



# Conceptualización de los modelos soporte de decisiones para el desarrollo del Sistema de Información de Vulnerabilidad Territorial (SIVT)

---

*La formulación de un problema es a menudo más importante que su solución, que puede ser simplemente una cuestión de habilidad matemática o experimental.*

Einstein y Infeld (1971)

El presente capítulo permite conceptualizar los principales modelos soporte para la toma de decisiones, analizados como insumo para la construcción del Sistema de Información de Vulnerabilidad Territorial (SIVT), desarrollado en el proyecto de investigación, el cual permite determinar la vulnerabilidad de una población dada y, a partir de esta, determinar las acciones de intervención en el territorio.

Para el caso del proyecto se propuso trabajar con modelos de programación dinámica, específicamente mediante el análisis de decisión multicriterio (Multiple Criteria Decision Analysis [MCDA]), debido a que el problema que se desea resolver requiere tomar varias decisiones para optimizar una función objetivo. Según la revisión realizada de diferentes modelos y técnicas presentes para la toma de decisiones —los cuales se evidencian en la bibliografía y en los casos de estudio presentados en el capítulo—, cada vez es más común el uso de modelos de programación dinámica MCDA para tomar decisiones ante catástrofes naturales, principalmente en terremotos, inundaciones, reforestación, calentamiento global y contaminación ambiental.

Una vez determinada la técnica, se eligieron los modelos representativos y recomendados en la literatura para tomar decisiones ante desastres naturales; estos fueron: Electré III, Promethee II, AHP y AHP Fuzzy, los cuales se seleccionaron debido a los casos de éxito encontrados, su facilidad de uso para los actores, la simplicidad de la estrategia del modelo, la variación de la solución y la aplicación de este.

Posteriormente, estas técnicas fueron implementadas en el SIVT, el cual, como se ha indicado con anterioridad, calcula el índice de vulnerabilidad territorial utilizando los factores de vulnerabilidad y los indicadores determinados en los capítulos 1 y 3, respectivamente, junto con los datos suministrados en el capítulo 4 con relación a los casos de estudio. De esta manera, se generan las acciones de intervención en el territorio (definidas igualmente en el capítulo 3) a partir del grado de vulnerabilidad. Finalmente, este capítulo incluye la conceptualización del sistema y explica brevemente cada uno de sus componentes.

## Modelos de toma de decisiones

Una metodología sencilla para dar solución a los problemas es la siguiente: primero, descubrir sus componentes; a continuación, elegir entre ellos los elementos más importantes, desechando aquellos que no desempeñan un papel preponderante; después, buscar las relaciones entre estos elementos; por último, seleccionar algunos objetos o símbolos que permitan representar la situación simplificada. A esta representación del problema se le denomina *modelo* (Ramírez, 1996).

Las matemáticas aportan un gran número de modelos cuya solución puede obtenerse con facilidad a través de paquetes computacionales; entre estos modelos pueden mencionarse: programación lineal, programación entera, programación no lineal, programación dinámica y programación multiobjetivos (Ramírez, 1996).

Para el caso del proyecto “Retrospectiva de las catástrofes naturales en Colombia como insumo para la construcción de un Sistema Soporte de Decisiones, fase 2: Modelo para la priorización de mecanismos de intervención en el territorio”, se propuso trabajar con modelos de programación dinámica, específicamente mediante el análisis de decisión multicriterio (MCDA), debido a que el problema que se desea resolver requiere tomar varias decisiones para optimizar una función objetivo.

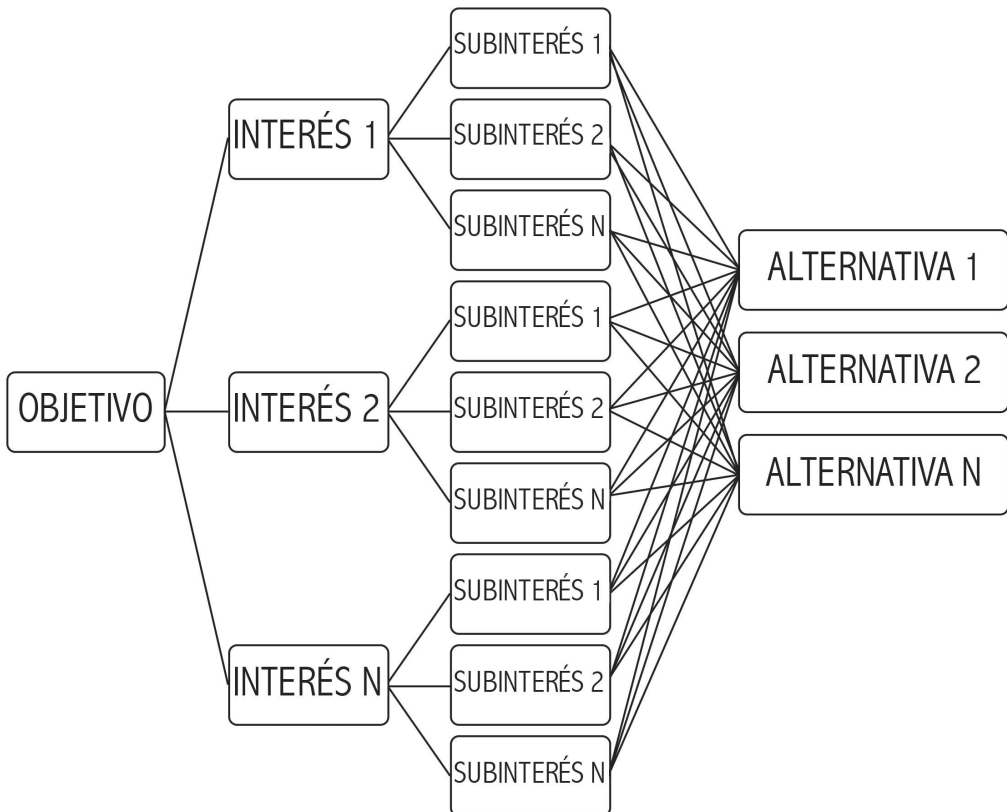
Los otros modelos no se contemplan debido a que la programación lineal implica “la linealidad” de las funciones que intervienen y todos los datos se conocen con certeza, condición que no concuerda con la necesidad frecuente de tomar decisiones con base en fenómenos asociados con la incertidumbre. El modelo entero lineal presenta, además de las limitantes del modelo lineal, la que corresponde a la integridad (cuando solo algunas de las variables exigen la integridad, el modelo se llama *mixto*), y la programación multiobjetivos no aplicaría al proyecto debido a que el objetivo principal es la priorización de mecanismos de intervención en el territorio, por lo cual no se tendrían varios objetivos por alcanzar.

El análisis multicriterio, análisis de decisión multicriterio o toma de decisiones con múltiples criterios son métodos de evaluación que analizan los problemas complejos de toma de decisiones y tratan de identificar la mejor opción teniendo en cuenta varias alternativas, por medio de la división del problema en pequeñas partes, el análisis de cada una de ellas y luego su integración para dar la solución general (Hajkowicz y Higgins, 2008). La metodología MCDA puede ser vista como un proceso no lineal

recursivo que consta de cuatro pasos: a) estructuración del problema de decisión, b) articulación y modelación de las preferencias, c) agregación de las alternativas de evaluación (preferencias) y d) formulación de recomendaciones (Guitouni y Martel, 1998).

Los problemas MCDA se componen de un objetivo o meta, la persona o el grupo que toma la decisión, las diferentes alternativas, los criterios de evaluación (intereses) y los resultados o las consecuencias asociadas a la combinación de cada alternativa o interés (Hajkowicz y Higgins, 2008). Con esta información se construye gráficamente el *framework* del proyecto, el cual permite observar y entender las relaciones entre el objetivo general, los intereses que se consideran importantes para la decisión, los subintereses (puede que existan o no) y las alternativas disponibles para esto. El *framework* en mención se puede observar en la figura 2.

Figura 2. *Decision framework*



Fuente: autores.

