

Análisis multiobjetivo difuso espacial: Una herramienta para localizar proyectos lineales con un enfoque de gestión ambiental

Recibido para evaluación: 26 de Abril de 2005
Aceptación: 09 de Junio de 2005
Recibido versión final: 30 de Junio de 2005

Patricia Jaramillo Á.¹
Liliana Vinasco T.²

RESUMEN

En este artículo se presenta una propuesta metodológica que busca identificar corredores ambientalmente viables para proyectos lineales (carreteras, líneas de transmisión, oleoductos, etc), cuando no se cuenta con la totalidad de la información de la zona de influencia del proyecto, o parte de ésta es de carácter impreciso. Se presenta, además, un módulo computacional que permite su aplicación.

La propuesta se basa en el Análisis Multiobjetivo Difuso (AMOD), retomando elementos de la Lógica Difusa y el Análisis Multiobjetivo tradicional, conservando de la primera sus propiedades para tratar información imprecisa y permitiendo con el segundo la minimización del impacto ambiental en las múltiples dimensiones: física, biótica, cultural, económica y política del medio ambiente. Adicionalmente, esta herramienta es integrada a un Sistema de Información Geográfica (SIG), constituyéndose en una completa herramienta para la toma de decisiones en la que se incluyen atributos espaciales.

El AMOD es una técnica reciente y aún en desarrollo, y más aún su integración a SIG. La propuesta es un aporte a la construcción de un marco conceptual para futuras aplicaciones en esta línea y se constituye en una herramienta de planificación ambiental que busca disminuir los riesgos, futuros costos e impactos en los recursos naturales y grupos humanos.

PALABRAS CLAVE: Gestión Ambiental, Imprecisión, Lógica Difusa, Análisis Multiobjetivo, Análisis Multiobjetivo Difuso, Sistemas de Información Geográfica.

ABSTRACT

This paper presents a methodological proposal that is developed to identify corridors for lineal projects (highways, transmission lines, pipelines, etc), with environmental management criteria, when there is not complete information about the area of influence of the project, or some of the information is imprecise. Also a computational module is developed that allow the use of the methodological proposal.

The proposal is based in the Fuzzy Multiobjective Analysis (FMOA) concept, which takes elements of the Fuzzy Logic and the traditional Multiobjective Analysis. About the first one, it conserves its properties of working with imprecise information and of the second one, it allows the minimization of multiple objectives, that correspond to the least environmental impacts in the physical, biological, cultural, economical and political dimensions of the environment. Also it uses the Geographic Information Systems (GIS), this proposal is being constituted a complete tool for taking decisions in which space attributes are included.

The FMOA is a is a recent technique that is in development, and its integration to GIS is stiller. The proposal is a contribution to the construction of a conceptual frame for future applications in this aspects and is a tool for the environmental planning, which can help in decreasing the risks, future cost and impacts in the natural resources and human groups.

KEY WORDS: Environmental Management, Imprecise Information, Fuzzy Logic, Multiobjective Analysis, Fuzzy Multiobjective Analysis, Geographic Information Systems.

1. Ingeniera Civil - Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
Ph.D. en Planificación y Gestión de Recursos Hidráulicos - Universidad Politécnica de Valencia, España.
Profesora Asistente Facultad de Minas - Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

gpjarami@unalmed.edu.co

2. Ingeniera Ambiental - Universidad de Medellín.
Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo - Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
Joven Investigadora - COLCIENCIAS- Universidad de Medellín.

lvinasc@unalmed.edu.co

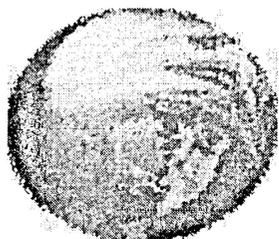
1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se presenta una propuesta metodológica que tiene aplicación en los procesos de toma de decisiones para la localización de proyectos lineales (carreteras, acueductos, líneas de transmisión de energía, entre otros), cuando la información sobre los ecosistemas y comunidades que pueden verse afectados por sus impactos ambientales es incompleta, no cuantificable o de difícil adquisición, lo que ocurre en casi la totalidad de los casos, en especial en países en vía de desarrollo. Lo anterior conduce a que el proceso de toma de decisiones se desarrolle sin herramientas adecuadas de decisión, conllevando implícitamente a un riesgo de equivocación que puede conducir a mayores costos a futuro para el proyecto y para el ecosistema que lo soporta.

Una alternativa de solución a la problemática mencionada, se hace posible mediante la integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con métodos cuantitativos de toma de decisiones con múltiples objetivos y con base en Lógica Difusa denominado Análisis Multiobjetivo Difuso (AMOD), debido a sus propiedades para analizar impactos en múltiples dimensiones y manejar información de carácter impreciso.

La Lógica Difusa, desarrollada inicialmente por Zadeh (1965) permite valorar las variables mediante expresiones lingüísticas como bueno, malo, etc., permitiendo su incorporación explícita a modelos matemáticos. Los números difusos tienen diferentes formas. Los más usados son los triangulares y trapezoidales, siendo los primeros los que se utilizarán en la presente trabajo.

Por su parte, el Análisis Multiobjetivo permite seleccionar la mejor de un grupo de alternativas comparando su desempeño respecto a dimensiones en conflicto. Generalmente no existe una alternativa óptima o mejor respecto a todas las dimensiones, pero si existen alternativas no dominadas o pareto-óptimas, esto es, alternativas que no son superadas por ninguna otra en todas las dimensiones. Generalmente, en todo grupo de alternativas a comparar, existe un número de alternativas no dominadas, y se requiere no sólo de un análisis matemático, sino también de la incorporación de las preferencias del decisor para seleccionar una de ellas como definitiva.



Actualmente, en el campo de la Gestión Ambiental se avanza en la construcción de un marco conceptual y metodológico que integra el uso de los SIG con las técnicas de Análisis Multiobjetivo clásicas (AMO). Sin embargo, aún es incipiente la integración entre la Lógica Difusa, el AMO y los SIG. Al respecto, el SIG IDRISI (Eastman, 2001), es el pionero en la inclusión de herramientas de AMO y de la Lógica Difusa, pero sin permitir incorporar valores difusos a las celdas del mapa, sino empleándola para relacionar qué tanto satisface el valor de un criterio la meta del decisor, por lo que en realidad usa un método de toma de decisiones con metas difusas, más que con información difusa.

Por su parte, los SIG de la casa ESRI (ArcView, Arc/Info y ArcGIS) los más comerciales, aún no incluyen estas técnicas. Algunas técnicas de AMO han sido integradas con SIG: Keisler y Sundell (1997) usaron funciones de Utilidad Multiobjetivo, Tkach (1997) usó Programación por Compromiso, Pullar (1999) los Promedios Ponderados, Andrienko (2001) el Análisis del Punto Ideal y Cavallo y Norese (s/f) el ELECTRE III, Dércole (2000) ha realizado aplicaciones con operadores de agregación difusos con el uso de scrip, entre otros.

