

DISCUSIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ALGORITMOS GENÉTICOS HÍBRIDOS APLICADOS A LA OPTIMIZACIÓN DE TRAZADOS*

Jorge E. Núñez Mc Leod, S. Rivera, Juan E. Núñez Mc Leod, P. Rosa y L. Euillades

Instituto CEDIAC, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo
CC 405, 5500 Mendoza, Argentina. TE: 54-(261)-4135000 interno 2100 FAX: 54-261-4380120
e-mail: jnmcLeod@cediac.uncu.edu.ar

Palabras clave: Algoritmos Genéticos, Optimización, Trazados.

Resumen. *El desarrollo de nuevas tecnologías de procesamiento de información de sensores remotos, tales como imágenes de radar, han permitido el desarrollo de nuevas aplicaciones como la construcción de Modelos Digitales de Elevación (MDE). Esto sumado a los Sistemas de Información Geográficos (SIG) han permitido obtener representaciones no sólo topográficas del terreno, sino completas visiones que pueden incluir las trazas sobre el terreno de caminos, vías férreas, ríos, lagos, zonas de deslizamientos, reservas, zonas urbanas, etc. Esta posibilidad viene a abrir un nuevo camino en el trazado de caminos, gasoductos y líneas de alta tensión entre otras.*

En el presente trabajo se discuten las características de un Algoritmo Genético Híbrido (AG-H) aplicado a la optimización de trazados de caminos, gasoductos y de líneas de alta tensión. Este AG-H deberá tener en cuenta no sólo la topografía del terreno sino además otras características importantes como son ríos, lagos, reservas, etc., y así también aspectos constructivos como radios de giro mínimo, pendientes máximas, máximos vanos, etc. Se discuten y formulan, basados en resultados previos, nuevos modelos matemáticos para su aplicación. Se aborda la problemática de las poblaciones iniciales, el problema del tratamiento de las soluciones no factibles y el de los acantilados de Hamming. Asimismo se analizan los esquemas de selección (μ , λ) y ($\mu + \lambda$). La discusión se completa haciendo referencia a los valores adecuados para las probabilidades de cruce y mutación.

* Proyecto financiado por la Secretaria de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Cuyo, 2003-2004.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos lustros el amplio desarrollo que han tenido las técnicas de computación evolutiva y el aumento de la potencia de cálculo de los microprocesadores han permitido encarar con esta técnica problemas antes no abordables. En cualquiera de sus tres vertientes principales¹: algoritmos genéticos, estrategias evolutivas y programación genética, éstas técnicas se han abierto camino y afianzado en sus aplicaciones en ámbitos tan dispares como la segmentación de imágenes^{2,3} y la confiabilidad de sistemas^{4,5}. Pero un nuevo campo de aplicación se está desarrollando frente a la posibilidad de tener acceso más libre de tecnología de sensores remotos⁶. Nos referimos a la posibilidad de utilizar tecnología de imágenes de radar y técnicas de interferometría para la construcción de modelos digitales de elevación⁷ (MDE). Los MDE permiten disponer de modelos topográficos del terreno con una precisión adecuada y en plazos relativamente cortos. Por otra parte el desarrollo de los Sistemas de Información Geográficos⁸ (SIG) permite acceder a información digitalizada de zonas urbanas, rutas, líneas férreas, lagos, reservas faunísticas, etc.

Todo este conjunto de técnicas y tecnologías pueden armoniosamente converger para realizar estudios sobre el trazado de gasoductos, rutas y tendidos eléctricos de alta tensión. Aún hoy el trazado, por ejemplo, de un gasoducto se realiza con metodologías que optimizan a criterio de un topógrafo y por tramos el tendido; pero que dista mucho de permitir una optimización global del trazado. En este trabajo se procederá a la discusión de las características requeridas por un Algoritmo Evolutivo para hacer frente a estos tipos de trazados utilizando las modernas tecnologías mencionadas en el párrafo anterior.