El siguiente paso es calificar o valorar cada una de las alternativas por parte de expertos (cada uno de ellos evalúa y da su calificación). Existen dos escalas comúnmente utilizadas en los métodos MCDA para realizar este procedimiento: una escala relativa o cualitativa y una ordinal o cuantitativa. Posteriormente, los *stakeholders* o actores del proyecto dan su valoración a cada uno de los intereses o subintereses (p. e., en importancia, orden o jerarquía, y peso) dentro de escalas definidas.

Una vez se realice el procedimiento anterior, los pesos se combinan con la matriz de evaluación para obtener una valoración o un puntaje total para cada una de las opciones de decisión (Hajkowicz y Higgins, 2008). Actualmente, hay disponibles numerosas técnicas para dar el peso o la valoración a cada una de las opciones y de los criterios, las cuales son utilizadas para resolver problemas MCDA (Figueira y Greco, 2005).

Muchas aplicaciones de MCDA concluyen que su valor principal no es en la obtención de la "respuesta", sino mejorar la transparencia, la estructuración del problema y el aprendizaje en la toma de decisiones. El concepto de MCDA como "caja de cristal", no de "caja negra", sugiere que se pueden entender mejor las relaciones y apreciar las consecuencias de una preferencia o una posición de una alternativa frente a otra (Hajkowicz, 2007). Adicionalmente, la idea de la solución óptima se abandona por la noción de la satisfacción del tomador de decisiones (Guitouni y Martel, 1998).

En la literatura sobre este tipo de problemas se encuentran abordados, en el plano macro, tres tipos de situaciones problemáticas: a) selección de la mejor alternativa, b) clasificación de las alternativas existentes de la mejor a la peor y c) clasificación de las alternativas en grupos homogéneos (Acosta, Díaz y Anaya, 2009). Los problemas MCDM son comúnmente categorizados como continuos o discretos, dependiendo del dominio de las alternativas (Hwang, 1981), y se clasifican en:

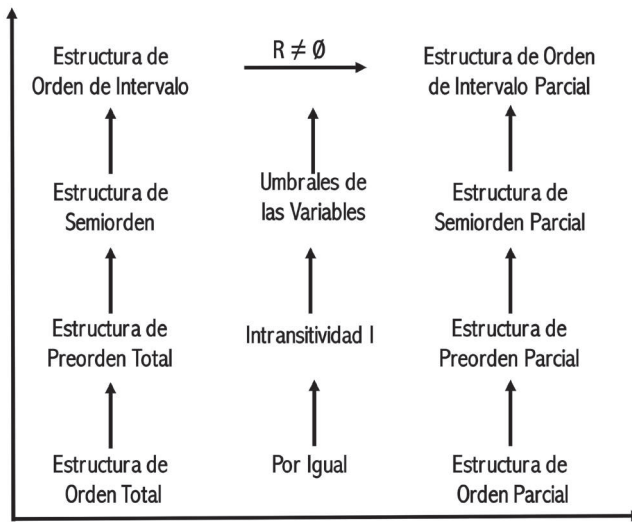
- a. *Múltiple Attribute Decision Making (MADM)*. Son discretos, usualmente limitados en el número de alternativas y requieren una inter- e intracomparación de atributos.
- b. *Multiple Objective Decision Making (MODM)*. Los valores de las variables de decisión pueden ser determinados en un dominio entero o continuo, de opciones infinitas o de un gran número, para satisfacer mejor las restricciones, preferencias o prioridades del tomador de decisiones (Zanakis et al., 1998).

Las técnicas de MCDA se pueden dividir en algoritmos de *outranking* y métodos basados en pesos; adicionalmente, estas técnicas se pueden combinar, dependiendo de la naturaleza del problema, para abordar un objetivo común (Hajkowicz, 2007). El desarrollo de estos métodos ha sido motivado no solo por una variedad de problemas de la vida real que requieren la consideración de múltiples criterios, sino también por el deseo de proponer técnicas de toma de decisiones mejoradas, utilizando los últimos avances en la optimización matemática, la computación científica y la tecnología computacional (Behzadian et al., 2010).

### Métodos de ranking o outranking

El enfoque de los métodos de *outranking* conduce a diferentes estructuras de orden, en función de las relaciones consideradas de preferencia, las hipótesis acerca de las propiedades de estas relaciones (p. e., transitividad) y el uso de umbrales (veto, preferencias, etc.). La figura 3 muestra las diferentes estructuras de preferencia de estos métodos; en ella, los ejes indican la creciente complejidad de la estructura de preferencia (Guitouni y Martel, 1998).

Figura 3. Complejidad de las estructuras de preferencia



Fuente: Guitouni y Martel [1998].

A continuación, se mencionan algunos de estos métodos:

*Suma ponderada (Weighted summation o WS)*. Es el método MCA más comúnmente aplicado. Este implica la transformación de las medidas de rendimiento en unidades adecuadas, multiplicadas por criterios de pesos, que luego son sumadas para alcanzar una puntuación general para cada proyecto. Janssen (2001) sostiene que, aunque computacionalmente el método es sencillo, la suma ponderada a menudo proporcionará una solución fiable y factible al problema.

*Ordenamiento lexicográfico*. Este trata de clasificar los proyectos contra el criterio más importante. Si se logra una clasificación completa, entonces ese es el resultado; de lo contrario, los proyectos vinculados a una posición específica se clasifican con el segundo criterio más importante, y así sucesivamente hasta que se establezca un orden completo o hasta que todos los criterios se agoten.

*Electre (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité)*. Análisis de concordancia-discordancia. Este enfoque fue desarrollado por Roy (1968) y es aplicable a problemas de gestión ambiental (Hajkowicz, 2007). Una adaptación se realizó en el estudio de Munda,

Nijkamp y Rietveld (1995) para evitar la necesidad de que los tomadores de decisiones especifiquen un umbral de concordancia o discordancia. Este método implica la comparación de cada par de proyectos para calcular una puntuación global de desempeño. Fue el primer método en incorporar la naturaleza difusa de la toma de decisiones mediante el uso de umbrales de indiferencia y preferencia; el umbral de indiferencia ( $q$ ) y el valor umbral de preferencia ( $p$ ) se definen para un criterio determinado  $g$  (Gilliams et al., 2005):

$$|g(a) - g(b)| \leq q$$

La alternativa  $a$  es indiferente a la alternativa  $b$  y  $b$  a  $a$  para el criterio  $g$ .

$$g(a) - g(b) > p$$

La alternativa  $a$  es preferible a la alternativa  $b$  para el criterio  $g$ .

Un tercer valor importante para esta técnica es el umbral de veto ( $v$ ) y se define como:

$$g(b) > g(a) + v$$

La alternativa  $a$  no es tan buena como la alternativa  $b$  el criterio  $g$ .

Cuando se especifican valores para el umbral y un peso para cada criterio, se puede derivar una clasificación de alternativas. Es fundamental no generar compensatorios; es decir, una mala puntuación en un criterio no puede ser compensada por un buen resultado en otra. Las clasificaciones resultantes no son transitivas y por lo general el resultado es de orden parcial.

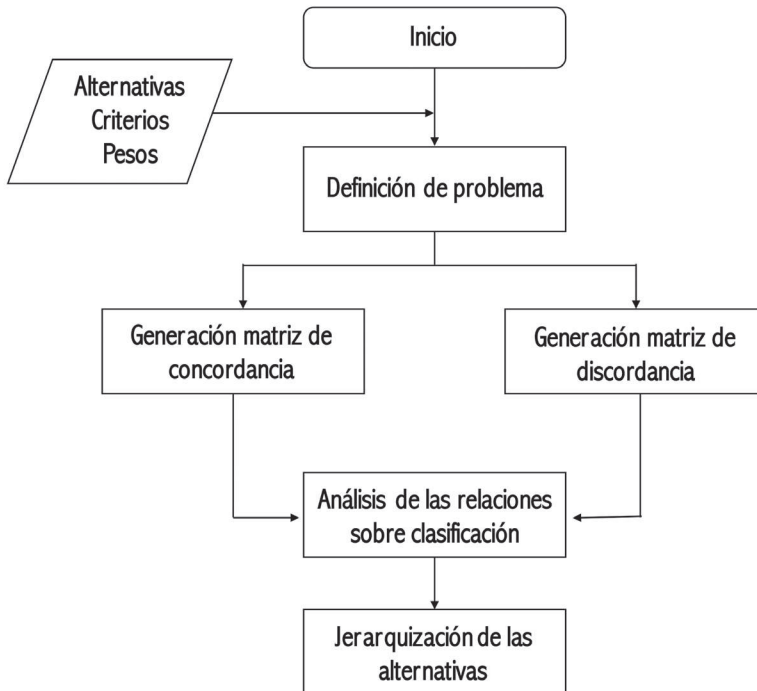
En el proceso que se debe realizar al momento de emplear este modelo o técnica, es necesario tener en cuenta seis pasos necesarios para al final tener una jerarquización de alternativas, los cuales son: a) definición del problema, b) llenado de la matriz alternativas-criterios, c) generación de la matriz de concordancia, d) generación de la matriz de discordancia, e) análisis de las relaciones de sobre clasificación y f) jerarquización de las alternativas. La figura 4 presenta el diagrama de funcionamiento de Electre.

