

# *Metodología para la selección de rutas de proyectos lineales transfronterizos incorporando múltiples criterios y decisores en los análisis de restricciones y posibilidades ambientales*

Recibido para evaluación: 26 de Abril de 2005

Aceptación: 09 de Junio de 2005

Recibido versión final: 30 de Junio de 2005

Enrique Angel S.<sup>1</sup>

Luis Fernando Cadena S.<sup>2</sup>

## RESUMEN

Se desarrolló y aplicó un esquema para seleccionar la ruta óptima ambiental para interconexiones eléctrica internacionales, en un contexto de Toma de Decisiones con múltiples objetivos y múltiples decisores. Se escogió la interconexión eléctrica para Centroamérica (SIEPAC) para hacer una evaluación prospectiva de las restricciones y posibilidades a la luz del modelo de gestión ambiental por dimensiones colombiano.

La metodología propuesta siguió estas etapas :

- Definición y homologación de la estructura de variables de restricción y criticidad ambiental
- Sectorización y selección de tramos complejos
- Definición de decisores para el análisis multiobjetivo
- Diseño y aplicación de la herramienta de consulta
- Definición y modelación de opciones con apoyo de SIG.
- Análisis de sensibilidad de alternativas de ruta y de manejo ambiental del proyecto.

Se identificaron diferentes opciones para la inserción y permanencia del proyecto, de acuerdo a los criterios de diversos grupos de interés o actores consultados : autoridades ambientales, empresas eléctricas, comunidad científica, sociedad civil.

**PALABRAS CLAVE:** Análisis Multiobjetivo, Grupos de Interés, Selección de Ruta, Superficie de Criticidad Ambiental, Sostenibilidad, Interconexión Centroamericana.

## ABSTRACT

A scheme was developed and applied to select the optimum environmental route for international cross-border line projects, in a Decision Making context involving multiple objectives and multiple decision-makers. The project studied was the Electricity Interconnection for Central America (SIEPAC) for which a prospective assessment was carried out regarding the restrictions and possibilities in the light of the Colombian environmental dimensions management model.

The methodology proposed followed these stages :

- Definition and approval of the structure of environmental restriction and criticality variables
- Sectorization and selection of complex sections
- Definition of decision-makers for multi-objective analysis
- Design and application of consultation tool
- Definition and modeling of options applying SIG.
- Sensitivity analysis of alternative routes and project's environmental management

Different options were identified for insertion and permanence of the project according to the criteria of various interest groups and actors consulted : environmental authorities, electricity companies, scientific community and civil society.

**KEY WORDS:** Multi-objective Analysis, Interest Groups, Route Selection, Environmental Criticality Surface, Sustainability, Central America Interconnection.

1. MSc. Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. M Sc Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Interconexión Eléctrica S.A.

enangel@isa.com.co

2. MSc. Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. Interconexión Eléctrica S.A.

fecadena@isa.com.co



## 1. INTRODUCCIÓN

Los proyectos de desarrollo requieren involucrar a diferentes organismos del estado, a entes de carácter privado y público, y en general a la sociedad civil, en procesos de tipo participativo para la toma de decisiones, cumpliendo con directrices, políticas y normas establecidas en el ámbito legal y constitucional de los países. Por su parte, los organismos financieros también establecen requisitos de esta índole para aprobación de préstamos.

El trabajo presentado en este artículo, basado en la investigación de Cadena y Angel (2004), se enfoca al diseño de una metodología para analizar en fases tempranas de proyectos transfronterizos, sus restricciones y posibilidades ambientales, conciliando múltiples criterios de diferentes actores de los países involucrados. Este método permite tomar decisiones para su localización, proyectando además de manera prospectiva su gestión a corto y largo plazo.

El proyecto escogido para probar esta metodología es el Sistema de interconexión eléctrica para América Central (SIEPAC), representado en la Figura 1, que consta de 1830 km. de líneas a alta tensión (230kV) y 16 Subestaciones, entre Guatemala y Panamá, previsto para iniciar operación en 2007, conjuntamente con un Mercado Eléctrico Centroamericano integrado, que tiene como objetivo, reducir los costos de electricidad y mejorar la confiabilidad del suministro, que actualmente en la región se soporta en energía térmica. Este proyecto está sujeto a requerimientos de participación y consulta pública.(BID, 2000; UICN,CCAD, 2003).