2 CONSIDERACIONES SOBRE DIFERENTES TRAZADOS

2.1 Trazado de gasoductos

Nos referiremos con exclusividad a los gasoductos que deben tenderse desde los pozos de explotación a las plantas de procesamiento. De principal interés en estos trazados son ciertas características deseables como son: que el trazado transcurra en su mayoría sobre crestas en el terreno, evitando de esta manera una serie de riesgos. También se prevé una distancia mínima a centros urbanos, el no traspaso de reservas o lagos, o de propiedades privadas que no hayan dado su consentimiento para el paso del gasoducto, evitar zonas de deslizamientos, etc. Por otra parte se requiere disminuir los cambios de pendiente que influyen en la pérdida de carga, limitar las pendientes, tanto en el sentido de la traza como en el transversal, a un máximo, disminuir los puntos bajos del trazado (mínimo local en la cota), etc. Asimismo los trazados deben respetar ciertos radios de giro mínimos dependiendo del diámetro de la tubería, la cercanía de rutas (para un acceso adecuado sin necesidad de construir nuevos caminos tanto para la construcción como para su mantenimiento), disminuir el movimiento de suelos, disminuir la longitud total del trazado, disminuir el cruce de ríos de 1er y 2do orden, disminuir el cruce de rutas, evitando en lo posible las rutas nacionales y provinciales asfaltadas, etc.

Como puede apreciarse la cantidad de aspectos a tener en cuenta es sumamente variado y

requiere de información en distinto tipo de soporte para ser utilizada. Aspecto que veremos más adelante. Por ahora nos interesa dejar en claro la complejidad que se debe abordar.

2.2 Trazado de líneas de alta tensión

El trazado de líneas de alta tensión tiene muchas similitudes con el caso anterior y por ello nos referiremos sólo a dos aspectos adicionales de gran importancia, la selección del tipo de torre y el pandeo máximo de la línea permitido. Estos dos aspectos juegan un papel fundamental en el momento de demarcar un trazado tentativo y pueden penalizar localmente un trazado. Este punto lo trataremos en particular más adelante.

2.3 Trazado de rutas

El trazado de rutas incorpora características que hacen una marcada diferencia con respecto a los requerimientos de trazados de gasoductos y de líneas de alta tensión. En primer lugar y fundamental, el camino requiere ser trazado sobre un terreno adecuado, además la materia prima para la construcción del mismo debería estar disponible en las cercanías del camino ya que los volúmenes a desplazar suelen ser importantes. Dependiendo del tipo de ruta (camino de montaña, de llano, autovía, etc.) existen restricciones relacionadas con el radio de giro de las curvas y otros aspectos constructivos como pendientes, anchos mínimos, banquetas, etc.

3 EL SOPORTE DE LA INFORMACIÓN

3.1 El modelo digital de elevación

Hasta hace algunos años los MDE se construían a partir de las cartas topográficas del IGM (Instituto Geográfico Militar) o a través de estereoscopia óptica con fotografías aéreas. En la actualidad se pueden generar estos modelos digitalmente a través de estereoscopia óptica de imágenes Spot o a partir de interferometría de imágenes de radar. Ambas técnicas aplicadas a los casos adecuados brindan resultados satisfactorios.

Estos modelos básicamente son las coordenadas de un punto sobre la superficie de la tierra, dado por (x,y,z) usando coordenadas Gauss-Kruger. De éstos se obtendrá toda la información relacionada con la topografía del terreno. Pero esta topografía tiene mallas con un nivel de detalle que puede ser en algunos casos de 30m, 90m, 180m o hasta de 1km. Cabe aclarar que existen MDE de mayor detalle; pero no son masivamente utilizados. Esta aclaración es importante ya que trazados de pocos kilómetros en zonas con una gran rugosidad requerirían MDEs con precisión de metros y probablemente el costo de su construcción no justifique su aplicación. En cambio al hablar de trazados de decenas de kilómetros o más, claramente un MDE con una malla de 30m, 90m o incluso 180m puede resultar altamente beneficioso.