Se debe identificar cuáles van a hacer las alternativas, qué es un conjunto finito y los criterios de evaluación con los que se pretende priorizar cada una de las alternativas, donde las alternativas son las filas de la matriz y los criterios, las columnas, obteniendo la matriz de alternativas-criterios de  $N \times M$ .

*Pesos asociados a cada uno de los criterios y sus escalas de medición cualitativa o cuantitativa.* Hay que recordar que no todos los criterios necesariamente tienen el mismo peso específico para el decisor, por lo que habrá que asignarles un valor; asimismo, no todos los aspectos pueden ser medidos con una misma escala y, en consecuencia, también pueden tener diferentes rangos.

Generación de la matriz de concordancia (medida ordinal). Teniendo las evaluaciones de la matriz de alternativas-criterios, se construye la matriz de concordancia, la cual expresa qué tanta preferencia hubo en las evaluaciones de las alternativas con base en los criterios establecidos.

Figura 4. Diagrama de flujo de funcionamiento de Electre



Fuente: autores.

La concordancia se realiza con la siguiente regla: las evaluaciones serán comparadas por pares para cada uno de los criterios; para dos opciones  $ak$ , al que son evaluadas por medio del criterio  $Ij$ , preferimos la alternativa  $ak$  sobre la alternativa  $al$ , si y solo si  $ekj(ak) \geq elj(al)$ .

La concordancia se calcula con esta expresión:

$$C_{Kj} = \frac{\sum_{j=1}^n \prod_{kl} W_j}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad [1]$$

Donde  $W_j = (W_1, W_2, \dots, W_n)$  es el vector de pesos que refleja la importancia o el peso específico de cada criterio de evaluación.  $I_{kl}$  es un parámetro de impacto: será 1 si  $ek_j \geq el_j$ , será 0 si  $el_j > ek_j$ . Realizando lo anterior se genera la matriz de concordancia  $C = c(ak, al)$ , que consiste de  $M$  filas y  $N$  columnas. Los elementos de la matriz  $C$  son  $C_{kl}$ .

A partir de los datos de la matriz de alternativas-criterios se construye la matriz de discordancia. Esta matriz expresa qué tanta indiferencia hubo en las evaluaciones de las alternativas con base en los criterios establecidos. La discordancia se realiza con la siguiente regla: se considera desacuerdo al mayor rango relativo que no está en concordancia con la hipótesis de que  $ak$  es preferida a  $al$ . Esto es, que  $I_{kl} = 0$ .

Finalmente, después de realizar varios análisis de sensibilización con diversas parejas de parámetros  $p$  y  $q$ , y teniendo varias gráficas paramétricas asociadas a cada uno de los análisis, se hace una conjunción de ellos y se jerarquizan las alternativas, expresándose en una gráfica síntesis.

Existen otros métodos como Oreste, Regime y Melchior, los cuales están basados en los mismos conceptos que Electre (Guitouni y Martel, 1998).

*Evamix*. Desarrollado por Voogd (1982), este método separa los datos cardinales y ordinales en la matriz de desempeño, aplicando algoritmos adecuados para cada nivel de medición. *Evamix* hace comparaciones por pares y combina las puntuaciones ordinales y cardinales para alcanzar una puntuación general de desempeño (Hajkowicz, 2007).

*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (Promethee)*. La familia de métodos de *outranking* de Promethee incluye Promethee I para la clasificación parcial de las alternativas y Promethee II para la clasificación completa de las alternativas. Estas fueron desarrollados por Brans en 1982 (Behzadian et al., 2010). Promethee II es similar a Electre III y tiene por objeto proporcionar una clasificación completa de un conjunto finito de alternativas viables, desde la mejor a la peor. El principio básico de Promethee II se basa en una comparación de pares de alternativas a lo largo de cada criterio reconocido; las alternativas son evaluadas de acuerdo con diferentes criterios, que tienen que ser maximizados o minimizados. En este método se utiliza una función que refleja el grado de ventaja de una alternativa frente a otra, junto con el grado de desventaja que tiene el mismo conjunto de criterios con respecto a la otra alternativa.

Comprende dos fases: la construcción de una relación *outranking* y la evaluación de esta relación; para cada criterio, se deben establecer los pesos y una función de preferencia. Estos pesos se entienden como un indicador aproximado de importancia relativa. La función de preferencia expresa la importancia de las diferencias relativas entre las alternativas, para un determinado criterio por el tomador de decisiones (Gilliams et al., 2005).

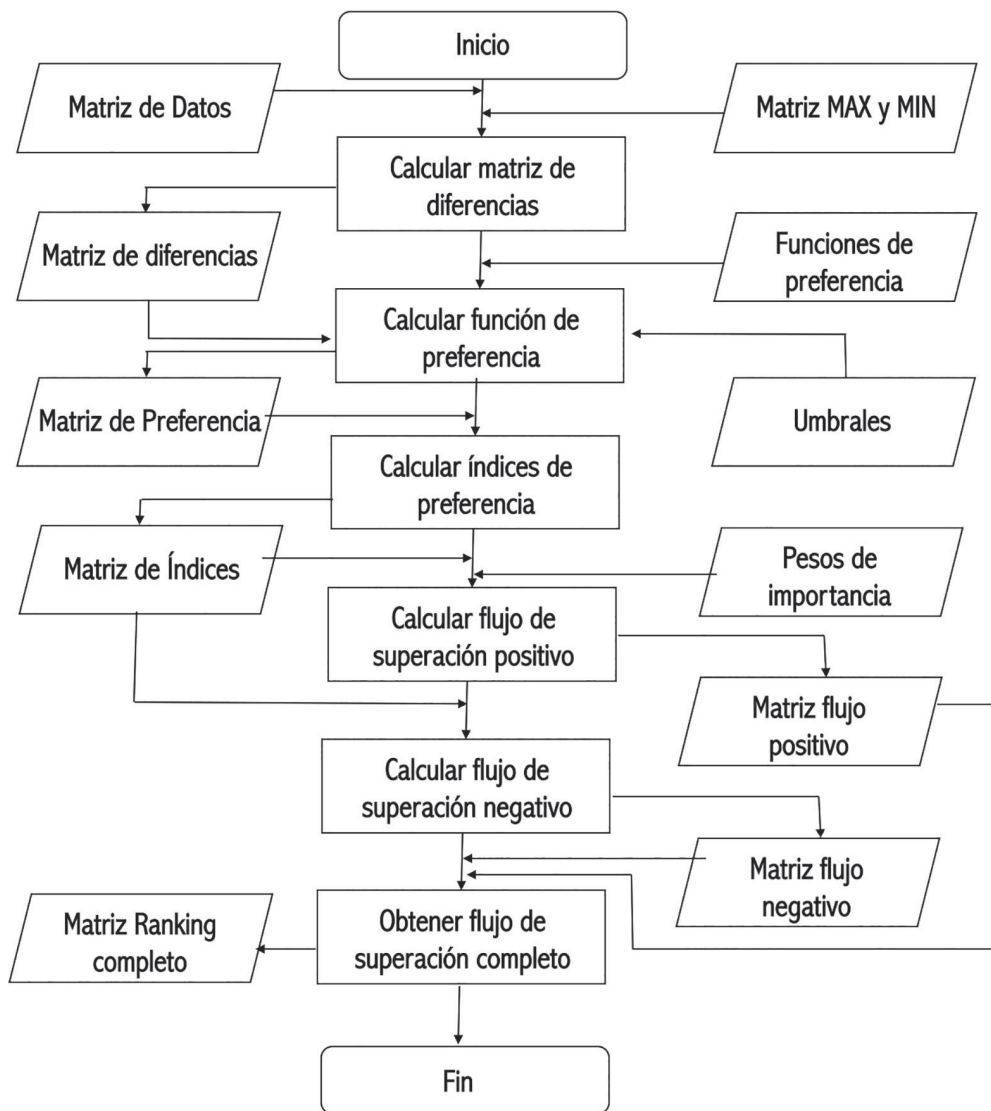
Para poder hacer uso del modelo Promethee, se debe tener en cuenta que es necesario tener siete tipos de datos, los cuales van a alimentar el modelo en cada una de sus etapas, a saber:



- a. *Calcular la matriz de diferencias.* Se realiza una comparación de datos por pares, contrastando una fila de la matriz con todas las demás. En esta parte se debe tener en cuenta si cada una de las variables  $m$  se van a maximizar o minimizar.
- b. *Calcular la función de preferencia.* En esta etapa se usa la matriz de diferencias y se aplica uno de los seis criterios de preferencia para cada una de las columnas de la matriz o variables  $m$ . Se debe tener en cuenta que el valor  $0$  significa que el dato es indiferente y que  $1$  es un valor estrictamente preferente.
- c. *Calcular los índices de preferencia.* Es aquí cuando se hace uso de los pesos o niveles de importancia ya establecidos por el decisor; el procedimiento por realizar consiste con tomar la matriz de preferencia y multiplicar cada uno de los datos por el valor de cada peso asignado.
- d. *Calcular el flujo de superación positivo.* Se crea un arreglo a partir de los valores de la matriz de índices de preferencia, sumando los valores de cada una de las filas de la matriz y colocando el valor de la sumatoria en cada uno de las dimensiones del arreglo.
- e. *Calcular el flujo de superación negativo.* Se crea un arreglo a partir de los valores de la matriz de índices de preferencia, sumando los valores de cada una de las columnas de la matriz y colocando el valor de la sumatoria en cada uno de las dimensiones del arreglo.
- f. *Obtener el flujo neto de superación o ranking completo.* Se obtiene de realizar una preorden a la resta del flujo positivo menos el flujo negativo, tras lo cual se obtiene un arreglo de la cantidad de alternativas y su valor respecto al proceso de decisión que se ha de tomar según lo concierne el modelo Promethee II, donde se dice que todas las alternativas son comparables y que la información resultante puede ser discutible, ya que se pierde información si se consideran solo las diferencias.

En la figura 5 se observa el procedimiento del método Promethee.

Figura 5. Diagrama de flujo funcionamiento Promethee



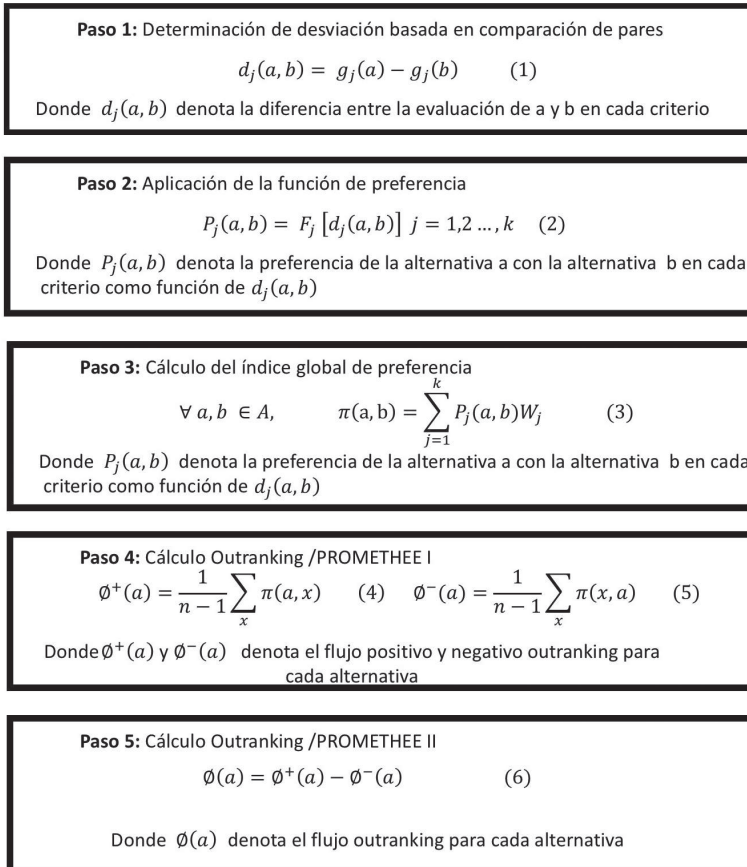
Fuente: autores.

Promethee II cuenta con seis funciones de preferencia diferentes (Brans y Vincke, 1985): a) criterio habitual, b) criterio en forma de U, c) criterio en forma de V, d) criterio de nivel, e) en forma de V con indiferencia del criterio y f) criterio de Gauss (Behzadian et al., 2010).

Para cada criterio,  $q$  es el valor de un umbral de indiferencia;  $p$  es el valor de un umbral de preferencia estricta y  $s$  es el valor intermedio entre  $p$  y  $q$ . La figura 6 presenta el procedimiento paso a paso para la aplicación de Promethee II. El procedimiento

inicia determinando las desviaciones sobre la base de comparaciones por pares; posteriormente, se utiliza una función de preferencia correspondiente a cada criterio; en el paso 3 se realiza el cálculo del índice de preferencia global; en el paso 4 se efectúa el cálculo de los flujos de *outranking* positivos y negativos para las alternativas y se realiza la clasificación parcial. El procedimiento finaliza con el cálculo del flujo *outranking* neto para cada alternativa y la clasificación completa (Behzadian et al., 2010).

Figura 6. Procedimiento Promethee



Fuente: autores.

Un tomador de decisiones seleccionará una función de preferencia (tipo 1) cuando una alternativa  $a$  es preferible sobre  $b$ , tan pronto como su diferencia relativa es mayor que 0. Un tomador de decisiones seleccionará una función tipo 5 cuando la alternativa  $a$  se prefiere sobre la  $b$ , si la distancia entre las alternativas es mayor que el valor de preferencia  $p$ . Las dos alternativas son indiferentes si su diferencia es menor que el índice de indiferencia  $q$ . Cuando la función de preferencia sigue una curva de Gauss, se debe aplicar la función tipo 6 y se debe definir el valor  $s$  de umbral gaussiano (Gilliams et al., 2005).

Años más tarde surgieron varias versiones de este método, como Promethee III, que realiza una clasificación basado en intervalos; Promethee IV, el cual realiza la clasificación completa o parcial de las alternativas cuando el conjunto de soluciones viables es continua; Promethee V, utilizado para problemas con restricciones de segmentación; Promethee VI, para la representación del cerebro humano (Brans y Vincke, 1985); Promethee GDSS, para un grupo tomador de decisiones, y el módulo visual interactivo GAIA (*Geometrical Analysis for Interactive Aid*), utilizado para la representación gráfica. Figueira y Greco (2005) han propuesto recientemente dos enfoques extendidos de Promethee: Promethee TRI, para tratar problemas de ordenamiento, y Cluster Promethee, para la clasificación nominal (Behzadian *et al.*, 2010).

## **Métodos basados en pesos**

### **Análisis jerárquico de procesos**

También conocido como Analytic Hierarchy Process (AHP). En menos de una década desde su introducción (Saaty, 1980), AHP ha encontrado su camino en varias áreas de decisión. Este método compara las alternativas por pares, a partir de lo cual encuentra una clasificación completa de las alternativas y proporciona una visión general de las complejas relaciones entre los elementos de decisión (es decir, los criterios y las alternativas), estructurándolos en jerarquías.