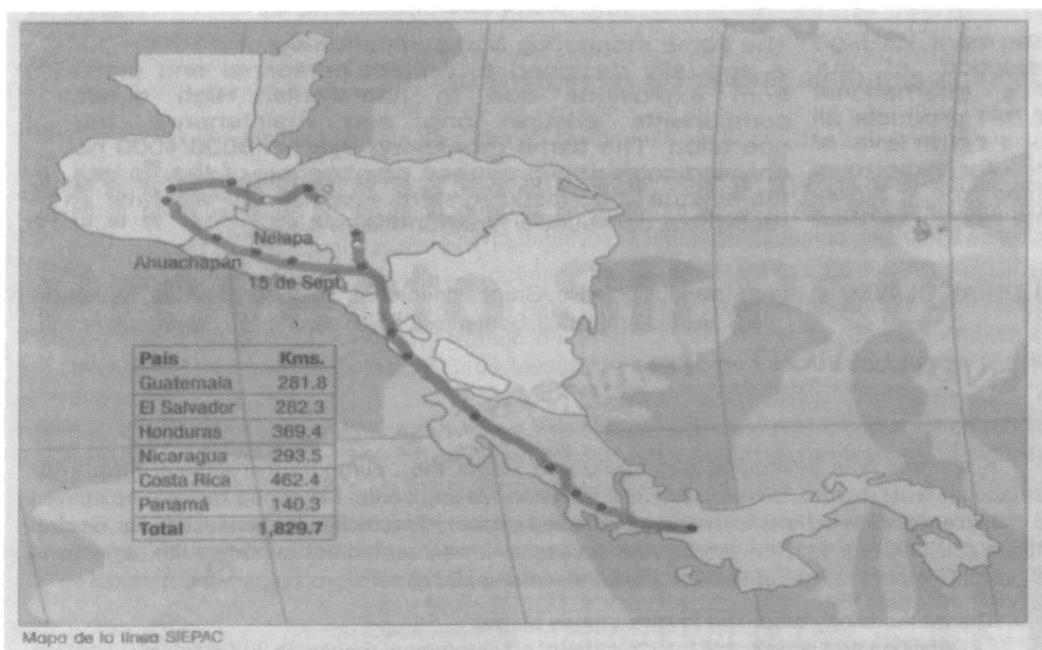


Figura 1.  
Proyecto SIEPAC

## 2. METODOLOGIA

Basada en el modelo de gestión ambiental por dimensiones (Angel., Carmona., Villegas., 1997), se cuenta con una metodología para seleccionar en fases tempranas, los corredores de ruta óptimos para proyectos de transmisión eléctrica, considerando aquellas variables que pueden hacer simple o compleja la gestión constructiva y operativa de las redes, ante el variado y dinámico entorno ambiental. Esta metodología llamada "Análisis de restricciones y posibilidades ambientales", que se denominará en adelante ARA, se ha aplicado para la expansión y selección de alternativas

de ruta de la red objetivo del sistema eléctrico colombiano (INER, 1998). Se basa en la definición para cada Dimensión Ambiental (física, biótica, económica, cultural y política), de restricciones y niveles de criticidad, que combinados mediante un álgebra de mapas con apoyo de herramientas de SIG, y con la asignación de ponderaciones para cada una de las dimensiones, determinan una "superficie síntesis de costos ambientales", por la cual se selecciona la ruta de menor costo ambiental entre 2 puntos. *Factores de Restricción Ambiental* son aquellos que impiden la implementación de proyectos y *Factores de criticidad ambiental*, los que la dificultan en grados variables. Los criterios para calificar estos factores, se relacionan con el marco legal, con la amenaza desde el proyecto al ambiente y viceversa y con la complejidad técnica para la implementación del proyecto. Con estos criterios y factores se definen zonas de restricción y de posibilidad ambiental, especificando para cada variable, componente y dimensión, un procedimiento para su identificación, análisis y representación mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG).

La estructura de preferencias para la asignación de las ponderaciones a las dimensiones, se soporta en un "juicio de expertos", ya que se asignan los valores según la percepción y conocimientos de los especialistas por cada dimensión analítica, que participan en un estudio ambiental.

Para introducir en este juicio de valores, los criterios de otros actores, entendiendo por actor, aquel invitado a participar por tener relación con el proyecto, se acude a herramientas que permiten tomar decisiones a partir de múltiples criterios, agrupadas en las técnicas de Análisis Multi Objetivo (A.M.O.) (Smith., Mesa., Dyner., Jaramillo., Poveda., y Valencia., 2000; Wierzbicki., 1992).

Para el caso en estudio se definió una estructura de pesos para una zona piloto, ubicada en el proyecto SIEPAC, entre Costa Rica y Nicaragua, mediante una combinación de opciones que se basan en los juicios de valor consultados directamente con varios representantes de los grupos implicados en el proyecto y presentes en la zona escogida, integrándolos por sector y por país :

- el sector empresarial, propietario de la red de transmisión,
- la autoridad ambiental
- la sociedad civil, con representantes de la comunidad y de ONG's
- el sector académico e investigativo.

Para el modelamiento de las alternativas, resultantes de cada grupo de decisores, se utilizó SIG, siguiendo el esquema metodológico representado en la Figura 2.