3.2 El sistema de información geográfico

Un SIG es una herramienta informática que permite básicamente relacionar elementos (e.g.

rutas, lagos, zonas urbanas, etc.) con coordenadas geográficas. Un SIG puede trabajar a diferentes escalas, mostrando desde la información del loteo de un barrio hasta el trazado de rutas de una región (e.g. La Patagonia o Sudamérica). Los elementos a incluir en un SIG dependen del destino de éste. En nuestro caso incluimos elementos tales como: zonas urbanas, lagos, rutas, líneas de ferrocarril, reservas ecológicas, límites internacionales, propiedades privadas de acceso prohibido, zonas de deslizamientos, ríos 1^{ros} y 2^{ros}, zonas de deslizamiento, tipo de suelos, etc. La información registrada en el SIG puede ser obtenida de imágenes LANDSAT 7.

Las imágenes LANDSAT 7 son un conjunto de imágenes de una misma zona; pero tomadas para distintas bandas del espectro. La combinación de bandas permite resaltar diferentes características en el terreno como: zonas urbanas, zonas de cultivos, rutas, líneas de ferrocarriles, ríos, lagos, lagunas y represas, etc. La posterior digitalización de estas características permiten su incorporación como elementos del SIG.

3.3 Base de datos de conocimiento experto

Las características técnicas del trazado de gasoductos, de líneas de alta tensión y de rutas se formalizan a través de una base de datos de conocimiento experto. Esta tendrá por finalidad evaluar los posibles trazados y determinar el nivel de cumplimiento del estado del arte en el tema. La construcción de esta base de datos no es trivial ya que no sólo incluye información técnica de diseño sino también información relevante sobre la forma de la construcción de los gasoductos, las líneas de alta tensión o las rutas (e.g. facilidad de acceso, rutas cercanas, cercanía de materia prima, etc.).

4 EL ESPACIO DE BÚSQUEDA

Los problemas discutidos en este trabajo se restringen a aquellos trazados que tienen 2 puntos extremos y cuyo recorrido es desconocido. Basándonos en esto, el espacio de búsqueda se restringirá a un cuadrado o rectángulo que incluya los 2 extremos y que incluya bordes adecuados para tener en cuenta todos los posibles desvíos de los trazados, ver Figura 1.

En la Figura 1 se muestra una posibilidad para un trazado pequeño. Se ha delimitado la zona de interés, sobre la cual se ha construido un SIG que muestra una zona urbana, rutas, una represa y un río. Teniendo en cuenta la topografía del terreno se ha dejado espacio alrededor de los puntos 1 y 2 (extremos del trazado). También se ha marcado un trazado posible a modo ilustrativo.

Dependiendo de la extensión del trazado se pueden requerir varias imágenes LANDSAT y la superficie a cubrir es mayor; pero la topología del espacio de búsqueda sigue siendo la misma.

5 ALGORITMOS GENÉTICOS

Un algoritmo genético (AG) es un paradigma inspirado en los conceptos de la teoría de la evolución de Charles Darwin⁹. Un AG genérico podría ser definido como:

$$AE = (I, \Phi, \Omega, \Psi, s, t, \mu, \lambda) \quad (1)$$

Donde $I = \mathcal{B}^l$ donde l es la longitud en genes de los individuos. $\Phi: I \rightarrow \mathfrak{R}$ es una función de evaluación que asigna valores reales a cada individuo.

$$\Omega = \{\omega_{p_m} : I^\mu \rightarrow I^\mu, \omega_{p_c, z} : I^\mu \rightarrow I^\mu\} \quad (2)$$

son los operadores genéticos de mutación y cruce respectivamente. la función de transición de generación $\Psi : I^\mu \rightarrow I^\mu$ representa el proceso completo para generar a partir de una población dada otra. $s : I^\mu \rightarrow I^\mu$ es el operador de selección de progenitores $t : I^\mu \rightarrow \{\text{verdadero, falso}\}$ es un criterio de terminación y, μ y λ son los tamaños de las poblaciones progenitora y descendiente respectivamente. Para el caso visto $\mu = \lambda$.

