

VERIFICACIÓN DEL TRAZADO DE LA DEFENSA NORTE DE LA CIUDAD DE RESISTENCIA APLICANDO UN ABORDAJE MULTI OBJETIVO

Jorge V. Pilar

Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste – UNNE. Av. Las Heras 727. (3500) Resistencia, Chaco, Argentina

Mail de contacto: jvpilar@gmail.com

RESUMEN

El trazado de un terraplén de defensa contra inundaciones tendría, en principio, un número indeterminado de alternativas. La selección del trazado más conveniente puede ser realizado aplicando técnicas como la Programación Dinámica y las utilizadas para resolver el problema conocido como caminos de mínimo costo (least-cost-path). Por su parte, 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, al punto que la mayoría de los programas comerciales para SIG tienen incorporados comandos que, con ciertas limitaciones, resuelven ese problema.

Sin embargo, sea cual fuere el abordaje, siempre es necesario definir una función objetivo (FO) a optimizar y ello no es tarea fácil, pues deben ser conjugados objetivos de satisfacción de necesidades sociales, políticas, ambientales y económicas, entre otras, generándose 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 verificación del trazado de parte del terraplén de defensa norte de la ciudad de Resistencia (Chaco).

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

1 INTRODUCCIÓN

Para este trabajo se diseñó un modelo de apoyo a la decisión, basado en un abordaje multiobjetivo/multicriterio, para la verificación del trazado de parte del terraplén de la defensa norte de la ciudad de Resistencia (Chaco), en un tramo de 3,50km, tratando de formular con rigor científico un modelo de fácil entendimiento y aplicabilidad. En forma más amplia, el desarrollado serviría, también, para el diseño de cualquier obra de ingeniería con características lineales (diques, canales, caminos, etc.).

La elección del trazado de obras de ingeniería debería hacerse utilizando técnicas modernas de optimización, pues utilizar los escasos recursos (especialmente los financieros) con eficiencia debería ser el principio que guíe el planeamiento de las mismas. En el caso particular de las obras con características lineales, habría que buscar que esos trazados sigan los preceptos de los denominados caminos de mínimo costo o, según la jerga de la bibliografía específica, "least-cost-path".

El problema de los caminos de mínimo costo comenzó a ser estudiado 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 de un 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 (Pilar, 2012).

Por otra parte, existen situaciones de la ingeniería práctica, en las 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 como "least-cost-path" (caminos de mínimo costo).

El costo debe ser entendido como una fricción, que podría medirse en términos económicos, de distancia, tiempo de viaje, riesgo, impacto ambiental, etc. Por lo tanto, en ese contexto, queda configurado un típico problema de optimización: una función (de costos) a ser optimizada (minimizada), que puede ser más o menos compleja, 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, lógicamente, una línea recta. Sin embargo, si sobre ese plano son superpuestas otras capas que representen 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, 2000). La determinación de la importancia relativa de cada factor de fricción podría resolverse con técnicas de optimización multiobjetivo/multicriterio.

Los conceptos y definiciones asociados a la optimización multiobjetivo/multicriterio intentan, de alguna manera, hacer más objetivo el (casi) siempre 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, 1996).

De forma diferente a la optimización tradicional, con un solo objetivo, donde se maximiza o minimiza una única función objetivo, en la multiobjetivo/multicriterio hay que optimizar un vector y ello, en teoría, es imposible: en realidad, no existe "la" solución óptima, sino un conjunto de soluciones que satisfacen en diferente grado y forma los objetivos escogidos (Andreu, 1993).

2 LA PROGRAMACIÓN DE COMPROMISO

Este método, desarrollado por Zeleny en 1973, considera varios objetivos y se basa en que existiría una alternativa ideal, típicamente 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, 1996).

Entonces, para cada objetivo es necesario calcular la distancia al 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 $[f_j(x)]$, 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 en 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 (peso) que el decisor atribuye al objetivo j-ésimo, la solución de mejor compromiso surgirá del siguiente problema de optimización (Romero, 1996):

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

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 diferente. 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 adaptaciones, las que serán descriptas seguidamente, que incluyen, entre otras, la aplicación de procedimientos propios del Método de Análisis Jerárquico (MAJ).

3 LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Para aplicar el modelo desarrollado, 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 modelo).