Ángel, Carmona y Villegas (2001) propusieron el Modelo de Gestión Ambiental por Dimensiones, que ha sido empleado en proyectos lineales en los trabajos de Villegas (2000), Rincón (2001), Arroyave (1999), Zambrano (1999), Cano (2000), Velásquez (2001) y Sejín (2002) y los trabajos de Rueda (2002) y Losada (2001) los cuales incorporaron en el análisis de las técnicas clásicas de Análisis Multiobjetivo. El modelo de Gestión Ambiental por Dimensiones considera que en todo ejercicio de Gestión Ambiental debe analizarse el impacto que tendría el proyecto a desarrollar en 5 dimensiones: física, biótica, cultural, económica y política. Este modelo ha sido empleado por la empresa Interconexión Eléctrica S.A (ISA) en su "Estudio de Posibilidades y Restricciones Ambientales para los proyectos del Plan de Expansión Eléctrica", la metodología del Estudio fue desarrollada por ISA-INER (1998), en esta metodología se obtiene, para cada dimensión, un único mapa de criticidad, que es el resultado de hacer una integración de los mapas de algunas variables

que afectan a la dimensión. Los valores de cada una de estas variables han sido previamente estandarizados a 3 únicos posibles valores de criticidad: 1 (baja), 2 (media) y 3 (alta), independientemente de si estas variables han sido valoradas originalmente mediante números exactos continuos, o mediante caracterizaciones lingüísticas, o mediante valoraciones imprecisas de las variables. El uso de Lógica Difusa permite el uso directo de la información precisa o imprecisa, en términos numéricos o lingüísticos, y evitando la estandarización en rangos, la cual puede enmascarar información y ocultar la gran variabilidad de las alternativas.

El trabajo presentado profundizó en el Modelo de Gestión Ambiental por Dimensiones y en la metodología de ISA-INER (1998) que fueron definidos como marco conceptual de la investigación, y desarrolló una propuesta metodológica, seleccionando de las técnicas existentes para AMOD los elementos útiles para integrarlos con SIG e introduciendo formas novedosas de manejo de la información imprecisa, su comparación y agregación. Surgió, además, la necesidad del desarrollo de un módulo computacional debido a que los softwares de SIG no incluyen explícitamente herramientas para manejar mapas donde el valor de la celda es un número difuso, ni permiten operaciones de la matemática difusa. Este se desarrolló en lenguaje Java por su carácter gratuito y compatibilidad con diferentes plataformas, y presenta dos aplicaciones, la primera de ellas permite realizar operaciones de la matemática difusa (suma, resta, multiplicación, división y máximo) de gran utilidad en la construcción de los mapas difusos para cada una de las dimensiones y el segundo con las operaciones del AMOD (fuzzificación, posibilidad, distancia y agregación con los pesos OWA) que permiten al usuario tener la superficie de criticidad total sobre la cual calcular la ruta del mínimo costo.

La propuesta metodológica es entonces una innovación en los métodos cuantitativos aplicados a la gestión ambiental y un aporte en el campo de las decisiones para localización de proyectos, permitiendo considerar criterios ambientales importantes y el carácter difuso en la información.

Se realizó una aplicación piloto de la metodología propuesta, realizando un análisis de las diferencias, beneficios y limitaciones de la metodología propuesta con respecto a la manera tradicional en que se toman decisiones en la localización de proyectos lineales. Finalmente, se presentan las conclusiones encontradas durante el desarrollo del proyecto y se plantean recomendaciones para futuros proyectos que deseen incorporar aspectos afines a los tratados en el presente trabajo.

2. METODOLOGIA

La propuesta metodológica surge como una alternativa para la toma de decisiones en casos de imprecisión en la información. En la literatura es frecuente encontrar que los términos incertidumbre e imprecisión son usados sin ninguna diferenciación. Los autores adoptamos las siguientes definiciones de acuerdo a Chen y Hwang (1992) y Smith y Jaramillo (2002). La **imprecisión** es la situación en la que la no puede darse un valor exacto para los parámetros del problema, la información no es cuantificable, o es incompleta o no puede obtenerse. Por su parte, la **incertidumbre** proviene de la naturaleza estocástica de las variables implicadas en la decisión, ésta se asocia al desconocimiento de las probabilidades de los estados futuros de la naturaleza. De acuerdo a los autores en mención, la imprecisión puede manejarse desde el enfoque de la Lógica Difusa propuesta por Zadeh (1965), mientras que la incertidumbre preferiblemente con métodos probabilísticos.

La metodología propuesta se desarrolló con base en el análisis de los diferentes métodos de AMOD y es producto de un análisis exhaustivo de las propuestas de los diferentes autores. Se seleccionaron o descartaron los operadores propuestos por los autores y se construyó un nuevo operador, evaluando sus posibilidades, desventajas, ventajas, e inconvenientes prácticos en nuestro caso de aplicación en un SIG. Lo anterior es determinante, dado que se debieron seleccionar considerando los aspectos más pertinentes como bajos costos computacionales porque, al trabajar con mapas, se requiere que las operaciones se realicen celda a celda en matrices de gran número de filas y de columnas.

La metodología recomienda los siguientes pasos: obtención de la cartografía digital, generación de los mapas temáticos de las criticidades ambientales en cada una de las dimensiones;



y por último la aplicación del Análisis Multiobjetivo Difuso para seleccionar finalmente la mejor ruta o localización del proyecto lineal. Estos pasos se detallan a continuación.

2.1 Obtención de la cartografía digital, su bases de datos relacionada y la información ambiental de la zona de estudio y del tipo de proyecto lineal

Identificado el tipo de proyecto lineal, se debe delimitar el área de estudio, determinando las coordenadas de los mapas requeridos para la realización del análisis, se debe procurar por la obtención de cartografía digital básica y en lo posible de carácter temático en relación a las variables ambientales en las dimensiones del medio ambiente: física, biótica, cultural, económica y política (Ángel, Carmona y Villegas, 2001). Adicionalmente, se debe realizar un análisis de la información ambiental faltante y que se requiera para tomar la decisión de localización del proyecto. Esta información se empleará en el ajuste y complementación de las bases de datos existentes en los mapas y podrá obtenerse de fuentes secundarias como son los Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios, diagnósticos ambientales e investigaciones existentes en la zona y estudios de impacto ambiental de proyectos en la zona de influencia.

2.2 Generación de los mapas temáticos de criticidades ambientales en cada una de las dimensiones

Inicialmente, debe realizarse un análisis de los factores o variables que inciden en las posibilidades y restricciones ambientales para identificar los impactos del proyecto sobre cada dimensión, para lo cual es útil el empleo del Modelo de Gestión Ambiental por Dimensiones propuesto por Ángel, Carmona y Villegas (2001). Es importante mencionar, que para cada tipo de proyecto lineal, existirán unos factores diferenciados de restricción y criticidad y la propuesta de ISA-INER (1998) puede servir de guía metodológica para identificar estos aspectos, pero esto no exime al grupo de trabajo de particularizarlos para proyectos lineales diferentes a las líneas de transmisión.

Debe obtenerse un mapa para cada variable o factor identificado. La metodología permite que en los mapas, las variables o factores puedan ser representadas mediante valores exactos (crisp), cuando se cuenta con la valoración exacta de la variable en cuestión, o con números difusos, cuando sólo se cuenta con un valor aproximado, o con variables lingüísticas, cuando sólo se puede valorar cualitativamente mediante expresiones como alto, medio, bajo, entre otros. En este último caso, se transforma la variable lingüística en números difusos empleando escalas como las que proponen Chen y Hwang (1992). Como ejemplo en la Figura 1, se presenta la escala para tres términos lingüísticos.