El proceso consiste en la generación de una población de individuos en cuyos cromosomas (generalmente una cadena de 1s y 0s) se encuentran codificadas soluciones alternativas y aleatorias, cada individuo representa una propuesta de solución al problema (que puede ser válida o no). A continuación cada individuo es evaluado para ver si cumple con las restricciones del problema y se le asigna una puntuación (mérito) o se lo descarta (o se intenta por algún procedimiento lograr su reparación, es decir se lo trata de transformar en una solución válida). Cuando se ha terminado la evaluación de todos los individuos, desde los individuos más aptos (mejores soluciones) a los peores se les asignan pesos, que determinarán su probabilidad de cruce. Así los mejores individuos serán elegidos una mayor cantidad de veces para generar descendencia mientras que los peores pueden incluso no ser elegidos.

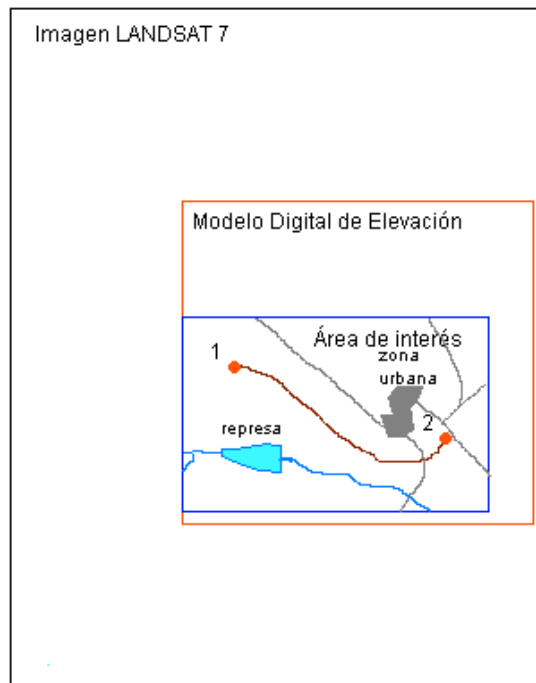


Figura 1. Posible esquema de uso de recursos

La Figura 2 muestra el esquema clásico de cruce de AGs. En donde después de seleccionar a los progenitores se elige aleatoriamente un punto de cruce. A continuación se intercambia el material genético y se han obtenido 2 descendientes.

Otro clásico operador de importancia es el operador de mutación. Este actúa aleatoriamente (en general con una baja probabilidad) sobre los individuos y aleatoriamente elige un gen al cual complementa (i.e. si el gen tiene un valor de 1 lo cambia por 0 y viceversa).

Después de la obtención de la nueva población un conjunto de estos pueden ser no viables. Esto implica que no contienen en sus genes una solución válida. Una alternativa es tratar a estos individuos mediante una rutina que repare los genes defectuosos, otra es simplemente desecharlos.

Hasta acá se ha explicado muy resumidamente la estructura y el proceso de evolución de un AG. A continuación se hará un planteo de un AG Híbrido (AG-H) nuevo orientado específicamente a la obtención de cuasióptimos en trazados.

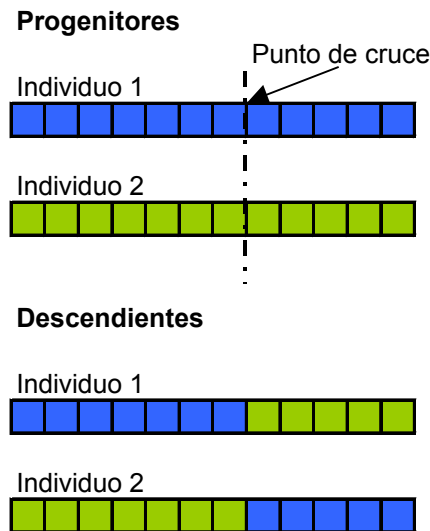


Figura 2. Esquema clásico de cruce de AGs

6 ALGORITMO GENÉTICO HÍBRIDO

Podemos definir nuestro AG-H de la siguiente manera:

$$AE = (I, \Phi, \Omega, \Psi, s, t, \mu, \lambda) \quad (3)$$

donde I es el espacio de los individuos que definiremos como

$$\bar{\alpha}_i(t) \in P(t) = \{\bar{\alpha}_1(t), \dots, \bar{\alpha}_\mu(t)\} \forall i \in \{1, \dots, \mu\} \quad (4)$$

$$\bar{\alpha}_i(t) = (\bar{\alpha}_1(t), \bar{\alpha}_2(t) | \bar{\alpha}_i(t) = (a_1, \dots, a_l) \in \mathfrak{R}^l) \quad (5)$$

