud que sirvan de referencia para la asignación de los valores. Sin embargo, dicha información en la aplicación del método proporciona resultados más acordes con la realidad en proceso de decisión.

El análisis de sensibilidad del Método ELECTRE III, Tabla 6, muestra que los pesos de ponderación admiten variaciones altas, es decir, el método no es significativamente sensible al valor o cambios en el valor de este parámetro subjetivo, ya que ante pequeños cambios realizados en el análisis, la priorización inicial no cambia. Esto se debe, en alguna medida, a que el método depende, a parte de los pesos de ponderación, de una gran cantidad de parámetros subjetivos que controlan el proceso de decisión (umbrales de indiferencia, preferencia y veto). La amplitud de los intervalos de variación para cada criterio presenta que los valores más grandes corresponden a los criterios “Estado de la red hídrica” según los aspectos geológico, hidráulico, antrópico y procesos erosivos área. El caso contrario ocurre con los criterios “Susceptibilidad a los movimientos en masa” y “conflicto por uso del suelo”. En el primer caso, la sensibilidad es mayor debido a que la evaluación de este criterio tiene afectación sobre toda la cuenca. En el segundo, podemos observar que los conflictos por uso del suelo se presentan en gran parte a lo largo de las zonas de retiro de las quebradas, razón por la cual su influencia dentro del proceso de priorización es mayor. Los resultados de la sensibilidad muestran que la componente geológica es importante en la priorización de las zonas de retiro y que en general la problemática de este tipo está muy localizada.

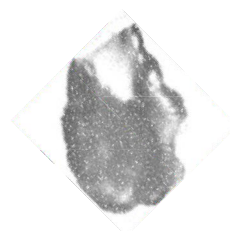
Según el criterio de “Susceptibilidad a los movimientos en masa”, la cuenca de la quebrada Santa Elena está dividida claramente en tres sectores. Dos de ellos, el altiplano y la parte baja de la cuenca, con una susceptibilidad baja, y el escarpe de la cuenca, con un porcentaje del área mayor dentro de la calificación alta de susceptibilidad, y un menor porcentaje del área dentro de la clasificación media. Según la Figura 9, en donde se puede observar el resultado final de la priorización, las zonas de retiro de prioridad más alta están asociadas en su mayoría a la zona del escarpe, situación que refleja la importancia del criterio geológico en la priorización. Además, la sensibilidad de la solución ante variaciones del peso de ponderación del criterio “Susceptibilidad a los movimientos en masa”, puede asumirse como un indicador de la influencia de dicho criterio en la solución final. Los problemas asociados a procesos erosivos en la cuenca, debido a que son aislados, tienen un peso relativo menor, en cuanto a importancia e influencia en el resultado de la priorización. Hay que recordar que la zona de la parte media de la cuenca ha presentado eventos geológicos importantes como los deslizamientos de Media Luna y Villa Tina y el proceso de reptación de la carretera a Santa Elena en el K10+700 m.

Los resultados de la priorización muestran que las corrientes La Castro, La Seca, La Gallinaza y la quebrada Santa Elena están dentro de la categoría de priorización alta. Estas microcuencas presentan una problemática en la cual todos los criterios tienen alguna participación pero especialmente los criterios más importantes son el conflicto por uso del suelo, los procesos erosivos línea y el criterio antrópico.

6. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del estudio son:

- ❖ El proceso de decisión (priorización), según la metodología de AMO, debe mostrar la importancia relativa de los diferentes criterios a través de los aspectos geológico, hidráulico y antrópico. Como resultado del taller técnico, se obtiene un peso de ponderación mayor para el criterio antrópico, además que la mayor sensibilidad de la solución según este criterio es un indicio de su importancia relativa respecto a los demás evaluadores del estado de la cuenca.
- ❖ En un segundo lugar se encuentra el criterio de orden geológico. Es de anotar que aunque es un criterio que podríamos denominar de “segunda prioridad”, las problemáticas asociadas a éste pueden ser desencadenantes de problemas de magnitud considerable, teniendo en cuenta la influencia de la acción del hombre sobre el estado de la cuenca.
- ❖ En el aspecto hidráulico, debido a que se tienen problemáticas muy aisladas, la sensibilidad de la solución según este criterio es poco importante, como lo refleja el intervalo de variación de su peso de ponderación correspondiente. Sin embargo, vale aclarar, como se hizo con el criterio geológico, que ésto no significa que las problemáticas de orden hidráulico no requieran atención, ya que, aunque aisladas, dadas las circunstancias pueden ser causa de problemas mayores en los cauces de las quebradas.
- ❖ Se hizo énfasis a lo largo de este trabajo de las dificultades que implica la utilización de parámetros subjetivos en la aplicación del AMO. Es importante tener en cuenta que la definición de dichos parámetros puede llegar a ser muy importante en la sensibilidad de las soluciones e incluso puede cambiar el curso del proceso de decisión, al igual que introducir sesgo en los resultados finales. Existen metodologías de AMO que no tienen en cuenta las preferencias del decisor y a partir de las cuales es posible la toma de decisiones. Aunque parece útil eliminar la componente subjetiva en el proceso de decisión, ésta debe ser mirada no como un obstáculo, sino como una herramienta, cuyo uso cuidadoso se traduce en resultados mucho más ajustados a la realidad y a las particularidades del proceso de decisión. Sin embargo, no debe olvidarse que la articulación de las preferencias del decisor corresponde sólo a una aproximación, y que por tal razón, un análisis de sensibilidad aportará información valiosa para la toma de decisiones.
- ❖ Aunque los métodos de AMO fueron desarrollados para abordar problemas cuyo fin es la selección de una alternativa entre un conjunto de acciones posibles, el presente trabajo muestra las bondades de estos métodos en la priorización de acciones, en este caso, correctivas, sobre el territorio.
- ❖ Es indudable el papel que tienen los SIG en el manejo y presentación de la información a nivel espacial, siendo una herramienta muy importante en el proceso de toma de decisiones.
- ❖ Las técnicas de análisis multiobjetivo se constituyen en una herramienta muy útil en la gestión y ordenamiento de la cuenca en cuanto a la posibilidad de identificar problemáticas que requieren intervención. El establecimiento de prioridades en la definición y manejo de los problemas, sustenta y apoya la definición de prioridades en la utilización de los recursos.



7. BIBLIOGRAFÍA

- Botero, V.; Smith, R. y Patiño, J. E., 2003. Zonificación del uso de microcuencas urbanas como base para el ordenamiento territorial. *Revista Avances en Recursos Hidráulicos*. Universidad Nacional, Septiembre, No 10, pp 33-46.
- Botero, A. 1994. Planificación de cuencas usando análisis multiobjetivo y sistemas de información geográficos. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín

- Carvajal, L. F. y otros, 2005. Priorización de puntos críticos y de microcuencas con análisis multiobjetivo en la red hídrica de la cuenca de la quebrada Santa Elena, *Revista Gestión y Ambiente*, Universidad Nacional, Diciembre, Vol. 8, No. 2, pp 71-84.
- Desham, P.J., 1991. *Spatial decision support systems*. Ed. Wiley, New York. pp 403-412.
- Goicoechea, A.; Hansen, D. y Duckstein, I., 1982. *Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business applications*. Editorial John Wiley and Sons.
- Jaramillo, P. y Vinasco L., 2005. Análisis multiobjetivo difuso espacial: Una herramienta para localizar proyectos lineales con un enfoque de gestión ambiental. *Revista Gestión y Ambiente*, Universidad Nacional, Vol 8, No 1, pp 19-34.
- Joerin, F. y Musy, A., 2000. Land Management with gis and multicriteria analysis. *Internacional Transactions in Operational Research*. Pp 67 – 78.
- Munda, G. y otros, 1994. Qualitative Multicriteria Evaluation for Environmental Management, *Ecological Economics* 10 (2), pp. 97 -112
- Nyerges, T. L., 1993. ¿How do people use geographical information systems?, in D. Medyckyj-Scott and H. Hearnshaw (Eds.), *Human factors in geographical information systems*, London: Belhaven Press, pp 37-50-.
- Osorio. L. y Pineda, M., 1999. Indicadores para la gestión ambiental en cuencas hidrográficas. Estudio de caso: Cuenca la Quebrada Chachafruto Municipio Rionegro-Antioquia.
- Rivera, H., 2001. Aplicación de la evaluación multicriterio para la asignación de funciones al territorio de la reserva nacional Valdivia. Proyecto Manejo sustentable del bosque nativo. (CONAF/CTZ). Artículo Internet.
- Romero, C., 1993, *Teoría de la decisión multicriterio: Conceptos, técnicas y aplicaciones*. Alianza Universidad Textos.
- Smith, R. y otros, 2000. Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre. Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional Sede Medellín, 2 Ed., 354 P.
- UNAL-Secretaría del Medio Ambiente, 2005. Actualización de la red hídrica de la cuenca de la Quebrada Santa Elena, zona centro-oriente de Medellín. Universidad Nacional de Colombia, varios volúmenes.
- UNAL-Secretaría del Medio Ambiente, 2004. Metodología para la formulación de planes integrales de ordenamiento y manejo de microcuencas PIOM, cuenca de la quebrada La Iguaná. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, varios volúmenes.