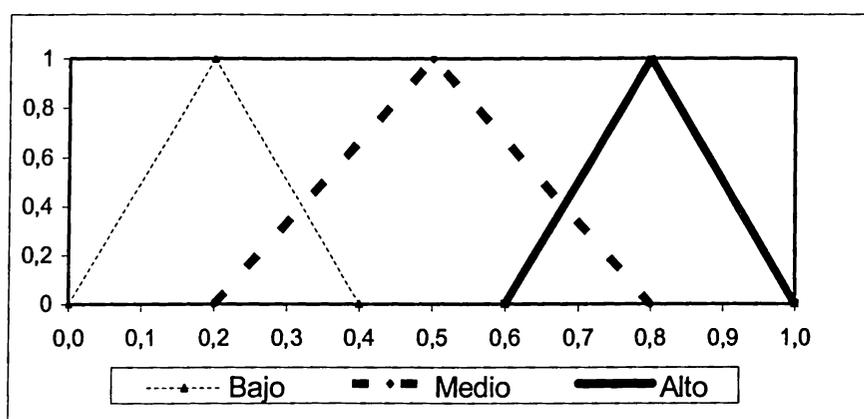


Figura 1.
Escala de tres términos lingüísticos.
Fuente: Chen y Hwang, 1992

Para cada dimensión se debe realizar luego un mapa de criticidades integrando los mapas de los factores o variables que impactan en ella. Para esto, la propuesta de ISA-INNER (1998) reclasifica cada mapa de variables, dándole el mismo tratamiento a las variables valoradas mediante números exactos (crisp) y a las valoradas cualitativamente, reclasificando sus valores en una de tres etiquetas que representan su criticidad: baja (1), media (2) y alta (3). En la propuesta presentada, lo anterior se modificará en el sentido que, para integrar en cada dimensión los mapas de las variables, se conservará el carácter crisp de los mapas que cuentan con información cuantitativa completa y exacta, al igual que se conservará el carácter difuso de aquellas variables no cuantificables o imprecisas de las cuales no se disponga de información completa. Lo anterior no solo porque no se desea perder la valiosa capacidad diferenciadora de alternativas de la información tipo crisp, sino que se considera que al realizar la reclasificación que propone ISA-INNER (1998), se presenta el peligro que para dos celdas adyacentes espacialmente, cuyos valores en una variable sean muy cercanos entre sí, y el límite que divide un rango se da entre esos dos valores, estas serán reclasificadas con valores muy diferentes. Como ejemplo, en el caso piloto que se presenta más adelante, se presenta el caso en que celdas contiguas con valores de pendientes de 10.08° y 11.07° , al clasificarlas de acuerdo al rango de criticidades que presenta ISA-INNER (1998), la primera se clasifica como de criticidad baja y la segunda de criticidad media, a pesar de que son adyacentes espacialmente. En la Figura 2 se representa la clasificación en rangos de los datos crisp que propone ISA-INNER (1998) con la línea negra y la clasificación que se plantea en la metodología propuesta se representa con la línea gris punteada.

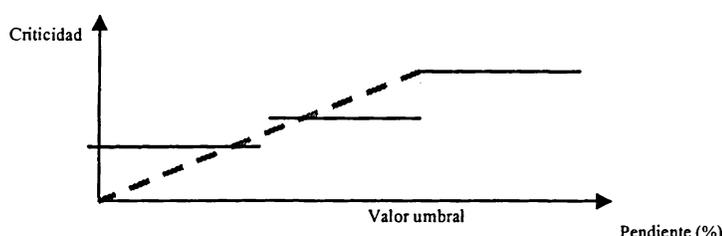


Figura 2.
Rangos de criticidad para datos crisp de ISA-INNER (1998) vs Rangos de criticidad propuestos.

Según se muestra en la literatura técnica, el usar valores ordinales para la clasificación puede ser inconveniente (Barba Romero y Pomerol, 1997). Primero, porque al introducirlos luego en una agregación ponderada, implícitamente se le está considerando que, por ejemplo, una celda con valor de criticidad 3 es exactamente 3 veces más crítica que la valorada con 1, lo que no es real, y sólo fue el resultado de elegir 3 etiquetas numéricas, que igualmente pudieran ser otras; segundo, por los peligros revelados en la llamada "Paradoja de Condorcet", respecto a la intransitividad entre alternativas; y tercero, por los peligros revelados en el "Axioma de la Independencia respecto a las alternativas irrelevantes" (Borda). Aunque estos peligros, generalmente, están presentes en la mayoría de formas de agregación, puede aumentar la posibilidad de evitarlos con otras prácticas (Barba Romero y Pomerol, 1997).

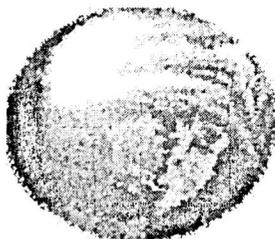
Se diseñó entonces, un módulo computacional que permitiera realizar la agregación de las variables mediante operaciones de matemática difusa (suma, resta, multiplicación, división y máximo).

2.3 Aplicación del Análisis Multiobjetivo Difuso a las bases de datos espaciales

Obtenidos los cinco mapas de criticidad en las dimensiones del medio ambiente, se aplicará el modelo de Análisis Multiobjetivo Difuso Espacial (AMODE) propuesto. Un modelo multiobjetivo se caracteriza por: la forma en que involucra las preferencias de los decisores, la forma en que valora el desempeño de cada alternativa en cada dimensión, y la forma en que considera la compensación entre valores de las dimensiones para obtener una única valoración para cada alternativa. Para involucrar las preferencias del decisor el modelo propuesto usa metas difusas; para valorar el desempeño de cada alternativa en cada dimensión usa el operador difuso "Posibilidad" (Dubois, Prade y Testemale, 1982) y un nuevo operador de distancia difusa a la meta; y para obtener una valoración integral para cada alternativa, permitiendo diferentes grados de compensación entre dimensiones, usa los llamados pesos OWA (Yager, 1988) que ponderan de forma compensatoria

o no las diferentes dimensiones. Todas estas características serán explicadas y justificadas más adelante.

Los pasos a seguir para aplicar el AMODE, son los siguientes:



1. Creados los mapas de criticidad ambiental en las cinco dimensiones con ayuda del módulo computacional, el decisor deberá entonces plantear una meta A_0 , con los valores difusos (o variables lingüísticas) de la criticidad que le interesaría alcanzar x_j^0 en las cinco dimensiones del medio ambiente, de la siguiente manera: $A_0 = \{x_1^0, x_2^0, x_3^0, x_4^0, x_5^0\}$. Lo anterior debido a que en el modelo se usan metas difusas para expresar las preferencias de los decisores en lugar de los pesos de importancia relativa. En el módulo la meta difusa se ingresa como un número difuso triangular que representa una variable lingüística. Cuando el decisor no esté en posibilidad de asignar una meta difusa, el modelo considera una meta ideal de 0, en cada dimensión. Cada una de las celdas o alternativas A_i en cada dimensión u objetivo j tiene un valor de criticidad x_{ij} , el cual debe compararse luego con el valor propuesto de meta x_j^0 .

Los pesos de importancia relativa son los usados con mayor frecuencia en los procesos de decisión, sin embargo para los decisores su definición, implica dificultad conceptual ya que estos pesos realmente significan los intercambios entre dimensiones que el decisor estaría dispuesto a aceptar. Al usarlos en una suma ponderada por ejemplo, se asume que la función de preferencias de intercambios entre dimensiones es lineal, es decir, el decisor acepta tasas constantes de intercambios, independiente del nivel alcanzado por una posible solución. Frecuentemente, los pesos son valores que el decisor debe definir al principio del proceso sin un conocimiento ni un aprendizaje previo de las limitaciones ni los potenciales del problema que se evalúa. Ambas situaciones hacen difícil su definición por parte de los decisores. Sin embargo, en la literatura se reportan métodos como el AHP de Saaty (1980) que ayudan a los decisores a establecer estos pesos y se proponen experiencias donde son los expertos quienes los definen.

Por su parte, las metas o niveles máximos aspirados tienen un significado claro y directo y su valoración se da en las mismas unidades de los objetivos (Jaramillo, 1999), por lo que para el decisor suelen ser de fácil definición, además no se prestan a otras interpretaciones. Por estas razones el modelo emplea metas, así dependiendo de si la meta es ambiciosa o no, capta implícitamente qué tan importante es para el decisor la dimensión, pues el decisor impondrá metas más ambiciosas a dimensiones que le importan más.