$\tilde{\alpha}_i(t)$ es la matriz del individuo i en una determinada generación t . Esta matriz almacena las coordenadas (x,y) que definen la traza del ducto. $\bar{\alpha}_i(t)$ es el vector 1 del individuo i , en la que se almacenan las coordenadas x . $P(t)$ es el conjunto de individuos. μ es el tamaño de la población de progenitores y l la longitud de los cromosomas.

Φ es la función de ajuste tal que es $\Phi : \mathfrak{R} \rightarrow \mathfrak{R}$ y la definimos como

$$\Phi(\tilde{\alpha}_i(t)) = \sum_{j=1}^z \Theta_{\xi_j}(\tilde{\alpha}_i(t)) \quad (6)$$

$$\Theta = \left\{ \Theta_{\xi_1}, \dots, \Theta_{\xi_z} \mid \Theta_{\xi_i} : I \rightarrow \mathfrak{R} \right\} \quad (7)$$

Θ es el conjunto de funciones de ajuste. Estas tienen en cuenta las características que nos interesan evaluar del trazado (e.g. longitud del gasoducto, la cantidad de puntos bajos, el total de longitud ascendente, el total de longitud que transcurre fuera de filos montañosos, la pendiente máxima positiva, la distancia de la línea de alta tensión al suelo, el tipo de torre utilizada, el radio de giro en las curvas de la ruta, etc.).

A continuación definiremos los operadores genéticos de mutación y recombinación. Ambos operadores se beneficiarán de la estructura con la cual fueron definidos los cromosomas de los individuos. Estos cromosomas tendrán un comportamiento de tipo pseudodiploide, siguiendo la analogía biológica; pero con la excepción de que no presentarán características de recesión o dominancia y que la actividad del gen requerirá de ambos alelos. Dejando de lado la analogía es fácil entender que un alelo es la x de un punto del trazado y el otro es la y .

Los operadores genéticos se definen en el conjunto Ω

$$\Omega = \left\{ \omega_{\theta_1}, \omega_{\theta_2} \mid \omega_{\theta_i} : I^\mu \rightarrow I^\lambda \right\} \quad (8)$$

θ_i son los parámetros que definen la aplicación del operador genético. Para el operador de mutación

$$\omega_{1\{pm\}} : I \rightarrow I \quad (9)$$

$$\tilde{\alpha}'_i = \omega_{1\{pm\}}(\tilde{\alpha}_i) \quad (10)$$

$$\tilde{\alpha}_i'^j = \begin{cases} \tilde{\alpha}_i^j + \Delta d \\ \tilde{\alpha}_i^{j+k} = \tilde{\alpha}_i^{j+k} \cdot \bar{c}_0 + \bar{c}_1 \end{cases} \quad \forall |k| \in [1, \eta] \quad (11)$$

$\tilde{\alpha}_i'^j$ es un vector el cual sufrirá un desplazamiento y simultáneamente el entorno de puntos, a este también será trasladado utilizando una transformación lineal. La justificación para este procedimiento se basa en la necesidad de realizar una exploración de los alrededores del trazado.

El operador recombinación será definido como:

$$\omega_{2\{pr\}} : I^2 \rightarrow I \quad (12)$$

Los individuos seleccionados para recombinarse se identificarán como $\bar{\alpha}_f(t)$ y $\bar{\alpha}_s(t)$.

$$\bar{\alpha}_f(t) = (\bar{\alpha}_{1f}, \bar{\alpha}_{2f}) \quad (13)$$

$$\bar{\alpha}_s(t) = (\bar{\alpha}_{1s}, \bar{\alpha}_{2s}) \quad (14)$$

Aplicando el operador recombinación para obtener dos nuevos descendientes

$$\{\bar{\alpha}_v(t), \bar{\alpha}_q(t)\} = \{\omega_{2\{pr\}}(\bar{\alpha}_f(t), \bar{\alpha}_s(t))\} \quad (15)$$

$$= \{\omega_{2\{pr\}}((\bar{\alpha}_{1f}, \bar{\alpha}_{2f}), (\bar{\alpha}_{1s}, \bar{\alpha}_{2s}))\} \quad (16)$$

$$= \{(\bar{\alpha}_{1f}, \bar{\alpha}_{2s}), (\bar{\alpha}_{1s}, \bar{\alpha}_{2f})\} \quad (17)$$