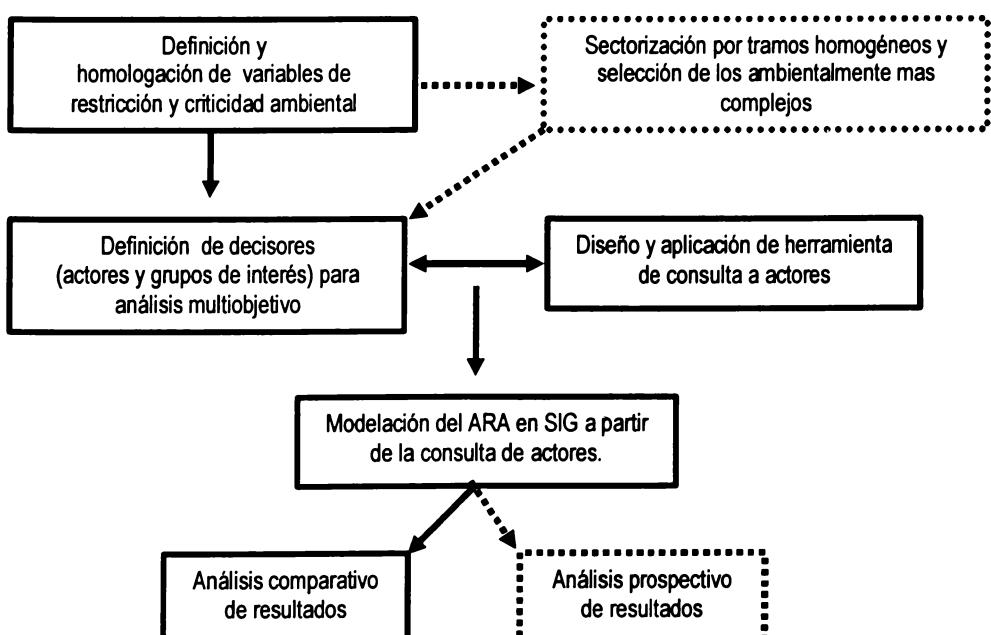


Figura 2.  
Diagrama metodológico para la toma de decisiones con múltiples actores y criterios en el análisis ambiental de alternativas en proyectos lineales

### 3. DESARROLLO

Luego de homologar las dimensiones y variables ambientales de los modelos utilizados en ISA (Colombia) y SIEPAC (Centroamérica) se obtuvo una lista de temáticas (Tabla 1), base para la modelación en SIG de las restricciones y posibilidades ambientales del tramo seleccionado entre las subestaciones de Cañas (Costa Rica) y Ticuantepe (Nicaragua), uno de los mas complejos del SIEPAC (OEA,CEPREDENAC,1996; BID, 2000).

DIMENSION		COMPONENTE	VARIABLE
FISICA	Geosferica	Amenaza volcánica / sísmica Erosión y remoción en masa	
	Hidrologica	Cuerpos de agua y nacimientos Amenaza de inundación	
BIOTICA	Vegetacion	Areas protegidas (parques) Ecosistemas vulnerables	
	Fauna	Corredores de avifauna	
ECONOMICA	Uso del suelo	Agricultura, turismo, industria	
	Infraestructura	Zonas urbanas, acercamientos a obras de desarrollo (aeropuertos, ductos, líneas, vías.)	
CULTURAL	Demografia	Densidad de población	
	Patrimonio	Zonas arqueológicas, paisaje	
	Grupos etnicos	Comunidades indígenas	
POLITICA	Conflictos	Zonas de presión política o social	

Se elaboraron 16 mapas temáticos, como el de la Figura 3, que se utilizaron para ensamblar diferentes escenarios, combinando los pesos y restricciones asignadas a cada dimensión por cada actor o decisor (estructura de preferencias), obteniéndose 12 diferentes opciones de ruta óptima, con los criterios de cada grupo de decidores. Al final del artículo, en la Figura 8, se presenta de manera esquemática la estructura de las dimensiones, componentes y variables ambientales, con el modelo SIG utilizado para definir la síntesis de criticidad ambiental y la ruta óptima de cada opción.

Para todas las opciones se busca la mejor decisión en torno al problema planteado de encontrar la mejor posibilidad de ruta para el proyecto SIEPAC en el tramo seleccionado, minimizando costos ambientales (criticidad y distancia) y evitando restricciones. El método para generar alternativas es el de mínimo costo de viaje, calculado con herramientas SIG.

El proceso de generación de la ruta óptima, dado un grupo de actores, presenta una dificultad relacionada con la estructura de preferencias del grupo, o bien de uno de los actores del grupo, que comprende dos tipos de variables : continuas y discretas. Al primer tipo, pertenecen las ponderaciones dadas a cada una de las dimensiones analíticas. Sobre ellas pueden aplicarse reglas de agregación, como el promedio simple o ponderado, o la media geométrica.

Al segundo tipo de variables, pertenece la caracterización de cada temática, como restrictiva o no restrictiva. Para este tipo de variables, se trabajó en todos los casos con una regla de agregación consistente en asignar la categoría de restrictiva a una temática, si así lo consideraban más de la mitad de los actores del grupo.

Los grupos de interés conformados para simular sus criterios dentro del modelo se presentan en la Tabla 2 y los escenarios u opciones de simulación de rutas óptimas se expresan en la Tabla 3.



Figura 3.  
Mapa de áreas protegidas

**Tabla 2.**  
Grupos de interés para toma de decisiones

GRUPO DECISOR	Costa Rica	Nicaragua	Regional
A : Costa Rica (todos)	ICE, CIEDES, MINAE,		
B : Nicaragua (todos)		ENTRESA, MARENA	
C : Autoridad Ambiental	MINAE	MARENA	
D: Empresas eléctricas	ICE	ENTRESA	EPR
E: Centros Investigativos	CIEDES		UICN
F : ICE *	ICE		

(\*): grupo de mayor incidencia en la consulta, al que se le aplicó, la técnica de delegación, para toma de decisiones de múltiples objetivos con múltiples decisores.