Un paso importante en este método es la construcción de una matriz de evaluación para cada criterio, donde los valores de los atributos de las diferentes alternativas se comparan entre sí mediante pares. Cada comparación se basa en una escala verbal o numérica (que varía de uno a nueve). Aunque los atributos cualitativos pueden ser clasificados por medio de la escala verbal AHP, una gran debilidad de la técnica AHP original es que no hay evaluaciones independientes producidas debido a las comparaciones por pares. La inclusión de nuevas alternativas y criterios exige la repetición de la comparación por pares, para restablecer el orden de clasificación, y resulta en una pérdida de información convertir los datos cuantitativos en una escala de juicio de uno a nueve. Algunos de estos problemas pueden ser resueltos cuando se implementa la técnica de calificación de atributos múltiples simples (SMART) (Gilliams *et al.*, 2005).

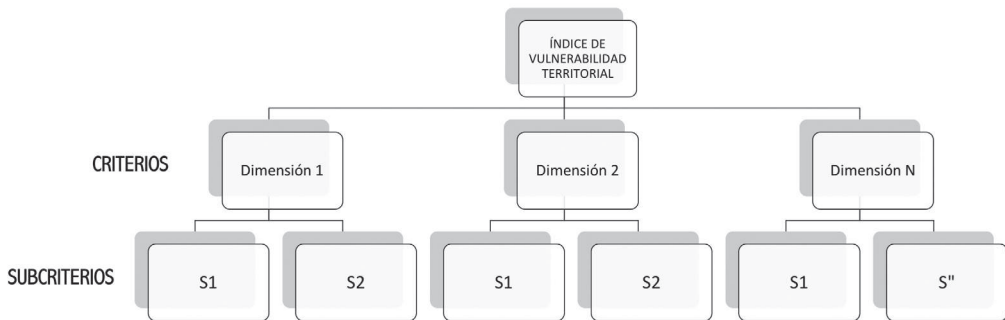
Esta metodología se compone de tres etapas fundamentales: la primera comienza con la construcción de la jerarquía que representa el problema; la segunda incorpora los juicios que reflejan las preferencias de los actores participantes en el proceso de resolución; la tercera etapa proporciona la prioridad de las alternativas comparadas. Una vez constituida la estructura jerárquica del problema, el siguiente paso es la valoración de los elementos (García, 2010).

El índice de vulnerabilidad territorial se calculó realizando una subdivisión en criterios, los cuales correspondían a cada una de las dimensiones del territorio, en tanto los datos asociados como indicadores o variables de la dimensión territorial se subdividieron en subcriterios. Esta estructura se puede observar en la figura 7.

Por cada dimensión se construye una matriz cuadrada, de manera tal que se realice un emparejamiento de subcriterios; posteriormente se realiza una comparación pareada en la que se indica qué tan importante es un subcriterio frente al otro de acuerdo con la escala de Saaty (1990). Luego la matriz se normaliza dividiendo cada elemento  $i, j$  entre la sumatoria total de su respectiva columna.

Tras obtener la matriz normalizada, se calcula la prioridad relativa de cada uno de los elementos comparados, promediando cada una de las filas de la matriz normalizada. La prioridad de los criterios se determina en función del objetivo y tienen los valores más grandes; posteriormente, se realizarán las matrices de comparaciones de los subcriterios que están relacionados con un determinado criterio. Se obtienen las prioridades relativas de cada subcriterio, y para determinar cómo afectan al objetivo, se multiplicará la prioridad de cada subcriterio por la prioridad del criterio correspondiente.

Figura 7. Estructura jerárquica para la identificación del índice de vulnerabilidad territorial



Fuente: autores.

Finalmente, para calcular el índice de vulnerabilidad territorial, se selecciona la variable con mayor peso o valor dentro de cada dimensión. En la figura 8 se puede observar un resumen de los principales métodos de MCDA y su descripción (Guitouni y Martel, 1998). En la práctica, muchos analistas e investigadores son incapaces de justificar claramente su elección de un método MCDA en lugar de otro. En general, esta elección está motivada por una especie de familiaridad y afinidad con un método específico (Guitouni y Martel, 1998).

En la vida real, un tomador de decisiones (o un analizador) frente a una situación específica intenta, en primer lugar, comprenderla y estructurarla. Este paso incluye la determinación y la evaluación de los grupos de interés (*stakeholders*), la emergencia de la decisión, las diferentes alternativas, las consecuencias, los aspectos importantes (criterios), la calidad y la cantidad de la información, etc.

En general, ni las alternativas ni los criterios son conocidos *a priori*. Entonces, dentro del conjunto de todos los métodos MCDA, se puede seleccionar (o adoptar) el método que maneje “correctamente” la situación (que no es una tarea fácil); sin embargo, esta no es siempre la forma de trabajo de los profesionales de MCDA, pues esta elección siempre está influenciada por otras consideraciones contextuales, políticas y de comportamiento del entorno (Guitouni y Martel, 1998).

Tabla 3. Resumen de los principales métodos de MCAP y su descripción

MCAP	DESCRIPTION OF THE MCAP
<b>Elementary methods</b>	
Weighted sum	The global performance of an alternative is computed as the weighted sum of its evaluations along each criterion. The global performance is used to make a choice among all the alternatives.
Lexicographic method	Based on the logic that in some DMS a single criterion seems to predominate. The procedure consists in comparing all the alternatives with respect to the important criterion, and proceed with the next on until only one alternative is left.
Conjunctive method	Alternative which does not meet the minimal acceptable level for all criteria is rejected. The minimal acceptable levels for each criterion are used to screen out unacceptable alternatives.
Disjunctive method	An alternative is selected on the basis of its extreme score on any one criterion. Desirable levels for each attribute are used to select alternatives which equal or exceed those levels on any criterion.
Maximin method	The overall performance of an alternative is determined by its weakest or poorest evaluation.
<b>Single synthesizing criterion</b>	
TOPSIS (technique for order by similarity to ideal solution)	The chosen alternative should have the profile which is the nearest (distance) to the ideal solution and farthest from the negative-ideal solution.
MAVT (multi-attribute value theory)	Aggregation of the values obtained by assessing partial value functions on each criterion to establish a global value function V. Under some conditions, such V can be obtained in an additive, multiplicative or mixed manner.
UTA (utility theory additive)	Estimate the value functions on each criterion using ordinal regression. The global value function is obtained in an additive manner.
SMART (simple multi-attribute rating technique)	Simple way to implement the multiattribute utility theory by using the weighted linear averages, which give an extremely close approximations to utility functions. There are many improvements like SMART and SMARTER.
MAUT (multi-attribute utility theory)	Aggregation of the values obtained by assessing partial utility functions on each criterion to establish a global utility function U. Under some condition, U can be obtained in an additive, multiplicative or distributional manner.
AHP (analytic hierarchy process)	Converting subjective assessments of the relative importance into a set of weights. This technique applies the decomposition, the comparative judgments on comparative elements and measures of relative importance through pairwise comparison matrices which are recombined into an overall rating of alternatives.
EVAMIX	Two dominance indexes are calculated: one for ordinal evaluations and the other one for cardinal evaluations. The combination of these two indexes leads to a measure of the dominance between each pair of alternatives.
Fuzzy weighted sum	These procedures use $\alpha$ -cut technique. The $\alpha$ level sets are used to derive fuzzy utilities based on the simple additive weighted method.
Fuzzy maximin	This procedure is based on the same principle as the standard maximin procedure. The evaluations of the alternatives are fuzzy numbers.
<b>Outranking methods</b>	
Electre I	The concept of outranking relationship is used. The procedure seeks to reduce the size of nondominated set of alternatives (kernel). The idea is that an alternative can be eliminated if it is dominated by other alternatives to a specific degree. The procedure is the first one to seek to aggregate the preferences instead of the performances.
Electre IS	This procedure is exactly the same as Electre I, but it introduces the indifference threshold.