El proceso de recombinación se aparta de las tradicionales técnicas de cruce de un punto o multipunto. Esta característica le confiere al algoritmo una gran robustez en la generación de descendientes viables desde el punto de vista de su genotipo, eliminando la necesidad del tratamiento de individuos no viables, lo cual penalizaría fuertemente el tiempo de ejecución.

El proceso de selección se formaliza como:

$$Ps(\bar{\alpha}) = P\{\bar{\alpha} \in s(P(t)) | \bar{\alpha} \in P(t)\} \quad (18)$$

$$s : I^\mu \rightarrow I^\lambda \quad (19)$$

donde s es el operador que selecciona de acuerdo al ajuste relativo de cada individuo los progenitores de la siguiente generación. El resto del algoritmo responde a los esquemas tradicionales y no aporta nada nuevo a lo que se quiere analizar en este trabajo. En cambio sí es importante comentar el criterio para la creación de la población inicial.

Para el tipo de problema encarado, se eligió utilizar individuos de concepción muy simple. Se preveía que la fuerte incidencia de las mutaciones adaptaría adecuadamente a los individuos. Individuos generados por tramos de arcos de circunferencia y poligonales.

7 DISCUSIÓN DE CARACTERÍSTICAS

El enfoque pseudodiploide aplicado es una estrategia tendiente a minimizar la generación de individuos no viables. Esto permitió prescindir de rutinas de reparación de individuos mejorando la performance del algoritmo. El enfoque diploide¹⁰ puede ser conseguido de una manera simple; pero se traduciría en un leve aumento de los cálculos necesarios y por ello no fue considerado.

Enfoques diferentes han sido propuestos por Hocaoglu & Sanderson¹¹ y por Smierzchalski & Michalewicz¹². En éstos se trata de seguir una codificación típica y se plantean operadores genéticos que permitan tratar a los individuos no viables creados. La ventaja del AE-H propuesto en este trabajo es su simplicidad (2 operadores genéticos vs. 7 tanto en [10] como en [11]) y eficiencia (se generan pocos individuos no viables y los que surgen no requieren tratamiento, pues son descartados).

La población inicial se ha propuesto como una combinación de segmentos de arco y poligonales que unen los 2 puntos extremos. Esta solución simple, fue prevista debido a que

la fuerte influencia de las mutaciones adaptaría adecuadamente los trazados a los requerimientos. Este enfoque está fuertemente ligado a los conceptos de exploración y explotación. Así un AG clásico realiza un fuerte exploración del espacio de búsqueda, tratando de localizar un cuasióptimo. Nuestro híbrido incorpora la fuerte capacidad de las Estrategias Evolutivas para realizar una explotación de las soluciones ya encontradas. Típicamente se sigue un esquema que conduce los AG de una primer etapa exploratoria hacia una posterior explotadora. En nuestro caso el AG-H se plantea con características similares aunque la capacidad explotadora se encuentra siempre fuertemente manifestada. Trabajos previos utilizaron con éxito para el trazado de ductos un esquema rígido con probabilidades de cruce y mutación de 0,8 y 0,95 respectivamente obteniendo resultados satisfactorios. El nuevo esquema pretende lograr una mejor performance del algoritmo.