**Tabla 3.**  
Opciones propuestas para la toma de decisión de ruta óptima

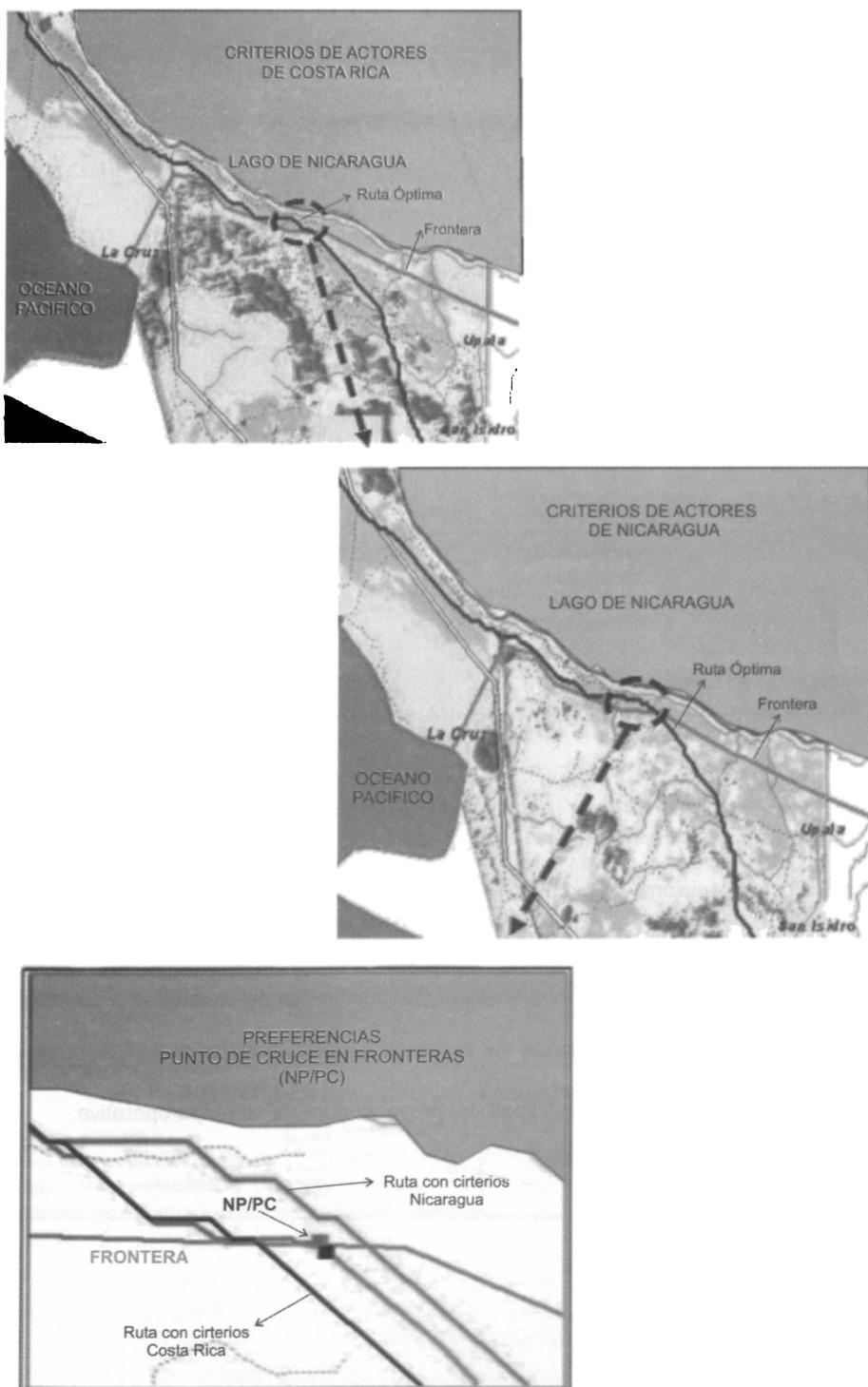
OPCION	Punto INICIO	Punto FINAL	VALOR C.RICA	VALOR NICA	DESCRIPCION DE LA OPCION
A	CAÑAS	TICUA	CRICA	CRICA	Criticidad promedio de actores Costa Rica
B	CAÑAS	TICUA	NICA	NICA	Criticidad promedio de actores Nicaragua
C	CAÑAS	TICUA	Prom AA	Prom AA	Criticidad de Autoridades Ambientales de ambos países
D	CAÑAS	TICUA	Prom EE	Prom EE	Criticidad promedio del total de Empresas Eléctricas
E	CAÑAS	TICUA	Prom CI	Prom CI	Criticidad con promedio de Centros de Investigación
F	CAÑAS	TICUA	EPR	EPR	Criticidad con promedio de EPR
G/H	CAÑAS	TICUA	EE.CR./C RDEL	EE.CR./C RDEL	Comité delegación para Empresa Eléctrica de Costa Rica, comparando criticidades y restricc. iniciales con delegadas
I	CAÑAS	TICUA	Prom Total	Prom Total	Criticidad media de todos los actores
J	CAÑAS	TICUA	Med Geom	Med Geom	Criticidad media geométrica de los actores
K	CAÑAS	FRON	CRICA	—	Criticidades en Costa Rica hasta punto de cruce en frontera con restricciones de C.Rica
L	TICUA	FRON	—	NICA	Criticidades en Nicaragua hasta punto de cruce en frontera con restricc. de Nicaragua
M	CAÑAS	TICUA	CRICA	NICA	Simulación de criticidades asumiendo la viabilidad de un 2º circuito por línea existente.