Se aclara que la metodología es flexible y no restringe a los decisores que tengan definidos previamente unos pesos de importancia, ya que estos pueden incorporarlos a las dimensiones, previa a la agregación con los pesos OWA que se explicarán más adelante.

2. Con el fin de valorar el desempeño de cada celda o alternativa A_i en cada dimensión j , el valor de criticidad de cada dimensión x_{ij} , debe compararse con la meta x_j^0 , mediante las operaciones "posibilidad" y "distancia difusa a la meta" en forma sucesiva.

La "posibilidad" (p) (Dubois, Prade y Testamale, 1982) es un operador difuso que indica el grado de solapamiento que existe entre dos números difusos. La formulación matemática de p para $A = (a, b, c)$ y $B = (d, e, f)$ dos números difusos triangulares asimétricos es:

$$\pi(A \leq B) = \begin{cases} 1 & \text{si } b \leq e \\ 0 & \text{si } b \geq e + (b-a) + (f-e) \\ 1 - \frac{b-e}{(b-a) + (f-e)} & \text{de otra forma} \end{cases} \quad [1]$$

Por su parte el operador "distancia difusa a la meta", fue diseñado para superar el hecho de que la "posibilidad" no permite realizar una valoración exacta sobre qué tan distante está una alternativa A de la meta B y se representa matemáticamente en la ecuación 2. En la Figura 3 se pueden observar gráficamente los operadores "posibilidad" y "distancia difusa a la meta".

$$D(B-A) = \begin{cases} 0 & \text{si } \pi(A \leq B) = 1 \\ A^* - B^* & \text{si } \pi(A \leq B) = 0 \\ (b-e) \times (1 - \pi(A \leq B)) & \text{si } 1 - \frac{b-e}{(b-a) + (f-e)} \text{ de otra forma} \end{cases} \quad [2]$$

Donde:

$$A^* = \frac{a+b+c}{3} \quad \text{y} \quad B^* = \frac{d+e+f}{3} \quad [3]$$

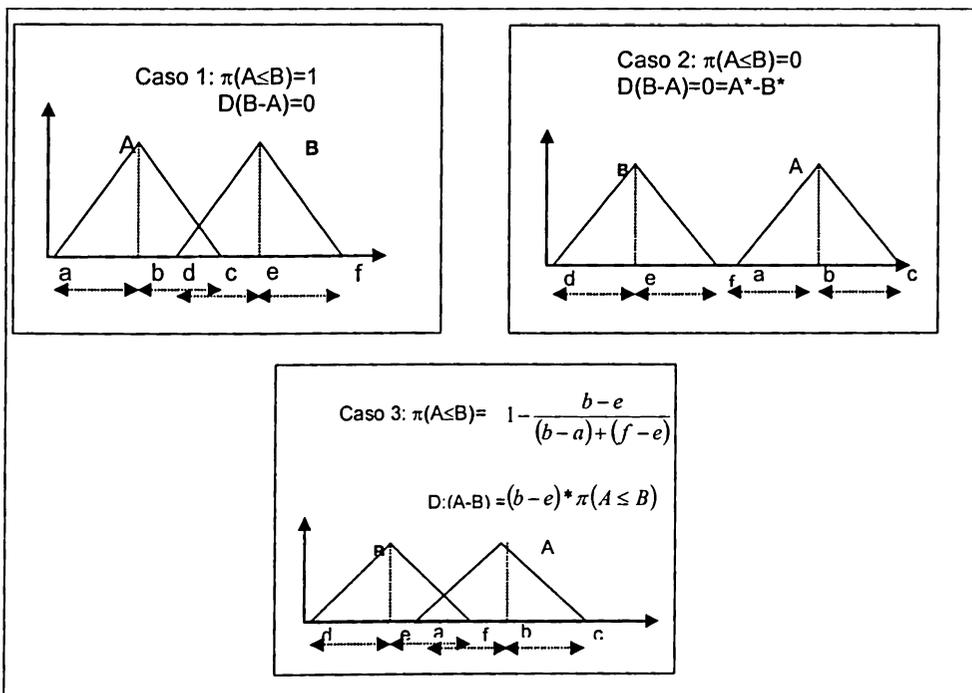


Figura 3. Representación gráfica de los operadores posibilidad y distancia difusa a la meta.

- Posteriormente se determinará un mapa que, para cada celda o alternativa A_i , representa un valor integral $V(A_i)$, resultante de la agregación de las distancia difusas entre A_i y el ideal A_0 y usando los pesos OWA (Yager, 1988), así:

$$V(A_i) = OWA [D(x_j^0 - x_{ij})] \quad [4]$$

Los pesos OWA son un tipo de operador de agregación que permiten considerar compensaciones entre los objetivos, y son una alternativa a los operadores difusos unión (OR) e intersección (AND), los más usados en análisis multiobjetivo difuso (Chen y Hwang 1992), pues son demasiado restrictivos en un modelo de decisión. Lo anterior debido a que el operador OR (MAX difuso) se asocia al total optimismo del decisor ya que en un problema multiobjetivo este operador está expresando que se desea encontrar una alternativa que satisfaga "al menos uno de los objetivos", por lo que solo considera, para el análisis de cada celda, el mejor valor en cualquiera de las dimensiones sin importar los valores en las demás. El operador AND (MIN difuso) se asocia al pesimismo del decisor ya que se interpreta como que este desea satisfacer "todos los objetivos a la vez" y solo considera, para el análisis de cada celda, el peor valor en cualquiera de las dimensiones sin importar los valores en las demás. Es decir, el operador OR le da un peso de uno (1) al mejor valor en una dimensión y cero (0) a los demás. El operador AND le da un peso de uno (1) al peor valor en una dimensión y cero (0) a los demás. Los pesos OWA alteran y suavizan esas posiciones extremas considerando diferentes grados de optimismo, por lo tanto diferentes ponderaciones de los aspectos positivos y negativos de cada alternativa. En Fullér (1996), Carlsson y Fullér (1997), Marichal (1998) y Carlsson y Fullér (2002) pueden consultarse con mayor detalle los aspectos conceptuales y la formulación matemática de los Operadores de Agregación OWA de su sigla en inglés "Ordered Weighted Averages".



La mayor parte de las referencias encontradas en la literatura, e incluso el software IDRISI que también usa los pesos OWA, requieren del decisor la valoración directa de los pesos OWA, situación bastante difícil en la práctica. En la metodología propuesta no se le pide al decisor su valoración directamente, uno por cada dimensión, sino que mediante un cuantificador y a partir de un solo un parámetro: el índice de optimismo, los pesos OWA se definen matemáticamente, dada la gran dificultad práctica de valorarlos directamente. Carlsson y Fuller (2002) recomiendan asociar a ellos un cuantificador $\varphi(r)$, cuya función puede ser continua creciente o decreciente. Particularmente sugieren emplear la función continua creciente representada por la ecuación 5, a cada cuantificador φ se asocia un grado de optimismo θ que se presenta en la ecuación 6:

$$\varphi_{\alpha}(r) = r^{\alpha}, \quad \alpha > 0 \quad [5]$$

$$\theta = \text{Grado de optimismo } (\varphi) = \int_0^1 \varphi(r) dr \quad [6]$$

Para la familia de cuantificadores de función creciente se representa por la ecuación 7:

$$\theta = \int_0^1 r^{\alpha} dr = \frac{1}{\alpha + 1} \quad [7]$$

El vector de pesos OWA $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ para dimensiones $n \geq 2$ se obtiene aplicando la ecuación 8 que se presenta a continuación, la cual garantiza que los pesos sean valores entre cero (0) y uno (1) y que su suma sea la unidad (Legind (2002), Carlsson y Fullér (2002)):

$$w_i = \varphi\left(\frac{i}{n}\right)^{\alpha} - \varphi\left(\frac{i-1}{n}\right)^{\alpha}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad [8]$$

Para resolver la ecuación anterior el decisor expresa su grado de optimismo θ : un valor entre 0 y 1, (entre pleno optimismo y pleno pesimismo), y al reemplazarlo en la ecuación 7 se encuentra el valor de α el cual es reemplazado en la ecuación 8 para hallar los pesos OWA.