Un problema común en los AGs se relaciona con la codificación binaria. En ésta números adyacentes poseen una codificación que difiere en más de un bit, a esto se denomina acantilados de Hamming¹. Si a un esquema de este tipo se le aplica el operador mutación los resultados serán cambios bruscos que más que nada tenderan a desmejorar la solución alcanzada. Una serie de codificaciones diferentes a la binaria tradicional solucionan este problema; pero tal vez la más difundida es la codificación de Gray¹⁰. Sin embargo el AG-H propuesto maneja números reales y una solución alternativa se plantea. El punto básico consiste en generar desplazamientos aleatorios del trazado dentro de un radio determinado y que los puntos adyacentes se reacomoden en la medida de lo necesario (más en el caso de los gasoductos y las rutas que en el de las líneas de alta tensión) para evitar trazados anómalos. Soluciones alternativas se discuten Coello et al.¹³

El esquema (μ, λ) condujo en las ejecuciones del código a resultados del tipo “Random Walk”. Diferentes relaciones fueron probadas con similares resultados. En cambio el esquema $(\mu + \lambda)$ produjo resultados consistentes y de óptima performance para la relación $\mu/\lambda = 1/7$ ¹⁰.

Hasta ahora hemos pensado en un solo AG-H realizando trazados de gasoductos, líneas de alta tensión y rutas. Esto fue posible gracias a las características que comparten las tres técnicas de trazados; pero al acercarnos a los detalles finos veremos que ese único AG-H dará paso a tres adaptaciones particulares.

La primera de ellas, consiste en el AG-H tal como lo hemos visto para ser utilizado en el trazado de gasoductos. La Figura 3 muestra 2 trazados diferentes sobre un MDE. En la figura de la izquierda se ha penalizado más la longitud del trazado y se ha permitido el uso de algunas pendientes, en la imagen de la derecha se han preferido los trazados por los valles (los tonos oscuros representan las alturas menores mientras que los claros representan una elevación de la cota sobre el terreno).

La segunda debe tener en cuenta que cada punto se debe asociar a un tipo determinado de estructura de torre de alta tensión, esto es hecho agregando un componente más a cada gen. Durante el cruce este componente quedará ligado a la componente x del gen. A su vez se debe incorporar un rutina de tratamiento de individuos, que permita advertir sobre la necesidad de un cambio en alguna de las torres para mejorar su adaptación al medio, esto puede ser hecho mediante un enfoque estocástico similar al de la mutación (enfoque elegido) o mediante un proceso de análisis punto a punto.

La tercera adaptación es para el caso de las rutas y requiere de una particular generación de poblaciones iniciales y del tratamiento de las mutaciones, ya que para el caso de caminos de montaña cobran relevancia el movimiento de suelos y las diferencias de cotas entre dos puntos, que en algunos casos requieren o largos rodeos o la construcción de los típicos caracoles.

