

Abordaje multiobjetivo para el trazado de la defensa norte de la ciudad de Resistencia - Chaco

Jorge V. Pilar

Facultad de Ingeniería de la UNNE.
Correo Electrónico: jpilar@ing.unne.edu.ar

Resumen

El trazado de obras con características lineales en un espacio geográfico tendría, en principio, un número muy grande de soluciones. La selección de trazados más convenientes es hoy abordada por la Investigación de Operativa por medio de la Programación Dinámica y de las técnicas para resolver el problema conocido como caminos de mínimo costo (least-cost-path). A su vez, el planeamiento de espacios geográficos es realizado con el auxilio de técnicas de SIG (sistemas de información geográfica).

El estudio algorítmico de los caminos de mínimo costo no es novedad, pues hasta los programas comerciales para SIG más utilizados ya incorporaron comandos que, con ciertas limitaciones, resuelven ese problema.

Sin embargo, sea cual fuere el abordaje, siempre es necesario conocer a priori la función objetivo (FO), y esto no es tarea fácil, pues deben ser conjugados objetivos de satisfacción de necesidades sociales, políticas, ambientales y económicas, entre otras, lo que genera un verdadero problema de optimización multiobjetivo y multicriterio.

En este trabajo se propone un modelo de decisión para ayudar a la formulación de la FO, adoptando el paradigma multiobjetivo/multicriterio.

El modelo se mostró eficaz y de fácil utilización y su aplicabilidad se probó en la definición del trazado óptimo de parte de la defensa norte de la ciudad de Resistencia (Chaco).

Palabras clave: sistemas de apoyo a la decisión; optimización multiobjetivo/multicriterio; caminos de mínimo costo.

Abstract

Works' layout with lineal characteristics in a geographical space has a large number of solutions. The more convenient layout selection is actually approached for the Operational Research through the traditional Dynamic Programming and the techniques to solve the well-known problem as least-cost-path. At the same time, the planning of geographical spaces is carried out with the GIS (Geographical Information Systems) aid.

The algorithmic study of the minimum cost paths is not new and even the most used GIS commercial programs have incorporated commands which, with certain limitations solve the problem.

However, it is always necessary to previously know the Objective-Function (OF), and this is not easy task, because objectives of social, political, environmental and economic needs must be conjugated, which generates a real problem of multi-objective and multi-criterion optimization.

This work had as main focus the OF formulation, adopting the multiobjective/ multicriterion paradigm.

An efficient support decision aid and of easy use was the result, and the verification of its applicability was verified in the definition of the optimum layout of the north defense of Resistencia city (Chaco).

Introducción

En este trabajo se buscó diseñar un abordaje multiobjetivo para el planeamiento de obras de ingeniería, en especial con características lineales, tratando de formular con rigor científico un modelo de apoyo a la decisión de fáciles entendimiento y aplicabilidad. La intención fue hacer un aporte al problema denunciado por Simonovic [1] en un artículo ya clásico en el planeamiento de recursos hídricos: la existencia de una brecha entre la teoría y la práctica.

La elección del trazado de obras de ingeniería con características lineales debería hacerse utilizando técnicas modernas o modelos matemáticos de optimización, pues utilizar los escasos recursos (especialmente los financieros) con eficiencia debería ser el principio que guíe el planeamiento estratégico de ese tipo de obras, buscando que los trazados sigan los lineamientos de los llamados caminos de mínimo costo o, según la jerga de la bibliografía específica, "least-cost-path".

Al tomar decisiones referentes a trazados de rutas, canales y conductos en general, se busca que ellas generen el menor impacto negativo posible. Pero, ¿cómo conseguir eso?

El problema de los caminos de mínimo costo comenzó a ser estudiado recientemente, hace poco más de un cuarto de siglo, pero de forma aislada y separada por especialistas de la Investigación Operativa y de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Según los primeros, el problema consiste en hallar el camino "más barato" entre dos puntos del espacio de decisión, dada una red de puntos y arcos que los vinculan, más los costos asociados a cada arco. Esos problemas pueden ser resueltos aplicando alguna técnica de Programación Dinámica (PD).

Por otra parte, existen problemas de la ingeniería práctica, en los cuales los puntos corresponden a un espacio geográfico y los arcos representan costos que podrían ser expresados por medio de una función de costo incremental entre dichos puntos. Esos problemas pueden ser abordados con técnicas de SIG, conocidas en la jerga del geoprocésamiento como problemas de caminos de mínimo costo, o "least-cost-path".