4. El mapa resultante de agregación de las distancias difusas a la meta, tendrá valores entre cero (0) y uno (1), siendo los valores más cercanos a cero (0) los de mejor valor, porque se desea minimizar el impacto ambiental en las dimensiones, expresado aquí como la mínima distancia a la meta del decisor. Este nuevo mapa se visualiza en el software de SIG ArcGIS, el cual tiene las herramientas para calcular la ruta del mínimo costo, algoritmo que aplicado al mapa determinará el trazado más corto por las celdas de mayor viabilidad ambiental.

5. Obtenido el corredor solución del problema, el decisor debe analizar si satisface sus preferencias y en caso contrario, con base en la solución obtenida, puede re-iniciar el proceso planteando relajaciones o mejoras en los valores de las metas, o en el índice de optimismo, como proceso de aprendizaje del sistema que evalúa antes de tomar una decisión definitiva. El modelo garantiza que todas las soluciones encontradas por este proceso son óptimo-paretianas.

3. CASO PILOTO DE APLICACION

Para la aplicación de la metodología propuesta se seleccionó como zona de estudio la Subregión Occidente de Antioquia, proponiendo un proyecto de transmisión eléctrica hipotético entre las cabeceras urbanas de los municipios de Armenia y Sopetrán. La zona de estudio comprendió los municipios de Armenia, Heliconia, Anzá, Ebéjico, San Jerónimo y parte de Caicedo, Santa Fé de Antioquia y Sopetrán. Esta selección se realizó, considerando que para esta zona se contaba con buena cartografía digital en las cinco dimensiones del medio ambiente, la cual en su mayoría fue suministrada por la empresa I.S.A. S.A. Adicionalmente, se contaba con fuentes secundarias de información ambiental, principalmente un estudio desarrollado en el cual se realizó un diagnóstico de la problemática ambiental de la Subregión Occidente del Departamento y se proponían lineamientos para la gestión del ordenamiento ambiental del territorio (Universidad de Antioquia, 2002). Adicionalmente se consultaron los Planes de Ordenamiento de los municipios.

3.1 Determinación de las rutas para el proyecto

La aplicación se realizó en dos etapas. La primera consistió en determinar un corredor siguiendo la metodología propuesta por el estudio de ISA-INNER (1998) y la segunda determinando un corredor con la metodología propuesta de AMODE. Al respecto se aclara que con lo anterior, no se pretende validar el corredor obtenido con la metodología propuesta, ya que ambos se apoyan en fundamentos teóricos diferentes, *crisp* en el primer caso y difuso en el propuesto. Es así como lo que se pretende comparar, no es el resultado como tal, sino la metodología con la cual fue seleccionado el corredor.

La metodología de ISA-INNER (1998) se toma como guía en lo relacionado con la identificación y priorización de variables de interés a evaluar en una evaluación ambiental de un proyecto de transmisión. Sin embargo, se incorporaron cambios en la metodología ya que se aplicó la Lógica Difusa para el tratamiento de las variables y para la valoración de la criticidad en las dimensiones. Adicionalmente la agregación de las dimensiones para obtener la superficie de criticidad total, también fue modificada por la propuesta metodológica utilizando los operadores posibilidad y distancia y los pesos de agregación OWA.

La determinación del corredor se realizó de igual manera en ambos casos con ayuda del SIG ArcGIS bajo ArcView de la casa ESRI el cual cuenta con las funciones que permiten determinar la superficie de costos acumulados que para este caso es criticidad acumulada y para determinar la ruta del mínimo costo o de menor criticidad ambiental total.

El mapa de criticidad total de acuerdo a la metodología de ISA-INNER (1998), se obtuvo con la agregación de los mapas de criticidad de las dimensiones, mediante el juego de pesos que se presenta en la Tabla 1, estos pesos fueron determinados por expertos en ISA-INNER (1998).

Dimensión	Peso
Física	0.18
Biótica	0.22
Económica	0.18
Cultural	0.22
Política	0.20

Tabla 1.
Pesos de las dimensiones de acuerdo a ISA-INNER (1998).
Fuente: ISA-INNER (1998)

Posteriormente, se determinó la ruta siguiendo la metodología propuesta aplicando el AMOD para determinar el mapa de criticidad total en el módulo computacional y finalmente con el ArcGIS se calculó la ruta del proyecto. Es importante aclarar que el módulo computacional permite la manipulación de las bases espaciales como tal, por lo que los mapas deben ser exportados en formato ASCII con extensión *.asc, este tipo de archivos pueden ser importados en la mayoría de los SIG comerciales, lo que permite que la metodología no se limite al uso del ArcGIS. Para comparar con la ruta obtenida con la metodología de ISA-INER (1998) se realizó una agregación considerando una alternativa ideal totalmente conservadora, es decir con criticidad "Baja" o cero (0) en las cinco dimensiones física, biótica, cultural, económica y política. Para la agregación de las dimensiones, se emplearon 5 juegos de pesos OWA usando un cuantificador de función creciente descrito en las ecuaciones 5 a 8, pasando desde uno muy optimista (grado de optimismo de 0.9), uno optimista (grado de optimismo de 0.75), uno indiferente o compensatorio (grado de optimismo de 0.5), uno pesimista (grado de optimismo de 0.25) y uno totalmente pesimista (grado de optimismo de 0) obteniendo los juegos de pesos OWA que se observan en la Tabla 2.

Tabla 2.
Pesos OWA para los diferentes
grados de optimismo.

Grado de optimismo (θ)	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
0.9	0.84	0.07	0.04	0.03	0.02
0.75	0.58	0.15	0.11	0.08	0.07
0.5	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
0.25	0.01	0.06	0.15	0.30	0.49
0	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Adicionalmente, con el objeto de analizar los resultados, se construyeron dos rutas más, la primera consideró las superficies difusas en todas las dimensiones afectándolas por los pesos de importancia que plantea la metodología de ISA-INER (1998), conservando el perfil del decisor que la ruta obtenida con la metodología original. Por su parte, la segunda es del tipo compensatorio que realiza la agregación de las dimensiones difusas considerando pesos de importancia iguales en todas las dimensiones. En la Figura 4 se presentan todas las rutas trazadas para la aplicación hipotética.

Dadas las diferencias en los fundamentos teóricos empleados en la metodología de ISA-INER (1998) y la propuesta, no es posible puntualizar sobre cuál de las rutas es la mejor, dado que los mapas de criticidad total en las dimensiones se construyeron con diferentes marcos metodológicos, sus valores no son comparables. Adicionalmente, por el hecho de ser un problema multicriterio, en que no se puede afirmar, entre alternativas optimo- paretianas, que una alternativa es mejor que otra dado que corresponden a diferentes preferencias de los decisores. Sin embargo, con el objeto de determinar que tan crítica ambientalmente sería la ruta de ISA-INER sobre las superficies de las dimensiones halladas con la metodología propuesta (dimensiones difusas) y compararla con las rutas encontradas con los diferentes juegos de pesos OWA, se procedió a realizar la Tabla 3, cuyos valores se obtuvieron de la superposición de las rutas sobre los mapas de la defuzzificación de los archivos *.asc que conforman las dimensiones difusas de la metodología propuesta.