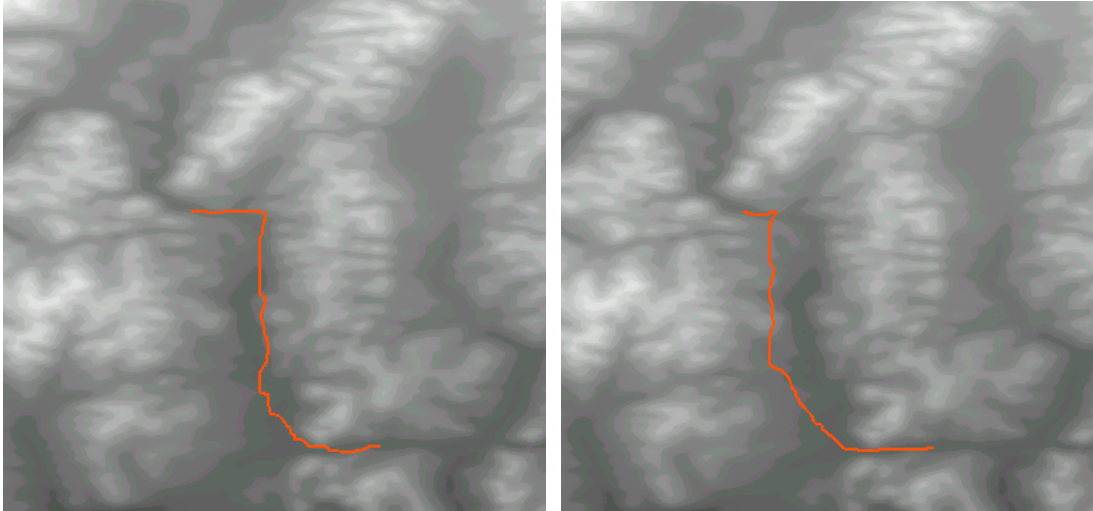


Figura 3. Ejemplos de trazados sobre un modelo digital de elevación

8 CONCLUSIONES

Se ha realizado una exposición general desde las modernas tecnologías utilizadas hasta los nuevos paradigmas evolutivos desarrollados o a desarrollar para encarar el trazado de gasoductos, tendidos de líneas de alta tensión y trazado de rutas. Se han expuesto las bases de los AGs básicos y posteriormente se ha desarrollado con detalle el modelo matemático del AG-H de base propuesto. Se han presentado los resultados en algunos casos de los desarrollos realizados, dando valores concretos para su aplicación, en otros casos se han delineado los pasos que se están dando y el resultado que se espera obtener.

Como principal conclusión se puede expresar que la hibridación de AGs desarrollando paradigmas específicos para estas aplicaciones han resultado en formas eficientes de resolución de los problemas planteados. Que un minucioso estudio de la información disponible, de las restricciones de entorno (ambientales) y técnicas (tanto de diseño como de construcción) han permitido generar herramientas que para el caso del trazado de ductos cumplen con el estado del arte de los mismos, y que suponemos que los otros dos se comportarán en forma similar.

Asimismo el enfoque pseudodiploide permitió una simplificación de los operadores necesarios en los problemas de trazados. Las fuertes características explotadoras del AG-H permitió el abordaje de poblaciones iniciales relativamente simples en comparación con otras alternativas. El esquema $(\mu + \lambda)$ produjo resultados consistentes y de óptima performance para la relación $\mu/\lambda = 1/7$. La estructura con 3 componentes por gen para el trazado de líneas eléctricas es un solución simple y es transparente para los operadores cruce y mutación.

Estudios se están llevando a cabo para la obtención de las rutinas de generación de poblaciones iniciales y del operador mutación para el caso de trazado de ductos.

9 REFERENCES

- [1] T. Bäck, *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*, Oxford University Press, (1996).
- [2] J. E. Núñez Mc Leod y S. S. Rivera, *Extracción de Bordes con un Algoritmo Genético Restringido por Textura*, SVMNI, Simulación con Métodos Numéricos: Nuevas Tendencias y Aplicaciones, *Int. Conf. Proc.*, BI17-BI24 (1998).
- [3] J. E. Núñez Mc Leod y S. S. Rivera, *Algoritmos Genéticos aplicados a la Segmentación de Imágenes y Reconocimiento de Formas*, AMCA, Mecánica Computacional, *Conf. Proc.*, 79 (1999).
- [4] J. E. Núñez Mc Leod, *Selección Óptima de Componentes de un Sistema Tecnológico Complejo*, SVMNI, Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, *Int. Conf. Proc.*, OP41-OP46 (2000).
- [5] J. E. Núñez Mc Leod & J. Barón, *Risk Optimization on CAREM 25 Nuclear Power Plant*, , *Int. Conf. Proc.*, (2003)
- [6] B. Siegal & A. Gillespie, *Remote Sensing in Geology*, John Wiley & Sons, (1980).
- [7] <http://www.spotimage.fr/home/proser/elevat/dem/welcome.htm>, SpotImage, Francia (2002)
- [8] <http://www.usgs.gov/research/gis/title.html>, U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA (2001).
- [9] C. Darwin, *On the Origin of Species by means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*, England, 1859 (<http://www.bbc.co.uk/education/darwin/origin>)
- [10] D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison-Wesley (1989)
- [11] C. Hocaoglu and A. Sanderson, *Planning Multiple Paths with Evolutionary Speciation*, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3(5):169-191 (2001).
- [12] R. Smierzchalski and Z. Michalewicz, *Modeling of Ship Trajectory in Collision Situations by an Evolutionary Algorithm*, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3(4): 227-241 (2000).
- [13] C. Coello, D. Van Veldhuizen and G. Lamont, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*, Kluwers Academic Publishers (2002).