El costo debe ser entendido como una fricción, que podría medirse en términos de distancia, riesgo, impacto ambiental, tiempo de viaje, etc. Por lo tanto, queda configurado un típico problema de optimización: una función (de costos) a ser optimizada (minimizada), más un conjunto de restricciones a ser consideradas en el proceso de decisión.

En un plano perfecto, el camino más corto entre dos puntos será, obviamente, una línea recta. Sin embargo, si sobre ese plano son superpuestas otras capas representando fricciones (por ejemplo, tipos de usos del suelo, presencia de cuerpos de agua, etc.), los caminos más cortos comenzarán a apartarse de la línea recta para transformarse en poligonales (Collischonn & Pilar [2]).

Tomar decisiones es una actividad tan cotidiana (y antigua) que pocas veces se reflexiona sobre ella. Cuando es necesario decidir sobre situaciones futuras desconocidas e inciertas, muchas veces los decisores realizan esta tarea de forma intuitiva, esperando que la suerte los ayude. Esa actitud, aunque familiar, no es otra cosa que poner el carro delante de los caballos.

La optimización multiobjetivo tiene sus orígenes en los trabajos de Edgeworth y Pareto, de finales del siglo XIX (NEOS Guide [3]). Otros antecedentes que se le reconocen son, entre otros, la Teoría de la Utilidad, de Daniel Bernoulli, la Teoría del Bienestar Social, creada a finales del siglo XVIII a partir de los trabajos del Marqués de Condorcet; la Teoría de la Medición Psicosensitiva; la Investigación Operacional, especialmente la Programación Matemática, que presentaron desde siempre el problema de necesitar definir a priori una función objetivo a ser optimizada (Jacquet-Lagrèze [4]).

Los conceptos y definiciones asociados a la optimización multiobjetivo, acertados o equivocados, intentan hacer, de alguna manera, más objetivo el subjetivo proceso de decisión, rompiendo con el mito de la decisión óptima en el más puro y abstracto sentido matemático. Algunos autores consideran a estos métodos como una tercera alternativa a la eterna dicotomía entre pragmatismo y purismo (Barredo Cano, [5]).

De forma diferente a la optimización tradicional, con un único objetivo, donde se maximiza o minimiza una función objetivo única, en la multiobjetivo hay que optimizar un vector y eso, en teoría, es imposible: en realidad, no existe una única solución óptima, sino un conjunto de soluciones que satisfacen en diferente grado y forma los objetivos escogidos (Andreu [6]).

La programación de compromiso

Este método, desarrollado por Zeleny en 1973, considera varios objetivos y se basa en que existirá una alternativa ideal, comúnmente, inalcanzable, que conjugaría los mejores resultados según los objetivos escogidos. Si ella fuese alcanzable sería la solución óptima. Sin embargo, como normalmente no lo es, la solución de "mejor compromiso" (la más eficiente) será aquella que se localice a menor distancia del punto ideal, lo que es conocido como axioma de Zeleny (Romero [7]).

Entonces, para cada objetivo es necesario calcular la distancia a punto ideal:

$$d_j = [f_j^* - f_j(\bar{x})] \quad (1)$$

donde la diferencia encerrada entre corchetes indica el grado de proximidad entre el objetivo j-ésimo ($f_j(\bar{x})$), para un vector " \bar{x} " de las variables de decisión, y su valor ideal (f_j^*), siendo $f_j^* = \text{Max } f_j(\bar{x})$.

Dependiendo de las variabilidades que pudieran existir entre las diferentes funciones objetivo, las diferencias calculadas aplicando la ecuación (1) deberían ser "normalizadas", por ejemplo dividiéndola por la diferencia entre el valor ideal y el antiideal.

Si se denomina "w_j" a la importancia que el decisor atribuye al objetivo j-ésimo, la solución de mejor compromiso surgirá del siguiente problema de optimización (Romero [7]):

$$\text{Min } \bar{x} = \left[\sum_{j=1}^n w_j \cdot \left(\frac{[f_j^* - f_j(\bar{x})]}{[f_j^* - f_j]} \right)^\pi \right]^{\frac{1}{\pi}} \quad (2)$$

El parámetro " π " establece la métrica que define la familia de funciones de distancia, o sea, para cada valor de " π " se tendrá una distancia. La distancia tradicional euclidiana es un caso particular de la ecuación (2), en la cual $\pi=2$.