En caso que el espacio geográfico estuviese discretizado en celdas elementales o píxeles (típicamente en formato “raster”), sería posible realizar tantos mapas del área en estudio como aspectos estén siendo considerados, en los que cada píxel contendrá un número que indicará la caracterización de esa porción de terreno, según cada uno de esos aspectos.

Seguidamente, se debe realizar un cambio, del espacio geográfico a un “espacio de decisión”, en el cual las coordenadas corresponden a cada uno de los aspectos analizados. En ese nuevo espacio de decisión se representan cada uno de los píxeles del espacio geográfico.

Como los aspectos que estén siendo tenidos en consideración pueden ser muy diferentes, es necesario adoptar algún esquema de uniformización para poder compararlos en una misma métrica. Para este caso, se aplicó el concepto de “umbrales de indiferencia”, siguiendo la metodología presentada por el mismo autor en un trabajo anterior (Pilar, 2001). Según ese esquema, se asignó una puntuación 1 a la mejor situación y 10 a la peor.

De esta manera, el espacio de decisión queda 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 (peso). Sin embargo, es común que cada aspecto tenga una importancia diferenciada y que podrían caracterizarse 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 paralelepípedo, pues las coordenadas de cada eje deberían ser afectadas por los coeficientes recién mencionados (Figura 1).

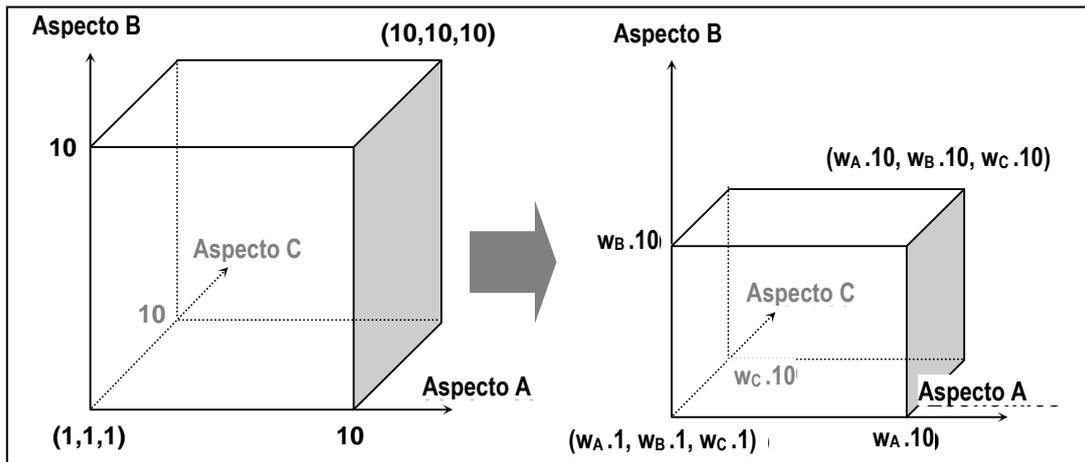


Figura 1 - Deformación del espacio de decisión

Así definido el espacio de decisión, es posible determinar para cada píxel del espacio geográfico a qué distancia se sitúa del punto ideal.

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 (o target, denominado en este trabajo “punto ideal”), caracterizada por determinados valores de los aspectos considerados relevantes, y escoger la alternativa que tenga la menor distancia con relación a esa situación.

La variante utilizada en este trabajo consistió en elaborar un mapa de fricción en formato “raster”, en el cual cada punto del espacio geográfico queda caracterizado por su distancia al punto ideal del espacio de decisión.

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

$$d_i = \left\langle [w_A \cdot (X_{i-A} - 1)]^2 + [w_B \cdot (X_{i-B} - 1)]^2 + [w_C \cdot (X_{i-C} - 1)]^2 \right\rangle^{0,5} \quad (3)$$

en la cual, “ w_A ”, “ w_B ” y “ w_C ” representan las importancias relativas (pesos) de los aspectos A, B y C, respectivamente.

Con ese nuevo mapa de fricción, en el que cada unidad del espacio geográfico está 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 (2000) o utilizando los comandos propios de algún programa comercial de SIG, por ejemplo el IDRISI®, siendo esto último lo realizado en este trabajo.