Luego de modelar en SIG la ruta óptima se obtuvieron varias tendencias :

- La Nor- oriental en Costa Rica debido a las restricciones de Areas Protegidas y corredores de avifauna (Stiles. y Skutch., 1989).
- La central por la reserva de Guanacaste, bajo el escenario de permitir paso por corredor existente de otra línea del ICE, agregando un circuito adicional al que actualmente se tiene.
- Al aplicar los criterios de cada país, no necesariamente hay coincidencia en el cruce fronterizo, por lo que se generó un procedimiento denominado Negociación de preferencias y punto de cruce ( NP/ PC ). El proceso para su construcción es el siguiente :
  - a) Se trabaja sobre una cartografía base y unas variables de restricción y criticidad ambiental, comunes.
  - b) Se definen las restricciones y criticidades por país.
  - c) Se trazan las rutas óptimas de extremo a extremo, utilizando ambos juegos de ponderaciones (opciones A y B en este caso).
  - d) Si ambas rutas cruzan la frontera en puntos diferentes, se negocia entre ambos grupos de los países, el punto común en la frontera.
  - e) A partir de ese punto común se recalculan las rutas óptimas hacia cada extremo, utilizando para esto, las restricciones y criticidades propias de cada país.

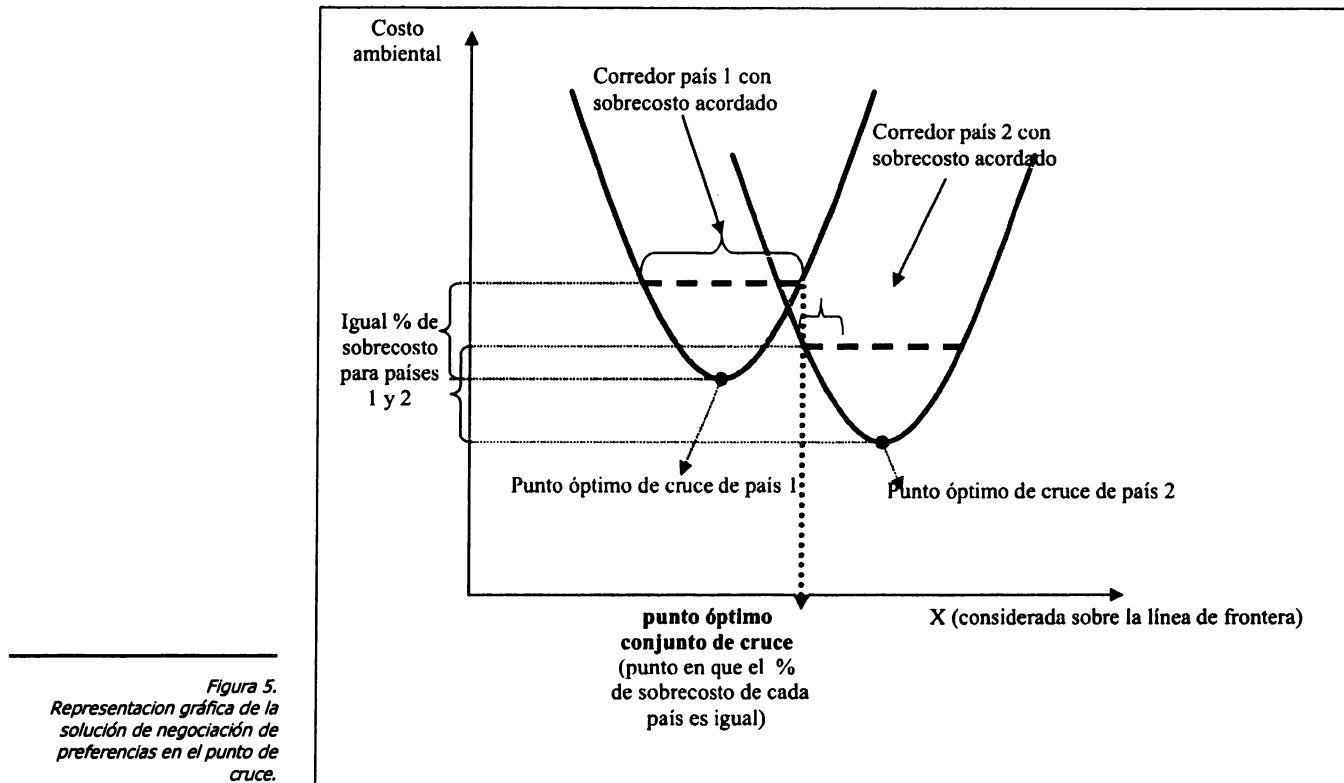
Para apoyar la negociación planteada en el literal d), se recurre al uso de la función "corridor" del SIG, construyendo corredores alrededor de las rutas óptimas de cada país (A y B), con grados crecientes de sobre-costo ambiental, originando un ensanchamiento («enhancement») de las curvas de isocostos hasta que se obtenga un punto común de "sobre-costos" ambientales sobre la línea fronteriza, en el que ambos países estarían aceptando el mismo nivel de sobrecosto porcentual. En otras palabras, en ese punto, cada país estaría realizando un «sacrificio» comparable al del otro y puede ser interpretado como el grado de flexibilidad que cada país requiere, para alcanzar una solución que satisfaga a ambos. Si las rutas iniciales eran muy cercanas, este grado de flexibilidad será pequeño, y si son distantes, se requerirá un mayor grado de flexibilidad.