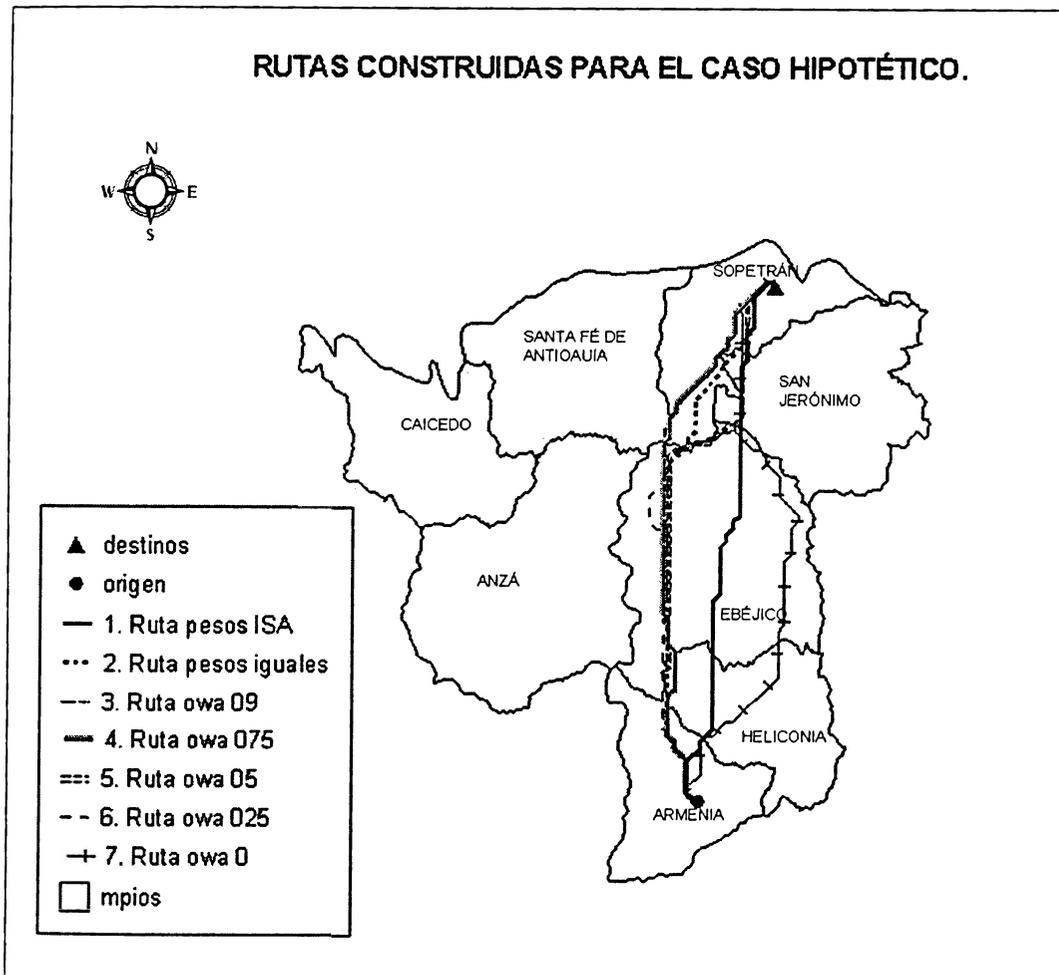


Figura 4.
Rutas construidas para el caso hipotético.

3.1 Discusión y Análisis

Las alternativas 3 y 4 siguen perfiles de decisor optimista, es decir, decisores a quienes les es suficiente que la ruta seleccionada pase por celdas con excelentes condiciones respecto a alguna dimensión, sin importarle demasiado sus defectos respecto a otras dimensiones. Este tipo de ruta es típica de decisores propensos al riesgo, cuyo camino toma como referencia los mejores valores, que para este caso corresponden a las dimensiones con menores criticidades (biótica y política). Estas alternativas suelen ser costosas en total, porque suele suceder que alternativas con muy buenas condiciones en unas dimensiones son demasiados críticas en otras, pero el método es insensible a estas últimas y se corre el riesgo de encontrar una afectación ambiental no prevista por el decisor en su análisis.

Por su parte las alternativas 6 y 7 siguen perfiles de decisor pesimista. En este sentido, la ruta más pesimista (alternativa 7) aumenta la afectación en las dimensiones con criticidades más altas (física y económica), con ello se está tomando una posición conservadora frente al riesgo, es decir se está dispuesto a soportar menos riesgo al tomar como referencia los peores valores que puede tomar cada celda. De este modo un decisor pesimista se va por el camino seguro, evitando sorpresas futuras y correr menos riesgos. Esta decisión es robusta, y por lo tanto costosa ya que alarga la longitud de la línea.

Las alternativas 1, 2 y 5 son compensatorias (son las obtenidas a partir de un grado de

Tabla 3.
Valoración de las rutas respecto a cada dimensión.

Alternativa	Ruta	Descripción	Tamaño de la ruta	DIMENSIONES					Criticidad Total de la ruta
				Física	Biótica	Cultural	Económica	Política	
1	Superficies difusas con pesos ISA-INER (1998)	Agregación de los mapas defuzificados de las dimensiones, con los pesos de ISA-INER (1998). La nueva ruta se superpuso en los mapas defuzificados de las dimensiones.	95	24.56	26.49	45.50	36.80	35.80	169.15
2	Superficies difusas con pesos iguales	Agregación de los mapas defuzificados de las dimensiones con pesos iguales, sin OWA (Equivale a OWA 0.5). La nueva ruta se superpuso en los mapas defuzificados de las dimensiones.	101	23.90	36.48	49.00	23.50	44.20	177.08
3	Grado de optimismo 0.9	Agregación de los mapas de distancia difusa de las dimensiones con pesos OWA ($\theta=0.9$). La nueva ruta se superpuso en los mapas defuzificados de las dimensiones.	105	24.52	39.04	51.00	23.10	46.20	183.86
4	Grado de optimismo 0.75	Agregación de los mapas de distancia difusa de las dimensiones con pesos OWA ($\theta=0.75$). La nueva ruta se superpuso en los mapas defuzificados de las dimensiones.	105	24.52	39.04	51.00	23.10	46.20	183.86
5	Grado de optimismo 0.5	Agregación de los mapas de distancia difusa de las dimensiones con pesos OWA ($\theta=0.5$). La nueva ruta se superpuso en los mapas defuzificados de las dimensiones.	103	25.27	36.51	50.00	26.90	38.60	177.28
6	Grado de optimismo 0.25	Agregación de los mapas de distancia difusa de las dimensiones con pesos OWA ($\theta=0.25$). La nueva ruta se superpuso en los mapas defuzificados de las dimensiones.	107	26.69	39.52	52.00	26.80	40.00	185.01
7	Grado de optimismo 0	Agregación de los mapas de distancia difusa de las dimensiones con pesos OWA ($\theta=0$). La nueva ruta se superpuso en los mapas defuzificados de las dimensiones.	115	35.71	33.47	55.00	45.10	40.40	209.68

optimismo cercano a 0.5, o sin considerar OWA), es decir, puede suceder con ellas que buenos valores en unas dimensiones compensan malos valores en otras dimensiones, pero eso no es percibido por el decisor. Son menos costosas que las otras alternativas pero corren el riesgo de que haya celdas con valores inconvenientes en algunas dimensiones, y el modelo es insensible a detectarlo, por lo que estas soluciones serían las adecuadas para decisores indiferentes al riesgo. Como estas alternativas no se dominan entre sí, no se puede decir que una es mejor que otra, pues todas son no dominadas o Pareto-Óptimas (ninguna es peor que las otras en todas las dimensiones) y siguen diferentes preferencias. Sin embargo, la Alternativa 1 parece más conveniente, pues obtiene resultados más coherentes con los pesos asignados, pues las dimensiones biótica y cultural, a las que se les asignó mayor peso, tienen mejores valores.