La aplicación de este método no es inmediata en un problema como el abordado en este trabajo. Por lo tanto, fue necesario hacer algunos cambios que serán descritos seguidamente, los que incluyen, entre otros, procedimientos típicos del Método de

Análisis Jerárquico (MAJ).

La metodología propuesta

Primeramente, es necesario escoger los aspectos que se consideren relevantes para la solución del problema y que, en forma esquemática, podrían ser llamados, simplemente, aspecto A, aspecto B y aspecto C (el número de aspectos relevantes no es una limitación del método).

Una forma muy interesante de caracterizar un espacio geográfico es a través de un esquema "raster" (Eastman [8]; Swain & Davis [9]). Según este esquema, se discretiza al espacio en celdas elementales (píxeles), que sintetizan las características espaciales (y/o temporales) de esa unidad geográfica.

Con este esquema raster es posible realizar tantos mapas del área en estudio como aspectos estén siendo considerados, en los que cada píxel indicará la caracterización de esa porción de terreno según cada uno de esos aspectos.

Posteriormente, cada unidad geográfica podrá ser representada en un espacio de decisión, en el cual las coordenadas representen cada uno de los aspectos analizados.

Como los aspectos analizados pueden ser muy diferentes es necesario adoptar algún esquema para poder compararlos en una misma métrica. Se sugiere la aplicación de los "umbrales de indiferencia", según la metodología presentada por el mismo autor en un trabajo anterior (Pilar [10]). Se propone asignar una puntuación 1 a la mejor situación y 10 a la peor (en un esquema semejante a la puntuación utilizada para la calificación escolar, entendible y de uso común para la mayoría de las personas).

De esta manera, el espacio de decisión quedará restringido a un cuadrado, cubo o hipercubo de 9 unidades de arista (10 menos 1). En el caso de los 3

aspectos considerados, estaríamos ante la presencia de un cubo.

En realidad, ese espacio sólo será un cubo en el caso en que cada aspecto tuviese la misma importancia relativa en la decisión. Sin embargo, cada aspecto podría tener una importancia diferenciada y que podríamos caracterizar como w_A , w_B y w_C , (siendo $w_A+w_B+w_C=1$).

Por lo tanto, el cubo se transformará en un poliedro, pues las coordenadas de cada eje deberían ser afectadas por los coeficientes mencionados en el párrafo anterior (Figura 1).

La Programación de Compromiso es normalmente utilizada para hacer un ordenamiento jerárquico de varias soluciones posibles, según varios aspectos o criterios. Se basa en establecer una situación deseable (target), caracterizada por determinados valores de los aspectos considerados relevantes, y escoger la alternativa que tenga la menor distancia con relación a esta situación ideal.

La variante de este método que se propone en este trabajo consiste en elaborar un mapa de fricción en el cual cada punto del espacio geográfico quede caracterizado por su distancia al punto ideal o anti-ideal del espacio de decisión.

Este método sería fácil de entender por los tomadores de decisiones reales, sobre todo porque el concepto de distancia, siempre que sea del tipo euclidiana, es utilizado en el día a día de la mayoría de las personas.

Para calcular, para una célula "i" cualquiera del espacio geográfico, con coordenadas "Xi-A", "Xi-B" y "Xi-C" en el espacio de decisión, su distancia "euclidiana" al punto (1,1,1) o ideal, debe aplicarse la conocida fórmula:

$$d_i = \left([w_A \cdot (X_{i-A} - 1)]^2 + [w_B \cdot (X_{i-B} - 1)]^2 + [w_C \cdot (X_{i-C} - 1)]^2 \right)^{0.5} \quad (3)$$