Las figuras 4a y 4b contienen las superficies de criticidad de las opciones A (criterios de actores de Costa Rica) y B (criterios de actores de Nicaragua) agrupadas en rangos de criticidad Baja (verde), Media (amarillo) y Alta (rojo), mas las restricciones (gris). Puede notarse que alrededor de la frontera hay diferencias en las superficies, generando un distanciamiento de algunos kilómetros entre los cruces óptimos de cada ruta, que se representa en la Figura 4c.



Figuras 4a, 4b, 4c.  
*Negociación de preferencias en puntos de cruce fronterizo*

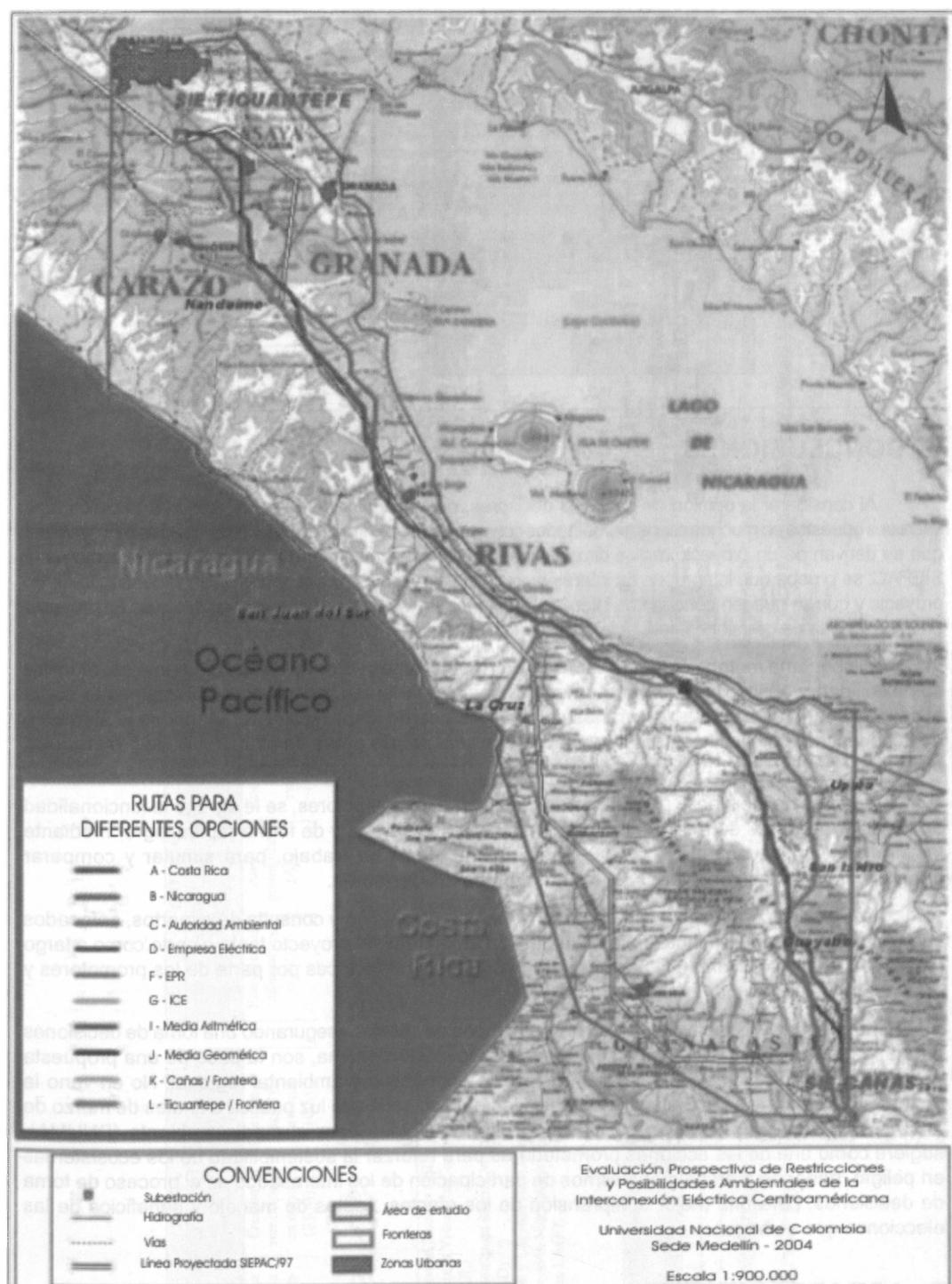
La solución denominada Negociación de preferencias en el punto de cruce (NP/PC), permite encontrar el punto común desde donde se recalcula la ruta en ambas direcciones con los criterios de cada país, tal como se representa en la Figura 5.



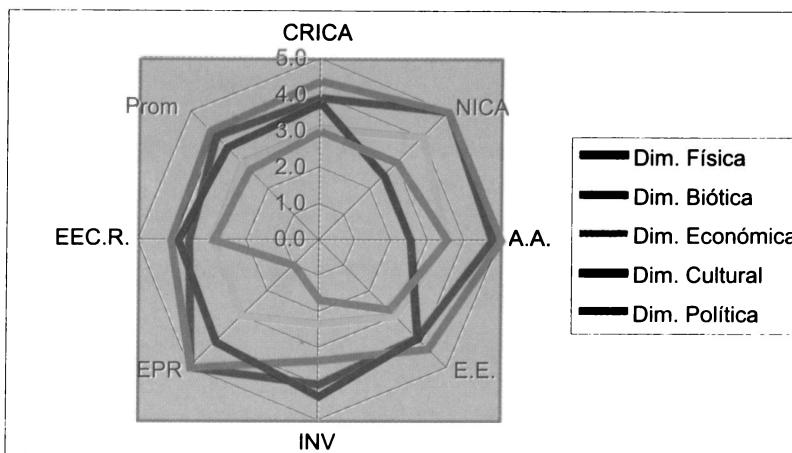
Con las rutas resultantes de la combinación de las diferentes opciones, que se pueden apreciar en la Figura 6 se brindan al decisor las posibles alternativas para definir la mejor ruta considerando las restricciones y criticidades de todos los actores.