4. CONCLUSIONES

La metodología propuesta es de carácter general por lo que tiene una alta aplicabilidad en gran variedad de proyectos de desarrollo lineales como son las carreteras, los acueductos, los oleoductos, las líneas de transmisión de energía, entre otros. Adicionalmente, el módulo computacional puede emplearse para realizar operaciones difusas en matrices de datos que no necesariamente sean un mapa.

La metodología es flexible, dado que permite la manipulación de todo tipo de información, esto es: datos del tipo *crisp*, empleados cuando se tiene un valor medido de la variable, como por ejemplo la pendiente o la precipitación; variables lingüísticas difusas, para variables que se valoran cualitativamente como por ejemplo, capacidad de concertación de las comunidades y datos del tipo fuzzy para variables que aunque podrían valorarse cuantitativamente, la información al respecto es imprecisa o no puede obtenerse, permitiendo que se den valores aproximados a partir de las apreciaciones de expertos, y el método usa este dato en forma consecuente con esa imprecisión.

Muchas variables del tipo lingüístico no tienen valores que se restrinjan a un límite espacial, sino que son de carácter continuo y van sufriendo una degradación o intensificación de manera gradual y no de manera abrupta al pasar de un municipio a otro o de un pixel a otro. En este contexto, la Lógica Difusa es una herramienta muy útil, ya que permite crear zonas de transición, esto para variables como la amenaza volcánica en las dimensiones físico-biótica y la capacidad de concertación de las comunidades en las dimensiones sociales (cultural, económica y política), en las que los valores varían gradualmente, desde niveles bajos hasta niveles altos de manera transicional, independientemente de los límites político-administrativos y el tamaño de un pixel. En este sentido el empleo de la Lógica Difusa logra una representación más aproximada de la realidad.

Por otro lado, el uso de metas y distancia al ideal como parámetros que representan las preferencias del decisor, permite superar algunos aspectos negativos que se presentan con el empleo de pesos de importancia. Sin embargo, la metodología es flexible y no restringe a los decisores que tengan definidos unos pesos de importancia, ya que estos pueden incorporarlos a las dimensiones, previa a la agregación con los pesos OWA. El uso de los pesos OWA complementa la percepción de las preferencias del decisor para ser introducidas en el proceso de toma de decisiones. Los pesos OWA incorporan la aversión o propensión del decisor a soportar altas criticidades, y su posición ante la compensación entre malas y buenas criticidades. Adicionalmente, la metodología no le impone al decisor una meta y permite que si éste, no se siente en capacidad de otorgar una meta, el ideal sea cero, continuando con la coherencia de la metodología.

Se identificó que ningún Sistema de Información Geográfica comercial posee herramientas diseñadas explícitamente que permitan implementar el Análisis Multiobjetivo Difuso, a excepción del software IDRISI, aunque su enfoque es muy diferente al propuesto y no permite valoraciones difusas de las variables. En este sentido, se deriva que aún es incipiente la integración entre la Lógica Difusa, el Análisis Multiobjetivo y los Sistemas de Información Geográfica.

Dado que se realizó una aproximación a un proyecto hipotético, la situación anterior no debe considerarse como contundente, pero los resultados sí deben llamar la atención sobre la necesidad de que las empresas interesadas validen en campo, con proyectos reales, la propuesta metodológica



para que en un futuro se incorporen las herramientas del Análisis Multiobjetivo Difuso en la manera tradicional de definir corredores para proyectos lineales. Esta situación nos lleva a resaltar la importancia de continuar profundizando en este tipo de metodologías alternativas que podrían ayudarnos a minimizar el impacto ambiental generado y a que la toma de decisiones sea más coherente con la imprecisión e incertidumbre que con frecuencia se presenta.

5. AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a Interconexión Eléctrica S.A ISA y a la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, por el apoyo económico y suministro de información para la investigación titulada "Propuesta metodológica para la localización de proyectos lineales con base en criterios de gestión ambiental, en condiciones de imprecisión en la información, aplicando Análisis Multiobjetivo Difuso a bases de datos espaciales" financiada por el Fondo ISA-UN 2004 y realizada entre febrero de 2004 y febrero de 2005 de la cual se derivó la tesis de maestría de Vinasco (2005).

6. BIBLIOGRAFÍA

- Andrienko, N., 2001. Intelligent Support for Geographic Data Analysis and Decision Making in the Web. En: *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*. Vol.5, No. 2.
- Ángel, E., 2000. Métodos cuantitativos para la toma de decisiones ambientales. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Ángel, E., Carmona, S. y Villegas, C., 2001. Gestión ambiental en proyectos de desarrollo. Tercera edición. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Arenas, M.; Bilbao, A.; Jimenez, M. y Rodriguez, M. V., 2004. Aplicaciones del entorno MATLAB a la programación multiobjetivo en ambiente difuso. En: VII Jornadas de ASEPUMA. [en línea] disponible en: <http://www.uv.es/asepuma/jornadas/valencia/ponencias.html>.
- Barba-Romero, S., Pomerol, J. C., 1997. Decisiones Multicriterio. Fundamentos Teóricos y Utilización Práctica. Servicio de Publicaciones. Universidad de Alcalá.
- Barredo, J.I., 1996. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Madrid: Editorial RAMA.
- Bellman, R.E y Zadeh, L.A., 1970. Decision making in a fuzzy environment. *En: Management Science*. Vol. 17, No. 4, Diciembre; p. B141- B164.
- Cano, J.A., 2000. Evaluación de modelos para la elaboración de mapas de susceptibilidad en líneas de transmisión eléctrica. Medellín. Trabajo de Grado (Especialista en Gestión Ambiental). Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Facultad de Minas. Posgrado en Gestión Ambiental.
- Carlsson, C. y Fullér, R., 1997. Owa: Operators for Decision Support. *En: Proceedings of EUFIT'97 Conference in Aachen, Germany*. Vol. II (Septiembre); p. 1539-1544.
- Carlsson, C. y Fullér, R., 2002. Fuzzy Reasoning in Decision Making Optimization. Alemania: Physica – Verlag.
- Cavallo, A. y Norese, M.F., 2004. GIS and Multicriteria Analysis to Evaluate and Map Erosion and Landslide Hazards. [en línea] disponible en: www.lamp.polito.it/ssd/cv/gis_multic_analysis.pdf.
- Chen, S.J y Hwang, C.L., 1992. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making. Berlin: Springer-Verlag.
- Clarke, K.C., 2001. Getting started with geographic information systems. 3 Ed. Estados Unidos de Norte América: Prentice Hall Series in Geographic Information Sciencia,.
- Correa, G.J., 2004. Aproximaciones metodológicas para la toma de decisiones, apoyadas en modelos difusos. Medellín. Trabajo de Grado (Magister en Ingeniería de Sistemas). Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Facultad de Minas. Posgrado en Ingeniería de Sistemas.
- Correa, G.J y Peña G.E., 2004. Aproximaciones metodológicas a la toma de decisiones discretas, mediante el uso de operadores difusos. [en línea] disponible en: http://www.citad.net/CCIO/Registrados/amals_gcorrea.pdf.
- D'Ercole, C.; Groves D. I. y Knox-Robinson, C. M., 2000. Using fuzzy logic in a Geographic