**Tabla 3. Resumen de los principales métodos de MCAP y su descripción [continuación]**

MCAP	DESCRIPTION OF THE MCAP
Electre II	Electre II use two outranking relations (strong and weak).
Electre III	The outranking is expressed through a credibility index index.
Electre IV	This procedure is like Electre III but did not use weights.
Electre TRI	This procedure is like Electre III and use the conjunctive and disjunctive techniques to affect the alternatives to the different categories (ordered).
Promethee I	Promethee I is based on the same principles as Electre and introduces six function to describe to describe the DM preferences along each criterion. This procedure provides a partial order of the alternatives using entering and leaving flows.
Promethee II	Promethee II is based on the same principles as Promethee I. This procedure provides a total preorder of the alternatives using an aggregation of the entering and leaving flows.
Melchior	Melchior is an extension of Electre IV.
Oreste	This procedure needs only ordinal evaluations of the alternatives and the ranking of the criteria in term of importance.
Regime	A pairwise comparison matrix is built using +1 if there is dominance, 0 if the two alternatives are equivalent and -1 for the negative-dominance. The aggregation of these weighed scores provides a total preorder of the alternatives.
NAIADE (novel approach to imprecise assessment and decision environments)	This procedure uses a distance semantics operators to assess the pairwise comparisons among alternatives. The fuzzy evaluation is transformed in probabilities distributions and as Promethee, this procedure compute entering and leaving flows.
<b>Mixed methods</b>	
QUALIFLEX	This procedure uses a successive mutation to provide a ranking of the alternative corroborating with the ordinal information
Fuzzy conjunctive disjunctive method	When data are fuzzy, the match between values and standard levels provided by the DM and the evaluations becomes vague and matter of degree. The degree of matching is computed using the possibility measure and the necessity measure. The alternatives with the highest degree of matching are considered the best.
Martel and Zara method	This procedure uses the stochastic dominance to make pairwise comparison. These comparisons are used as partial preferences and an outranking relation is built based on a concordance index and discordance index.

Fuente: Guitouni y Martel [1998].

### **Análisis jerárquico de procesos difuso**

Conocido como Analitic Hierachy Process Fuzzy (AHP Fuzzy). Este método permite integrar la metodología multicriterio AHP con lógica difusa. Señalan Herrera y Osorio (2006):

*Para la toma de decisiones, los juicios emitidos por los agentes decisores con respecto a las alternativas y criterios pueden ser convertidos en números difusos para calcular la importancia de los pesos usando el AHP; estos números son usados para construir la matriz de comparación por pares del AHP.*

Por su parte, Büyüközkan y Ruan (2004) sostienen:

*Las personas encargadas de la toma de decisiones usualmente se sienten mejor presentando sus juicios como un intervalo, en vez de dar un valor puntual y fijo. Esto se debe a que él, ella o ellos son incapaces de explicar sus preferencias, dado a la naturaleza difusa de los procesos de comparación.*

La metodología de decisión multicriterio AHP realiza la comparación asignando valores discretos en una escala de uno a nueve, sin tener en cuenta la incertidumbre asociada a cualquier juicio humano; por tal razón, la teoría de conjuntos difusos permite tratar la ambigüedad en el razonamiento humano. La metodología AHP Fuzzy se implementa de manera similar al tradicional AHP, creando una jerarquía de conjuntos de datos en criterios y subcriterios; luego, para la representación difusa de juicios, se establecen intervalos, y estos se asocian a la escala de Saaty (1990).

Con base en la jerarquía construida y la escala de juicios difuso se procede a la construcción de las matrices de juicio. La jerarquía de criterios y alternativas es el objeto de comparación por pares para el AHP; después de construir la jerarquía, el equipo encargado de tomar la decisión tiene que comparar los elementos en niveles dados para estimar sus importancias relativas en relación con el elemento del nivel superior.

Para ello, se usan los números triangulares de ( $M1-M9$ ) para expresar las preferencias entre los diferentes criterios con respecto a la meta; por ejemplo, si se piensa que el elemento  $i$  es fuertemente preferido al elemento  $j$  con respecto a la meta, entonces se establece una calificación  $a_{ij} = (4, 5, 6)$ ; la comparación del elemento  $j$  con respecto al elemento  $i$  debe ser inversa para que el juicio sea consistente y se debe expresar  $a_{ji} = (1/6, 1/5, 1/4)$ . De estas calificaciones se obtiene la primera matriz de comparación por pares entre los criterios con respecto a la meta (Herrera y Osorio, 2006).

Una vez se construyen las matrices de comparación por pares, se deben hacer los cálculos de los vectores de peso para cada nivel de la jerarquía mediante el análisis extendido y los principios de comparación de números difusos.

## Casos de estudio

Para el caso de modelos aplicados a la evaluación del riesgo y gestión ambiental, se pueden observar múltiples fuentes: Álvarez-Guerra, Viguri y Voulvoulis (2009), Ananda y Herath (2009), Ascough II et al. (2008), Bac-Bronowicz y Maita (s. f.), Bailey et al. (2000), Bell, Hobbs y Ellis (2003), Burkle (2005), Calizaya et al. (2010), Chan y Kumar (2007), Chang (1996), Chen, Tao y Zhang (2009), Dwyer (2004), Fisher (2006), Garth Arnold (2012), Gilliams et al. (2005), Goumas y Lygerou (2000), Greening y Bernow (2004), Haimés (2011), Hajkowicz y Higgins (2008), Hajkowicz (2007), Hayashi (2000), Huang y Inoue (2007), Huang, Keisler y Linkov (2011), Leimbach (1996), Matthias Dorfstätter (2012), Mendoza y Martins (2006), Michel-Kerjan et al. (2012), Omidvar (2013), Orencio y Fujii (2013), Pearson et al. (2011), Pollard et al. (2008), Salminen, Hokkanen y Lahdelma (1998), Schmidlein et al. (2011), Shackley y McLachlan (2006), Tamura et al. (2000), Tzeng et al. (2002), Zabeo et al. (2011), Zahran et al. (2008), Zebardast (2013). Cada vez es más común el uso de modelos de programación dinámica; específicamente los modelos MCDA resultan de un amplio uso debido a que los



problemas que se desean resolver requieren tomar varias decisiones para optimizar una función objetivo.

Estos métodos de evaluación analizan los problemas complejos de toma de decisiones y tratan de identificar la mejor opción teniendo en cuenta varias alternativas, por medio de la división del problema en pequeñas partes, el análisis de cada una de ellas y su posterior integración para dar la solución general (Hajkowicz y Higgins, 2008).

A continuación se mencionarán algunos casos de estudio relevantes relacionados con el tema y se muestra el problema que se quería solucionar, cómo fue abordado y las conclusiones obtenidas en cada caso. Los otros casos de estudio analizados se encuentran en la introducción de este apartado y su análisis fue incorporado en la selección de los métodos y en el desarrollo del SIVT.