Como producto adicional de la consulta de actores, se pudo obtener una visión prospectiva de la sostenibilidad ambiental del proyecto SIEPAC, anticipándose a cambios fortuitos que obliguen a tomar medidas reactivas, y buscando incidir en el futuro del proyecto (Godet., 1995). Para tal fin, se incluyó dentro de la consulta, una pregunta orientada a medir el nivel de importancia que deberá darse al manejo de las dimensiones ambientales en dos momentos del ciclo de vida del proyecto :

- A corto plazo, atendiendo y manejando los impactos generados en la etapa de construcción (Figura 7),
- A largo plazo, buscando una sostenibilidad del proyecto durante su etapa operativa.



**Figura 6.**  
*Mapa de rutas para las diferentes opciones*



**Figura 7.**  
Importancia de la gestión por dimensión ambiental y tipo de actor a corto plazo para el SIEPAC.

#### 4. CONCLUSIONES

Al considerar la opinión de múltiples decisores, organizados en diferentes grupos de opinión, con intereses opuestos en muchos casos, combinados con varios criterios frente a la percepción de las implicaciones que se derivan de un proyecto de las dimensiones políticas, socioeconómicas y ambientales, como es el SIEPAC, se prueba que los grupos de interés pueden incidir directa o indirectamente en el desarrollo de un proyecto y que se pueden conciliar los intereses y criterios de los implicados en el desarrollo de un proyecto en la búsqueda de decisiones satisfactorias para todos ellos.

El esquema metodológico del Análisis de Restricciones y Posibilidades Ambientales, muestra su flexibilidad y aplicabilidad a otros entornos, posiblemente tan complejos ambientalmente como el colombiano, en las etapas tempranas del ciclo de vida de un proyecto, agregándose el elemento de la consulta de múltiples actores, para combinar una amplia gama de estructuras de preferencias en torno a la criticidad y restricción de las variables que componen el modelo.

Además de incluirle la posibilidad de consultar diversos actores, se le agrega la funcionalidad de formular opciones de ruta, con base en múltiples decisiones, y de forma rápida lograr mediante las herramientas avanzadas de SIG, combinar hipótesis de trabajo, para simular y comparar geográficamente, las variaciones de los criterios de los decisores.

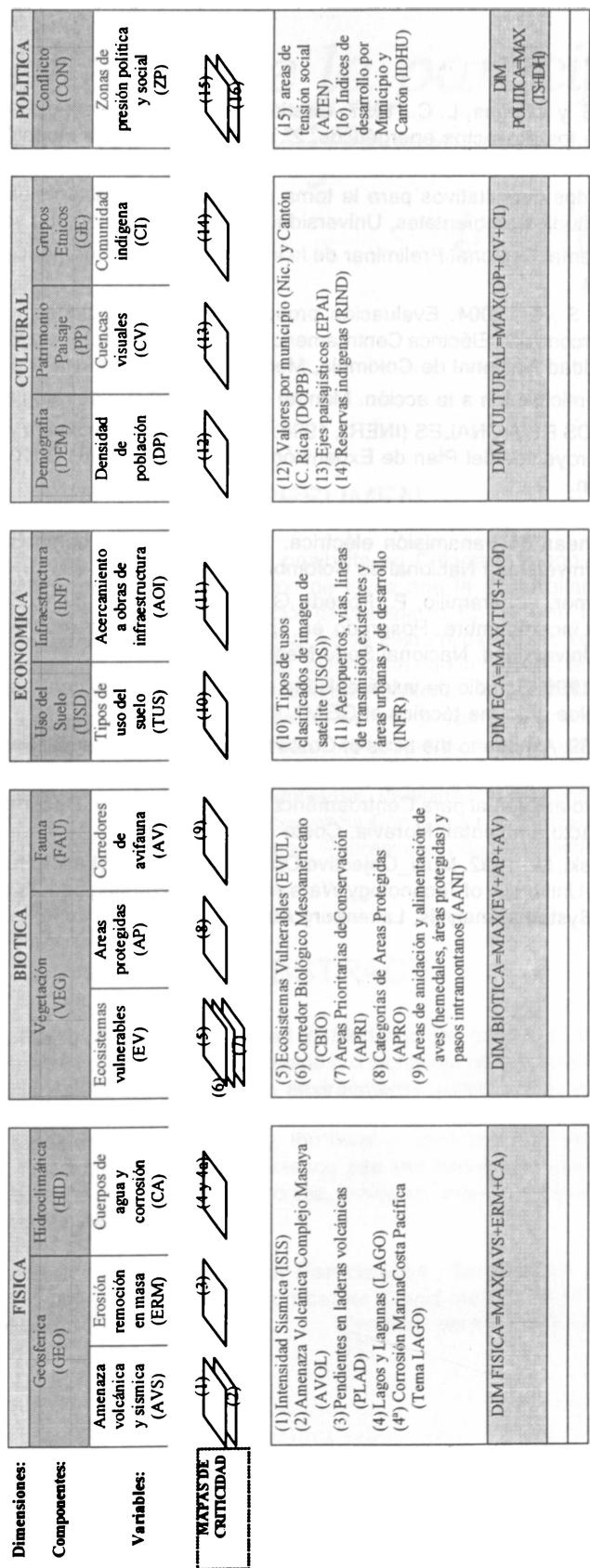
Los análisis prospectivos basados en sondeos de opinión y consulta de expertos, enfocados a los actores que tendrán incidencia en la gestión ambiental del proyecto tanto a corto como a largo plazo, son una herramienta útil para trazar lineamientos y directrices por parte de los promotores y dueños de los proyectos.