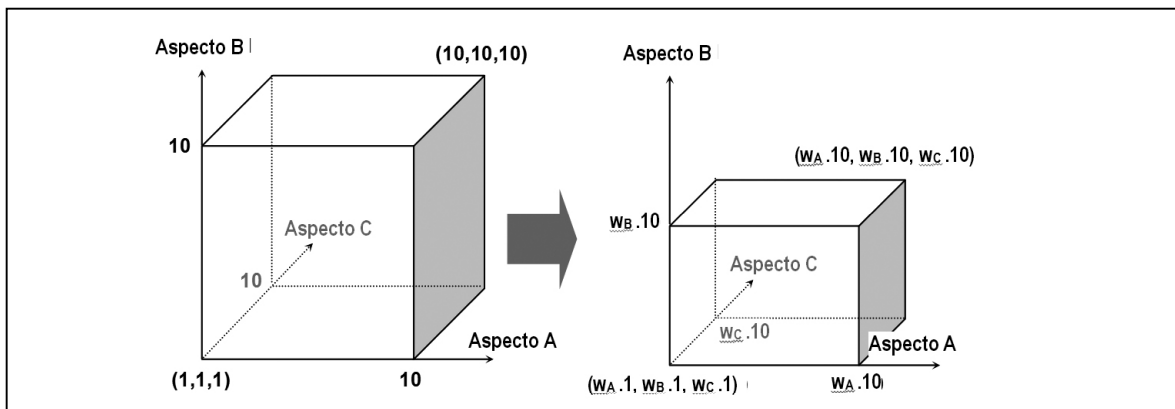


Figura 1. Deformación del espacio de decisión.

en la cual, “wA”, “wB” y “wC” representan las importancias relativas (pesos) de los aspectos A, B y C, respectivamente.

Entonces, teniendo un nuevo mapa de fricción, en el que cada unidad del espacio queda caracterizada por su distancia al punto ideal del espacio de decisión, el cálculo del trazado óptimo de una obra de ingeniería con características lineales podría hacerse de forma simple, aplicando el esquema presentado por Collischonn y Pilar [2] o utilizando los comandos propios de algún programa comercial de SIG, por ejemplo el IDRISI®.

El trazado óptimo de la defensa norte de la ciudad de Resistencia

La aplicabilidad de la metodología propuesta fue puesta a prueba en la verificación de parte de la traza de la defensa norte de la ciudad de Resistencia.

Esta ciudad se localiza a pocos kilómetros aguas abajo de la confluencia de los río Paraguay y Paraná y sufre con cierta periodicidad inundaciones provocadas por sus crecientes. Para paliar los efectos nocivos de estas inundaciones las autoridades de la Provincia del Chaco contrataron el proyecto y ejecución de un terraplén de defensa, localizado al norte del ejido urbano de la ciudad.

En interacción con los tomadores de decisiones reales se estableció que un trazado óptimo debería contemplar aspectos económicos, ambientales y políticos.

Con respecto al primero de ellos, su importancia fue bastante simple de considerar, pues las defensas debían alcanzar una determinada cota de coronamiento (definida por criterios hidrológicos). Como el ancho de este coronamiento estaba fijado de antemano, lo mismo que los taludes del terraplén, la sección transversal del terraplén en un determinado píxel reflejaría la fricción económica buscada.

El esquema de umbrales de indiferencia utilizado para este aspecto, al igual que el mapa de fricción resultante, son mostrados en la Figura 2.

Para caracterizar la fricción ambiental, se hizo una clasificación del tipo de cobertura del terreno y a cada tipo se le asignó un determinado peso. El límite inferior de “peso 1” fue para el uso menos comprometido, ambientalmente hablando, mientras que el límite superior de “peso 10” fue para las áreas que deberían, de ser posible, preservadas. Por no ser aplicables, no se utilizó un esquema de umbrales de indiferencia con variación continua como en el caso del aspecto anterior. El mapa de fricción ambiental resultante es mostrado en la Figura 3.