### ***Programa Natural Heritage Trust (NHT)***

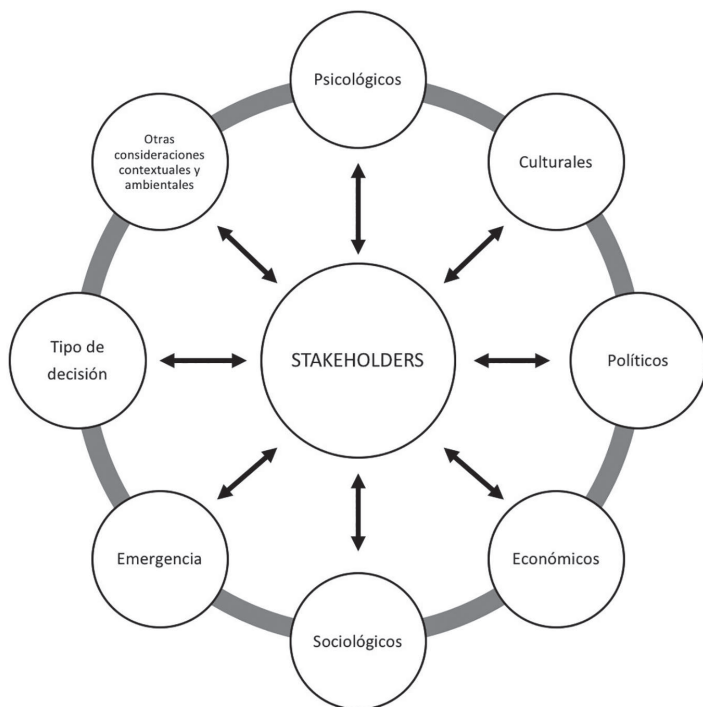
Desarrollado en Queensland, Australia, por Hajkowicz (2007). En el estudio realizado por medio de técnicas formales de MCDA participaron 55 *stakeholders* y se evaluaron los proyectos ambientales en cinco regiones alrededor de Queensland. Para este estudio se utilizaron 16 técnicas diferentes, principalmente suma ponderada, ordenamiento lexicográfico, Electre y Evamix. Se encontró que diferentes métodos MCDA producen resultados diferentes aplicados al mismo problema de toma de decisiones; esto también se evidenció en el estudio de Voogd (1983), en el cual se compararon 23 métodos cardinales y 9 métodos cualitativos, a partir de lo cual se encontró que al menos en el 40% del tiempo cada técnica produce un resultado diferente de cualquier otra técnica.

Un factor que puede originar estas variaciones se debe a las diferentes heurísticas cognitivas empleadas con MCDA y la toma de decisiones intuitiva. El campo de la psicología cognitiva ha desarrollado numerosas teorías acerca de cómo las personas toman decisiones en ausencia de un soporte de decisiones estructurado. El proceso de MCDA es un procedimiento de decisión formal que se diferencia de estas heurísticas informales (Hajkowicz, 2007).

El tomador de decisiones no siempre es coherente y racional a la hora de expresar sus preferencias; en la figura 8 se observan otras consideraciones que afectan el proceso de toma de decisiones. El tomador de decisiones (*stakeholders*) actúa dentro de un contexto de decisión, y ambos influyen mutuamente (Guitouni y Martel, 1998).

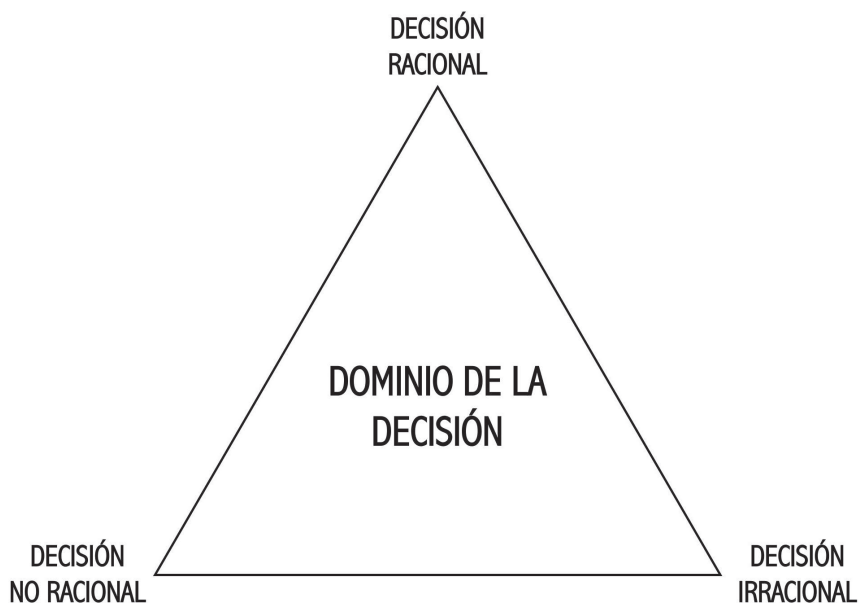
Asimismo, el dominio de la decisión puede ser considerado como una tríada (figura 9). En este marco, la decisión no es completamente racional, completamente irracional, ni completamente no racional. Una decisión racional consiste en la evaluación de todas las alternativas y elegir la que maximiza la satisfacción del tomador de decisiones o su función de utilidad; por lo tanto, lo racional está asociado tanto al proceso (análisis) como a su resultado (maximización). Generalmente, el tomador de decisiones no tiene ni el tiempo ni las habilidades para analizar todas las alternativas.

Figura 8. Aspectos que pueden afectar el proceso de toma de decisiones



Fuente: Guitouni y Martel [1998].

Figura 9. Dominios de la decisión



Fuente: Guitouni y Martel [1998].

La decisión basada en las experiencias y los conocimientos del tomador de decisiones se considera como una decisión no racional. La decisión irracional solo considera las aspiraciones personales y las aversiones (Guitouni y Martel, 1998).

Otros factores que pueden originar estas inconsistencias o diferencias son mencionados en Voogd (1983): a) las técnicas utilizan pesos diferentes en sus cálculos, b) los algoritmos difieren en su enfoque de la selección de la “mejor” solución, c) muchos algoritmos tratan de escalar los objetivos, lo que afecta los pesos ya elegidos y d) algunos algoritmos introducen parámetros adicionales que afectan a la solución elegida.

Adicionalmente, para el caso en mención se encontró que el tomador de decisiones indicó (no por unanimidad) que la calidad del proceso de decisión fue mejorada por MCDA; se resaltaron beneficios como la transparencia, el aprendizaje, la repetibilidad y la rendición de cuentas. A pesar de que la mayoría de los tomadores de decisiones informó estos beneficios, pocos estaban dispuestos a cambiar sus preferencias intuitivas después de completar el proceso de MCDA (Hajkowicz, 2007).

### **Proyecto AFFOREST**

5.º Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la UE. El objetivo principal es el desarrollo de un sistema de soporte de decisiones espacial (SDSS), capaz de proporcionar asesoramiento a las decisiones políticas y de planificación relativas a la reforestación de tierras agrícolas. Para este proyecto se utilizaron los métodos Promethee II, Electre III y AHP; se encontró que Promethee II es ligeramente mejor para el proyecto sobre la base de la facilidad de uso, la simplicidad de la estrategia del modelo, la variación de la solución y la aplicación (Gilliams et al., 2005).

### **“Promethee: a comprehensive literature review on methodologies and applications”**

Estudio realizado por Behzadian et al. (2010); se puede observar en las investigaciones que se han realizado alrededor de gestión del medioambiente por medio de MCDA. Este tema es considerado como el más popular en aplicaciones; este método y una gran cantidad de los trabajos están relacionados con este. La gestión ambiental ha cubierto varias áreas específicas, como la gestión de residuos, la valoración del ciclo de vida (ACV), la evaluación de impacto ambiental (EIA) y la planificación del uso del suelo. En la tabla 5 se pueden observar algunas investigaciones realizadas en el tema y la metodología utilizada, principalmente Promethee.