4 TRAZADO ÓPTIMO DEL TERRAPLÉN DE DEFENSA NORTE DE LA CIUDAD DE RESISTENCIA

La metodología desarrollada se aplicó para la verificación de parte de la traza del terraplén de la defensa norte de la ciudad de Resistencia (Chaco), en un tramo de 3,50km.

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 esas inundaciones se ejecutó un sistema de defensas, que en su tramo norte está constituido por un terraplén.

Para la verificación buscada, en interacción con los tomadores de decisiones reales (decisores políticos) se estableció que un trazado óptimo debería contemplar, como mínimo, 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 a través de un análisis de riesgo hidrológico). Como el ancho de ese coronamiento estaba fijado de antemano, lo mismo que los taludes, la sección transversal del terraplén en un determinado píxel reflejaría la fricción económica buscada (costo de construcción del mismo).

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

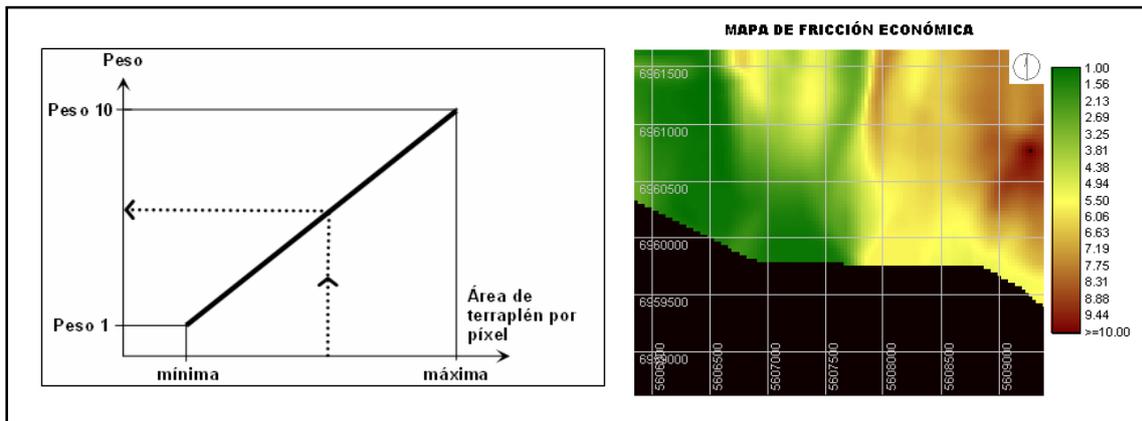


Figura 2 - Umbrales de indiferencia y mapa de fricción económica

Para caracterizar la fricción ambiental, se utilizó como indicador el 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, en lo posible, ser preservadas. Por no ser aplicable, no se utilizó el 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.