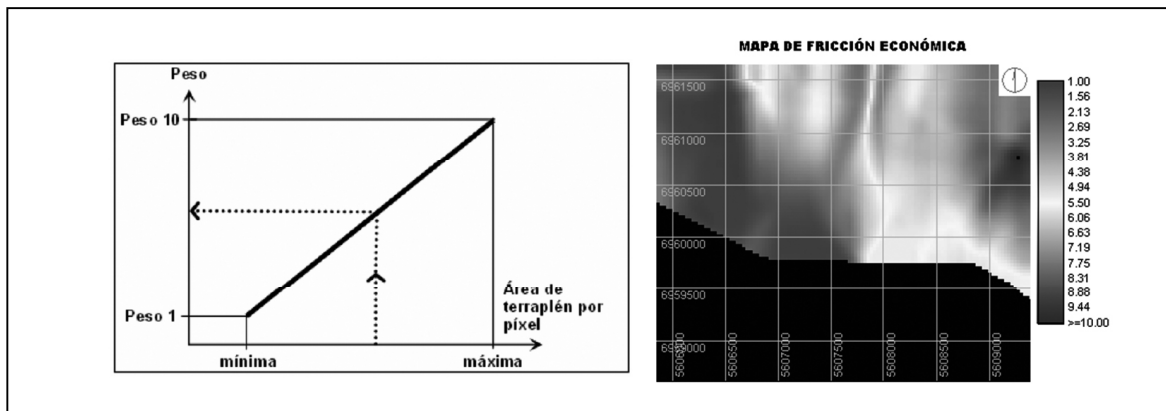


Figura 2. Umbrales de indiferencia y mapa de fricción económica.

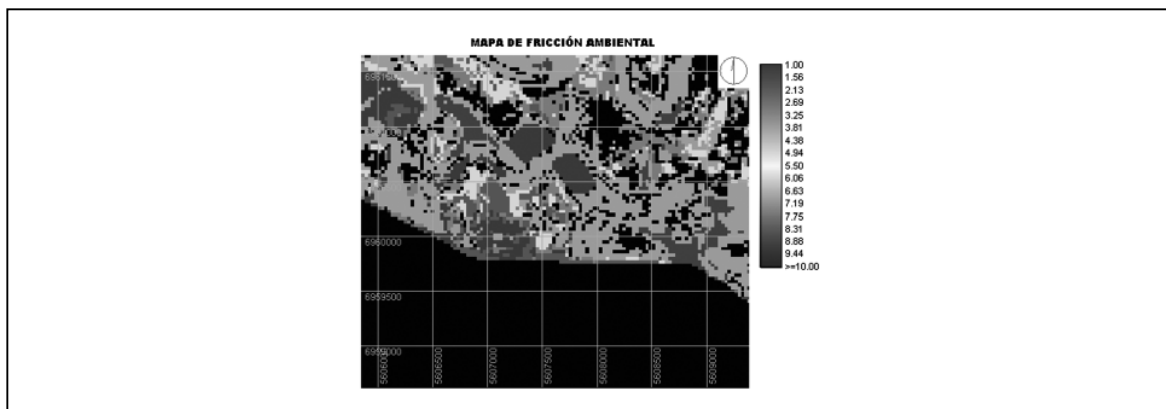


Figura 3. Mapa de fricción ambiental.

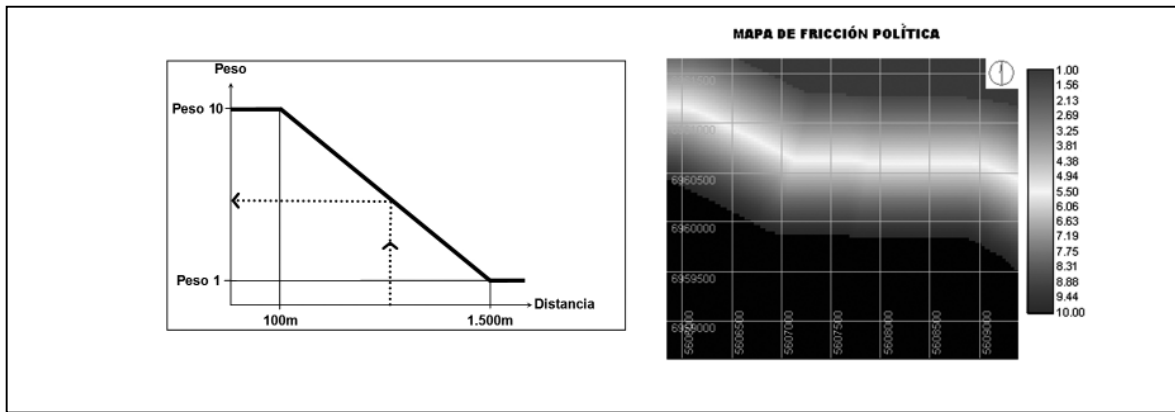


Figura 4. Umbrales de indiferencia y mapa de fricción política.