La gestión participativa de los diferentes grupos de interés, asegurando una toma de decisiones en etapas tempranas de los proyectos, para su localización óptima, son la base de una propuesta de desarrollo de sostenible con un beneficio neto económico y ambiental regional. No en vano la reciente Evaluación de los Ecosistemas del Milenio<sup>1</sup>, que salió a la luz pública a finales de marzo de 2005, coordinada por la Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente (PNUMA), sugiere como una de las acciones prometedoras para reforzar la sostenibilidad de los ecosistemas en peligro, poner en marcha mecanismos de participación de los interesados en el proceso de toma de decisiones, para una mejor comprensión de los efectos, costos de manejo y beneficios de las elecciones que se hagan.

#### 5. AGRADECIMIENTO

A Interconexión Eléctrica S.A. por el patrocinio de esta investigación «Evaluación prospectiva de restricciones y posibilidades ambientales de la Interconexión Eléctrica Centroamericana», realizada en el 2004; mediante la Beca y los fondos financieros del convenio ISA - Universidad Nacional para el posgrado de Gestión Ambiental.

<sup>1</sup>. [www.milleniumassessment.org](http://www.milleniumassessment.org)



**SINTESIS CRITICIDAD AMBIENTAL = SUMATORIA DE MAPAS DE CRITICIDAD PARA LAS DIFERENTES OPCIONES DE ACUERDO AL AGRUPAMIENTO DE DECISORES, PONDERANDO CADA DIMENSIÓN.**  
**ROTA ÓPTIMA DE CADA OPCIÓN: MINIMO COSTO DE VÍA SOBRE LA SUPERFICIE SÍNTESIS DE CRITICIDAD, TOMANDO LAS RESTRICCIONES DE MAYOR SELECCIÓN DE LOS DECISORES DE CADA OPCIÓN.**

**Figura 8.**  
**Modelo SIG - Análisis de restricciones y posibilidades proyecto SIEPAC Tramo S/E Cañas (Costa Rica) - S/E Ticuantepe (Nicaragua)**



## 6. BIBLIOGRAFIA

- Angel S., E., Carmona, S. y Villegas, L. C., 1997. Gestión ambiental en proyectos de desarrollo. Una propuesta desde los proyectos energéticos. 2<sup>a</sup> edición. Santafé de Bogotá: Fondo FEN Colombia.
- Angel S. E., 2000. Métodos cuantitativos para la toma de decisiones ambientales. Facultad de Minas. Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- BID, 2000. Estudio Ambiental Regional Preliminar de la interconexión centroamericana (SIEPAC). San José, Costa Rica.
- Cadena S., L. F., Angel S., E., 2004. Evaluación prospectiva de restricciones y posibilidades ambientales de la Interconexión Eléctrica Centroamericana. Tesis de Maestría de Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Godet, M., 1995. De la anticipación a la acción. Manual de prospectiva y estrategia. México.
- INSTITUTO DE ESTUDIOS REGIONALES (INER), 1998. Estudio de Restricciones y Posibilidades Ambientales de los proyectos del Plan de Expansión Eléctrica. ISA 2001-2010. Universidad de Antioquia, Medellín.
- Losada, A. C., 2001. Sistema computacional de análisis multiobjetivo para el diagnóstico ambiental de alternativas de líneas de transmisión eléctrica. Trabajo de grado como Especialista en Gestión Ambiental. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Smith, R., Mesa, O., Dyner, I., Jaramillo, P., Poveda G. y Valencia, D., 2000. Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre. Posgrado en aprovechamiento de recursos hidráulicos. Facultad de Minas, Universidad Nacional Sede Medellín.
- OEA – CEPREDENAC, 1996. Estudio de vulnerabilidad del sector eléctrico centroamericano ante las amenazas naturales. Informe técnico al CEAC, Washington.
- Stiles, G ; Skutch, F ,1989. A guide to the birds of Costa Rica. Cornell University Press, New York.
- UICN,CCAD, MINISTERIO DE ASUNTOS EXTERIORES DE LOS PAÍSES BAJOS, 2003. Evaluación de impacto ambiental para Centroamérica. La Serie, Tomo 5. Desarrollo económico y evaluación de impacto ambiental. Moravia, Costa Rica.
- Wierzbicki, A. P., Makowski, M., 1992. Multi\_Objective Optimization in Negotiation Support. Institute of Automatic Control, University of Technology Warsaw, Poland. Working papers of International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg Austria.