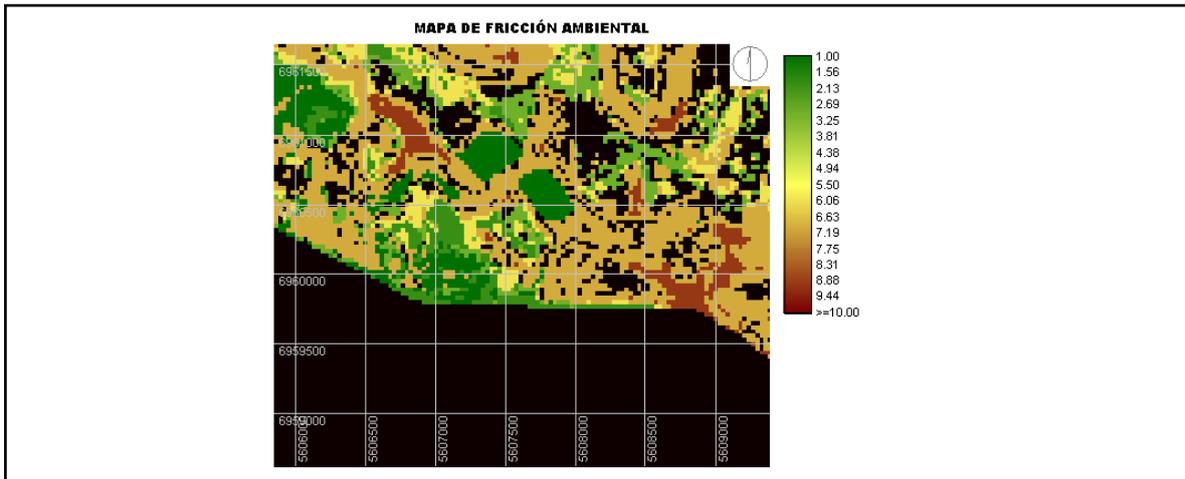


Figura 3 - Mapa de fricción ambiental

Con respecto al último aspecto considerado (el político), los tomadores de decisiones coincidieron en que sería deseable, desde una perspectiva política, que el terraplén de defensa se localice lo más al norte de la ciudad que sea posible, para ganar terrenos defendidos. Entonces, se elaboró un mapa en formato raster que representa, para cada píxel, la distancia al límite norte de la ciudad. Como esta fricción es caracterizada por una variable continua, fue posible 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 a dicho límite, pues más allá de esa 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.

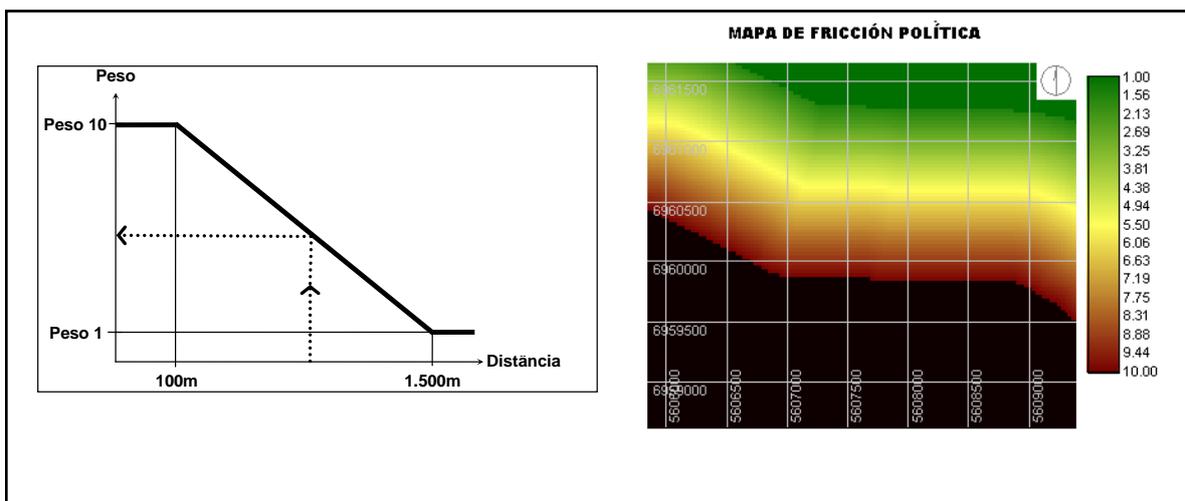


Figura 4 - Umbrales de indiferencia y mapa de fricción política

Para establecer la importancia relativa de los tres aspectos considerados, fue utilizado el Método de Análisis Jerárquico, desarrollado por Thomas Saaty (Saaty, 1991), que se basa en la comparación de a pares (comparaciones paritarias) entre los mismos, realizada a través de una matriz; se puede demostrar que el autovector normalizado de esa matriz representa la importancia relativa de cada uno de esos aspectos.

La matriz de las comparaciones paritarias, rellena por los propios tomadores de decisiones, es mostrada en la Figura 5.

	Económico	Ambiental	Político
Económico	1	4	7
Ambiental	1/4	1	7/4
Político	1/7	4/7	1
AUTOVECTOR	0,718	0,179	0,103

Figura 5 - Comparaciones paritarias entre los aspectos escogidos

El autovector de la Figura 5 debe ser interpretado de la siguiente forma: la cuestión económica influye 71,8% en el parecer de los decisores (w_E), la ambiental 17,9% (w_A) y la política 10,3% (w_P).

Entonces, siendo tres los 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 (coordenadas), 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, para cada píxel del espacio geográfico se calculó su distancia al punto ideal, pero, previamente, fue necesario deformar el espacio de decisión, multiplicando las coordenadas del eje económico por " w_E ", las del eje ambiental por " w_A " y las del eje político por " w_P ".