Con respecto al último aspecto considerado (el político), los tomadores de decisiones reales coincidieron en que sería interesante, políticamente hablando, que las defensas se localicen lo más al norte de la ciudad que sea posible, para ganar terrenos defendidos. Entonces, fue elaborado un mapa (en formato raster) que representa, para cada píxel, la distancia al límite norte de la ciudad, que en definitiva fue el mapa utilizado para reflejar la fricción de tipo político. Por lo tanto, esta fricción es caracterizada por una variable continua, lo que viabilizó la utilización del esquema de umbrales de indiferencia.

Se adoptó como umbral de “peso 10” la distancia de 100m al límite norte de la ciudad, mientras que para el umbral de “peso 1” se estableció la distancia 1.500m de dicho límite, pues más allá de esta distancia comienza otro ejido municipal y podrían aparecer conflictos entre jurisdicciones. La variación entre estos umbrales fue adoptada como lineal.

En la Figura 4 son presentados el esquema de umbrales de indiferencia adoptado para este aspecto y el mapa de fricción resultante.

Para definir la importancia relativa de los tres aspectos, fue utilizado el Método de Análisis Jerárquico (Saaty [11]). La matriz de las comparaciones paritarias, rellena por los propios tomadores de decisiones, es mostrada en la Figura 5.

	Económico	Ambiental	Político
Económico	1	a_{E-A}	a_{E-P}
Ambiental	$1/a_{E-A}$	1	a_{A-P}
Político	$1/a_{E-P}$	$1/a_{A-P}$	1
AUTOVECTOR	w_E	w_A	w_P

Figura 5. Comparaciones paritarias entre los aspectos escogidos.

Para obtener la importancia relativa de los aspectos económico, “ w_E ”, ambiental, “ w_A ” y político, “ w_P ”, fue montado el siguiente problema de Programación Lineal:

$$FO : \text{Max} (w_E + w_A + w_P) \quad (4)$$

sujeto a las siguientes restricciones:

$$\begin{cases} w_E - a_{E-A} \cdot w_A = 0 \\ w_E - a_{E-P} \cdot w_P = 0 \\ w_A - a_{A-P} \cdot w_P = 0 \\ w_E + w_A + w_P = 1 \end{cases} \quad (5)$$

El resultado obtenido fue:

$$\begin{cases} w_E = 0,718 \\ w_A = 0,179 \\ w_P = 0,103 \end{cases}$$

que debe ser interpretado de la siguiente forma: la cuestión económica influye 71,8% en el parecer de los decisores, la ambiental 17,9% y la política 10,3%.

Entonces, teniendo como base los tres aspectos considerados, el espacio de decisión quedó definido por un cubo de 9 unidades de arista. En este espacio, cada píxel del espacio geográfico quedó caracterizado por 3 valores de fricción que variaron desde un mínimo de 1, hasta un máximo de 10. En el espacio de decisión, el vértice (1,1,1) es el punto más deseable o ideal, mientras que el (10,10,10) es el opuesto o antiideal.

Seguidamente, fueron calculadas distancias euclidianas de las coordenadas de cada píxel al punto ideal, pero, previamente, fue necesario deformar el espacio de decisión, multiplicando las coordenadas

del eje económico por “wE”, las del eje ambiental por “wA” y las del eje político por “wP”.

Finalmente, aplicando una combinación de comandos del programa IDRISI, se calculó el trazado que en conjunto totaliza la mejor combinación de píxeles caracterizados por su distancia al punto ideal y que es mostrado en la Figura 6.

Conclusiones

El objetivo del presente trabajo fue elaborar un modelo de apoyo a la decisión para ayudar a la definición del trazado de obras de ingeniería con características unidimensionales, como diques, canales, rutas, etc. La aplicabilidad de este modelo fue verificada en la definición del trazado de una porción de la defensa norte de la ciudad de Resistencia, Chaco.

El trabajo partió de la extensión de la Programación Dinámica a un espacio geográfico –campo tradicional de utilización de los SIG-, con discretización espacial de tipo raster y que puede ser encuadrada en el denominado problema de caminos de mínimo costo (least-cost-path).

Fueron adoptados tres aspectos como relevantes a la solución del problema, no siendo este número una limitación de la metodología propuesta. La conjugación de estos tres aspectos fue hecha aplicando una variante de la Programación de Compromiso elaborada al efecto, pero para aplicarla fue necesario utilizar el Método del Análisis Jerárquico, que se resolvió a través de la Programación Lineal.