**Tabla 4. Artículos e investigaciones alrededor de la gestión ambiental**

AUTHOR (S)	SPECIFIC AREA	OTHER TOOLS/METHODOLOGIES USED
Al – Rashdan et al. (1999)	Ranking and selecting environmental projects	The Nominal Group Technique
Ayoko et al. (2003)	Ranking organization compounds with fungicidal properties	--
Ayoko et al. (2004)	To select residential houses base on air quality criteria	--
Beynon and Wells (2008)	Ranking motor vehicles based on exhaust emissions	Uncertainty Analysis
Briggs et al. (1990)	Nuclear waste management problem/ranking 27 actions	--
Carroll et al. (2004)	Ranking various soil types/wastewater treatment systems	Principal Component Analysis (PCA)
De Leener and Patijin (2002)	To select land mine detection strategies	--
Delhaye et al. (1991)	Nuclear waste management problem	--
Diakoulaki et al. (2007)	To identify investment opportunities for the exploitation of the clean development mechanism	--
Drechsler (2004)	Major issues of conservation biology/analyzing simple fictitious	Uncertainty analysis and goal conflicts
Geldermann et al. (2000)	Ranking sinter plants through Life Cycle Assessment (LCA)	Fuzzy Promethee
Geldermann and Rentz (2001)	Environmental assessment for sinter plants	Trapezoidal fuzzy intervals
Geldermann and Rentz (2005)	Ranking scenarios for the coating of PVC parts / LCA	--
Gilliams et al. (2005)	To choose among the afforestation strategies for given class of agricultural land	Geographic Information System (GIS) / goal programming technique
Hokkanen and Sakminen (1997)	The location problem of a waste treatment facility	--
Huth et al. (2005)	To evaluate tree-harvesting scenarios	Stochastic Promethee
Kangas et al (2001a)	Supporting strategic natural resources planning	Fuzzy method
Kangas et al. (2001b)	Ranking forestry strategies	--
Kapepular et al. (2007)	Households solid waste management /ranking nine areas	--
Kiker et al. (2005)	Decision – making in environmental projects	A review paper on MCDA methods including PROMETHEE
Klauer et al. (2006)	Decisions for sustainable development	Decisions under uncertainty
Le Téo and Mareschal (1998)	To evaluate the environmental quality of building products through LCA	A new version of Promethee with interval criteria/fuzzy theory
Le Téo (1999)	LCA	PCA/non-parametric bootstrapping
Linkov et al. (2006a)	Ranking contaminated sediment management technologies	A review on MCDA for sediment management
Linkov et al. (2006b)	Environmental risk assessment and decision-making strategies/he New York/ New Jersey harbor as a case study	A review on MCDA applications for contaminated site management
Margeta et al. (1990)	Ranking wastewater disposal alternatives	--
Marinoni (2006)	Land-use suitability assessment	An iterative approach/GIS
Martin et al. (1999)	Land use planning and management	GIS
Marin et al. (2003)	The environmental impact assessment (EIA) / ranking site to build bus station	Fuzzy Promethee I and II
Mavrotas et al. (2006a)	To evaluate strategies for reducing atmospheric pollutants	--
Mergias et al. (2007)	To select the best scheme for End-of-Life Vehicles (ELVs)	--
Moffett and Sarkar (2006)	Biodiversity conservation planning	A taxonomy of MCDM methods including Promethee
Palma et al. (2007)	To evaluate performance of silvoarable agroforestry	--
Petras (1997)	Ranking the sites for radioactive waste disposal facilities	--
Queiruga et al. (2008)	Ranking the alternatives location for installation of recycling plants (to recycle waste electrical and electronic equipment)	--

**Tabla 4. Artículos e investigaciones alrededor de la gestión ambiental [continuación]**

AUTHOR (S)	SPECIFIC AREA	OTHER TOOLS/METHODOLOGIES USED
Rogers et al. (2004)	Ranking contaminated sediment management technologies	--
Rousis et al. (2008)	Ranking alternative management system for the waste from electrical and electronic equipment constitutes	--
Salminen et al. (1998)	To analyze four different real applications to environment problems in Finland	--
Sarkis (2000)	The location problem of a waste treatment facility	--
Settle et al. (2007)	Ranking the combined North Lakes and Cabbage tree samples to determine the water quality behaviour	PCA/Partial Least Squares (PLS)
Spengler et al. (1998)	Ranking recycling measure in the iron and steel making industry/ LCA	KOSIMEUS: a simulation and decision support system model
Vaillancourt and Waaub (2002)	Ranking waste management facilities	Mixed integer linear programming
Vaillancourt and Waaub (2004)	Ranking regions or countries in order to allocate the greenhouse gases emission rights	A dynamic multi-criterion model
Vego et al. (2008)	Ranking solid waste management alternatives	--
Vuk et al. (1991)	The location problem for disposal of communal waste	--
Walther et al. (2008)	To evaluate municipalities for the installation of recycling facilities	--
Yan et al. (2007)	Ranking municipal sewage treatment plant projects	--

Fuente: Behzadian et al. [2010].

En este documento se observan las investigaciones que se han realizado alrededor de temas hidrológicos y tratamiento de aguas a través de Promethee. En la tabla 6 se sintetiza esta información.

En este estudio se obtuvo que de los 195 documentos analizados que aplicaban Promethee para la toma de decisiones, 47 eran de gestión del medioambiente, lo que equivale al 24,1% (ocupando el primer lugar), y en tercer puesto se encontraba el tema de hidrología y tratamiento del agua, con 28 artículos relacionados, lo que equivale al 14,4% de la muestra. Adicionalmente, en este mismo estudio se obtuvo que la mayoría de las investigaciones eligen este método frente a AHP, Electre III y SMART, por motivos como la facilidad de uso, la simplicidad de la estrategia del modelo, la variación de la solución y la aplicación (Behzadian et al., 2010).

Además, los principales desastres abordados son terremotos (en mayor medida), inundaciones, reforestación, calentamiento global y contaminación ambiental, como se puede observar en las siguientes fuentes: Michel-Kerjan et al. (2012), Salminen, Hokkanen y Lahdelma (1998), Gilliams et al. (2005), Zebardast (2013), Leimbach (1996), Linkov et al. (2006), Fisher (2006), Bac-Bronowicz y Maita (s. f.), Schmidtlein et al. (2011), Tamura et al. (2000), Tzeng et al. (2002), Dwyer (2004), Zabeo et al. (2011), Zahran et al. (2008) y Omidvar (2013).

**Tabla 5. Artículos e investigaciones alrededor de la hidrología y el tratamiento de aguas**

AUTHOR (S)	SPECIFIC AREA	OTHER TOOLS/METHODOLOGIES USED
Abu-Taleb and Mareschal (1995)	To rank and select water resources development options	--
Al-Kloub and Abu-Taleb (1988)	To rank the co-riparians/water rights and water sharing	
Al-Shemmeri et al. (1997)	Ranking of water development projects	
Ayoko et al. (2007)	Ranking the quality of the water bodies	PCA/PLS
Chou et al. (2004)	To determine depression outlet location and flow direction in digital terrain model	A depression watershed method
Chou et al. (2007)	Ranking embankment types (ecotechnology models) located in Shihmen reservoir watershed	Fuzzy theory/GIS
Hajkowicz and Collins (2007)	Water resource management	A review of multiple criteria analysis
Hajkowicz and Higgins (2008)	Six water resource management decision problems	
Hermans et al. (2007)	Ranking river management alternatives	Conjoint analysis
Hermans and Erickson (2007)	To facilitate decision making at the watershed scale	A review of MCDA techniques
Hyde and Maier (2006)	Sustainable water resource development problem	Stochastic uncertainty analysis and distance–base uncertainty analysis
Khelifi et al. (2006a)	To select groundwater remediation technologies	
Mahmoud and Garcia (2000)	Evaluating alternatives for the operation of a diversion dam	--
Morais and Almeida (2006)	The planning of actions in water supply systems	Group decision-making
Morais and De Almeida (2007)	Ranking alternative strategies of water network to reduce leakage	
Opricovic and Tzeng (2007)	Ranking alternative hydropower systems on the river	--
Ozelkan and Duckstein (1996)	Ranking water resources projects (hydropower plants)	PCA
Pillai et al. (1996)	To select the best alternative plan in irrigation development strategies	
Pundez et al. (2002)	Evaluating strategies of sustainable water management	--
Raju and Pillai (1999a)	To select the best reservoir configuration for river basin	Spearman rank correlation
Raju and Pillai (1999b)	To select the best alternative in irrigation development strategies	Taguchi experimental method/stochastic Promethee
Raju and Kumar (1999)	To select the best alternative in irrigation plan	Cluster analysis and Spearman rank correlation
Raju et al. (2000)	Ranking the alternative strategies of the irrigation system	Spearman rank correlation /group decision – making.
Raju and kumar (2006)	To select the suitable irrigation planning alternatives	Data Envelopment Analysis (DEA)/ Spearman rank correlation /EXPROM.
Simon et al. (2004)	The evaluation of water management strategies	--
Simon et al. (2005)	The evaluation of water management strategies	--
Simon et al. (2006)	To evaluate eco-hydrological effects of water management strategies.	
Ulengin et al. (2001)	To select most suitable remedy for water-crossing problem	--

**Fuente:** Behzadian et al. [2010].