Finalmente, aplicando una combinación de comandos del programa IDRISI® (la mayoría de los programas de SIG poseen comandos similares), se determinó el trazado que, en conjunto, totaliza la mejor combinación de píxeles que minimiza la distancia al punto ideal y que es mostrado en la Figura 6.

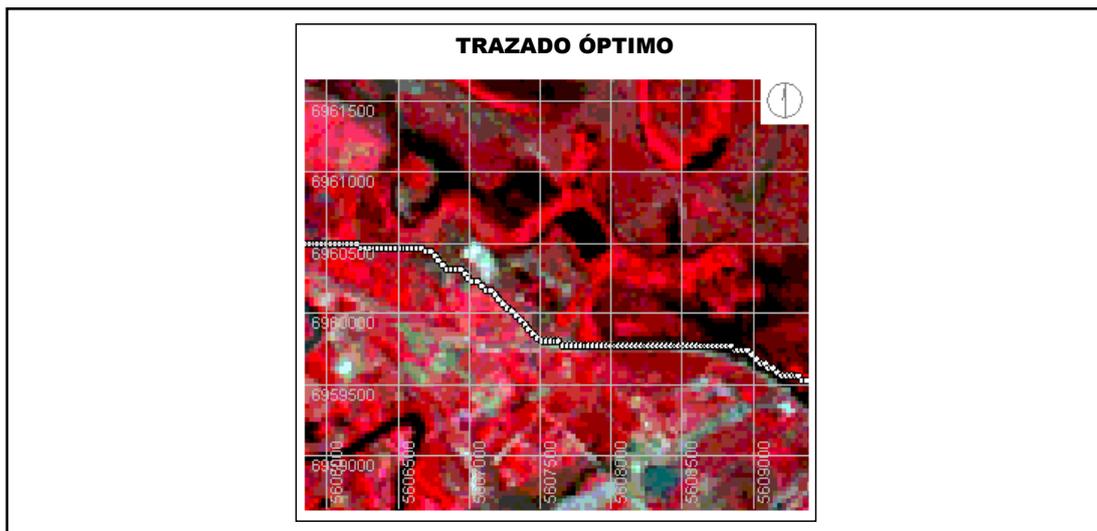


Figura 6 - Trazado óptimo de la defensa norte de Resistencia

En el tramo de 3,50km analizado, el trazado que surgió de la aplicación del modelo que se desarrolló coincidió con la traza del terraplén de defensas ya construido en alrededor del 60% de su extensión. En el trecho restante, la diferencia fue de apenas unas decenas de metros.

Esa diferencia radica, fundamentalmente, en el hecho que en el sector en el que se verificó la misma, el terraplén se construyó paralelo a la Av. Nicolás Avellaneda (que coincide con la Ruta Nacional N°16), límite norte de la ciudad de Resistencia.

5 CONCLUSIONES

El objetivo del presente trabajo fue verificar el trazado de parte del terraplén de la defensa norte de la ciudad de Resistencia (Chaco). Para ello se elaboró un modelo de apoyo a la decisión que combina técnicas de optimización multiobjetivo/multicriterio y otras de los SIG.

El modelo 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 esos tres aspectos fue hecha empleando una variante de la Programación de Compromiso elaborada al efecto, pero para aplicarla fue necesario utilizar el Método del Análisis Jerárquico, dos técnicas de optimización multiobjetivo/multicriterio.

Es importante destacar que el resultado arrojado por el modelo que se desarrolló no difiere significativamente de la traza del terraplén de defensa construido.

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

Finalmente, dicho modelo podría ser aplicado al diseño de cualquier obra de ingeniería con características lineales, como diques, caminos, canales, etc.

REFERENCIAS

- 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.
- BARREDO CANO, J.I. 1996. *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio*. Madrid: RA-MA. 264p.
- 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.
- 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., ESCUELA DE PERFECCIONAMIENTO EN INVESTIGACIÓN OPERATIVA, 12., Huerta Grande, Córdoba. *Anales*.
- PILAR, J.V. 2012. *Herramientas para la gestión y la toma de decisiones*. 2ª ed. Salta: Editorial Hanne. 138p.
- ROMERO, C. 1996. *Análisis de las decisiones multicriterio*. Madrid: Algorán 115p.
- SAATY, T. 1991. *Método de análisis jerárquica*. São Paulo: Makron. 367p.