- Information System environment to enhance conceptually based prospectivity analysis of Mississippi Valley-type mineralisation. En: Australian Journal of Earth Sciences. No. 47; p. 913 – 927.
- Demers, N.M., 2000. Fundamentals of geographic information systems. 2 Ed. Estado de Nuevo México: John Wiley and Sons INC.
- Dubois, D y Prade, H., 1982 The use of fuzzy numbers in decision analysis. En: Fuzzy Information and Decision Processes, M.M. Gupta and E. Sanchez, North-Holland, pp. 309-321.
- Duckstein, L., 1991. Elements of fuzzy set analysis and fuzzy risk. En: Bogardi, Janos y Nachtnebel, Hans Peter. Multicriteria Decision Analysis in Water Resources Management. The Netherlands: UNESCO, p. 410 - 430.
- Eastman, J. R., 2001. IDRISI 32 release 2, guide to GIS and image processing volume 2. Worcester Massachusetts: Clark Labs.
- Foody, G. M., 2003. Uncertainty, knowledge discovery and data mining in GIS. En: Progress in Physical Geography. Vol. 27, No. 1.
- Fullér, R., 1996. OWA: Operators in Decision Making. En: CARLSSON, Christer. Exploring the Limits of Support Systems. , TUCS General Publications, No. 3. Turku: Turku Centre for Computer Science, p. 85-104.
- Galindo, F., 2004. Conjuntos y Sistemas Difusos. Números Difusos y Probabilidad. [en línea] disponible en: polaris.lcc.uma.es/~ppgg/FSS/FSS4.pdf.
- Goicoechea, A.; Hansen, D. y Duckstein, L., 1982. Multiobjective Decision Analysis With Engineering and Business Applications. New York: John Wiley and Sons.
- Henoa P, J.F., 2002. Desarrollo y aplicación de un sistema de apoyo a la toma de decisiones en proyectos de recursos naturales. Medellín,. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas.
- Jacob, C., 2004. Fuzzy Systems. [en línea] disponible en: pages.cpsc.ucalgary.ca/~jacob/Courses/Winter2001/CPSC533/Slides/04-Fuzzy-6up.pdf.
- Jaen P, J.S., 2002. Creación de un sistema soporte para la toma de decisiones multiobjetivo con manejo de riesgo e incertidumbre, y dos aplicaciones administrativas en la Empresa ISA. Medellín. Trabajo de grado (Ingeniero Administrador). Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Jaramillo, P. y Smith, R., 2002. Desarrollo de un sistema soporte para la gestión ambiental con integración SIG-análisis multicriterio. Medellín,. Propuesta Convocatoria DIMED. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas.
- 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.
- INTERCONEXIÓN ELÉCTRICA S.A (ISA)- INSTITUTO DE ESTUDIOS REGIONALES DE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA (INER), 1998. Estudio de Posibilidades y Restricciones Ambientales para los proyectos del Plan de Expansión Eléctrica. ISA 2001-2010. Medellín.
- Keisler, J. y Sundell, R., 1997. Combining Multi-Attribute Utility and Geographic Information for Boundary Decisions: An Application to Park Planning. En: Journal of Geographic Information and Decision Analysis. Vol. 1, No. 2; p. 100-119.
- Legind, H., 2002. Construction of OWA operators with desired properties. Aalborg University.
- Losada, A.C., 2001. Sistema computacional de Análisis Multiobjetivo para el Diagnóstico Ambiental de Alternativas de las líneas de transmisión eléctrica. Medellín,. Trabajo de Grado (Especialista en Gestión Ambiental). Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Posgrado en Gestión Ambiental.
- Marichal, J.L., 2000. Aggregation operators for multicriteria decision aid. Li'ège, 1998-1999. Disertación Doctoral (Doctorado en Ciencias). University of Li'ège. Li'ège, Bélgica.
- Mizumoto, M. y Tanaka K., 1976. The Four Operations of Arithmetic on Fuzzy Numbers. En: Systems, Computers, Controls, 7, pp. 73-81.
- O'Hagan, M., A Fuzzy Decision Maker. [en línea] disponible en: www.fuzzysys.com.
- Pullar, D., 1999. Using an Allocation Model in Multiple Criteria Evaluation. En: Journal of Geographic



- Information and Decision Analysis. Vol. 3, No. 2 ; p. 9-17.
- Rincón, S.A., 2001. Evaluación de impactos ambientales sobre el paisaje causados por proyectos lineales de desarrollo. Medellín. Trabajo de Grado (Especialista en Gestión Ambiental). Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Posgrado en Gestión Ambiental.
- Rueda, J.A., 2002. Selección de alternativas considerando múltiples objetivos: aplicada al establecimiento del Parque Arví. Medellín. Trabajo de Grado (Especialista en Gestión Ambiental). Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Posgrado en Gestión Ambiental.
- Saaty T. L., 1980. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocations. New York: McGraw-Hill International Book Co,
- Sakawa, M., 2002. Fuzzy Multiobjective and Multilevel Optimization. En: Multicriteria Optimization. State of the art annotated Bibliographic Surveys. Kluwer Academic Publishers,. p. 171-219.
- Sejín, J.F., 2002. Homologación de impactos ambientales y medidas de manejo en líneas de transmisión eléctrica para el sistema integrado de información ambiental de Interconexión Eléctrica S.A. Medellín. Trabajo de Grado (Especialista en Gestión Ambiental). Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Posgrado en Gestión Ambiental.
- Smith, R. y Jaramillo, P., 2002. Desarrollo de técnicas para el manejo de incertidumbre e imprecisión en problemas de decisión con múltiples objetivos. Medellín. Propuesta Convocatoria DIME. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas.
- Smith R., Mesa O., Dyner, I., Jaramillo, P., Poveda, G. y Valencia, D., 2000. Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre. Segunda edición. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Posgrado Recursos Hidráulicos.
- Tkach, R.J., 1997. A New Approach to Multi-criteria Decision Making in Water Resources. En: Journal of Geographic Information and Decision Analysis. Vol. 1, No. 1, p. 25-44.
- Turban, E. y Aronson, J.E., 1998. Decision support systems and intelligent systems. Quinta Edición. New Jersey: Prentice Hall,
- UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, 2002. Dinámicas socioespaciales asociadas a la problemática ambiental urbana en el Departamento de Antioquía. Lineamientos para la gestión del ordenamiento ambiental del territorio. Caso Occidente de Antioquía. Investigación realizada por la Facultad de Ciencias Sociales e Ingeniería con el apoyo de COLCIENCIAS y el BID.
- Velásquez, J.D., 2001. Propuesta de gestión para el licenciamiento ambiental de proyectos de transmisión de energía. Medellín. Trabajo de Grado. (Especialista en Gestión Ambiental). Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Posgrado en Gestión Ambiental.
- Villegas, C.I. 2000., Localización de proyectos interconectados, con base en criterios de mínimo costo ambiental. Medellín. Trabajo de Grado (Especialista en Gestión Ambiental). Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Posgrado en Gestión Ambiental.
- Vinasco, L., 2005. Propuesta metodológica para la localización de proyectos lineales con base en criterios de gestión ambiental, en condiciones de imprecisión en la información, aplicando análisis multiobjetivo difuso a bases de datos espaciales. Medellín. Trabajo de Grado (Magister en Medio Ambiente y Desarrollo). Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Posgrado en Gestión Ambiental.
- Yager, R.R., 1988. Ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making, En: IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 18183-190.
- Zambrano, A.M., 1999. Modelación dinámica aplicada al estudio de restricciones y posibilidades ambientales de ISA. Medellín. Trabajo de Grado (Especialista en Gestión Ambiental). Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Posgrado en Gestión Ambiental.
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy Sets. En: Information and Control, Vol.8. pp. 338-353.