Los programas de SIG de más amplia difusión poseen comandos para resolver con ciertas limitaciones problemas de trazado óptimo. Sin embargo, su utilización en un contexto multiobjetivo es comúnmente realizada por medio de una función objetivo de tipo “suma ponderada” de los indicadores de los aspectos considerados relevantes, donde los

ponderadores son establecidos por negociaciones entre los tomadores de decisiones reales. El empleo de un abordaje basado en la Programación de Compromiso y el Método de Análisis Jerárquico intenta introducir un poco de objetividad en esta tarea con connotaciones tan subjetivas.

El modelo desarrollado se mostró eficaz y eficiente, teniendo en cuenta que no hacen falta programas computacionales muy caros para su utilización. Además, los tomadores de decisiones reales se mostraron muy cómodos al utilizar el esquema propuesto, basado en el cálculo de distancias euclidianas.

Referencias bibliográficas

- [1] SIMONOVIC, S.P. 1992. Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.118, n.3, p.262-280.
- [2] COLLISCHONN, W.; PILAR, J.V. 2000. A direction dependent least-cost-path algorithm for roads and canals. *International Journal of Geographical Information Science*, London, v.14, n.4, p.397-406.
- [3] NEOS Guide. 1996. [Argone: Optimization Technology Center]. Disponible em: <<http://www-c.mcs.anl.gov/home/otc/Guide>>.
- [4] JACQUET-LAGRÈZE, E. [1994?]. Conceitos básicos para suporte de decisão multi-critério. In: BANNA E COSTA, C. Métodos de decisão multicritérios e aplicações. Florianópolis: UFSC. p.6-14.
- [5] BARREDO CANO, J.I. 1996. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio. Madrid: RA-MA. 264p.
- [6] ANDREU ÁLVAREZ, J. 1993. Análisis multiobjetivo. In: Conceptos y métodos para la planificación hidrológica. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. p.239-248.

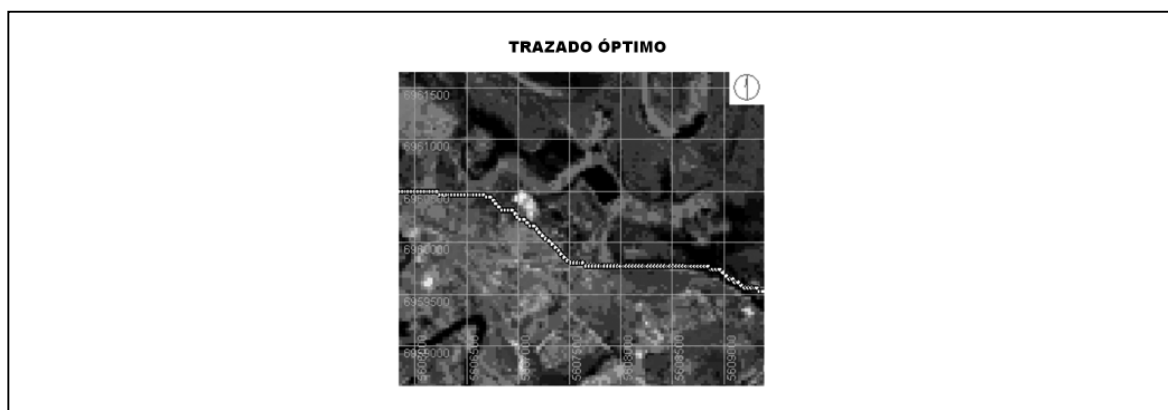


Figura 6. Trazado óptimo de la defensa norte de Resistencia.

- [7] ROMERO, C. 1996. Análisis de las decisiones multicriterio. Madrid: Algorán 115p.
- [8] EASTMAN, J. R. 1995. Idrisi for Windows: users guide. Worcester: Clark University.
- [9] SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. 1978. Remote sensing: the quantitative approach. New York: McGraw-Hill. 397p.
- [10] PILAR, J.V. 2001. Modelo de optimización multiobjetivo como sistema de apoyo a la decisión en el proceso de otorgamiento de becas en las facultades de la UNNE. In: ENCUENTRO NACIONAL DE DOCENTES DE INVESTIGACIÓN OPERATIVA, 14., [e] ESCUELA DE PERFECCIONAMIENTO EN INVESTIGACIÓN OPERATIVA, 12., Huerta Grande, Córdoba. Anales.
- [11] SAATY, T. 1991. Método de análisis jerárquica. São Paulo: Makron. 367p.

