

Uso de algoritmos genéticos

Planificación del trazado de un sitio de construcción

Referencia

Michael J. Mawdesley (University of Nottingham, Nottingham, UK), Saad H. Al-jibouri (University of Twente, The Netherlands) and Hongbo Yang (University of Nottingham, Nottingham, UK). *Genetic Algorithms for Construction Site Layout in Project Planning*. Journal of Construction Engineering and Management, Vol 128, N° 5, October 1, 2002. ASCE. USA.

El trazado de un lugar (*site layout* en inglés) tiene que ver con la existencia, emplazamiento y permanencia de las instalaciones que serán usadas para llevar adelante un proyecto. El trazado enfrenta problemas complicados para formular y difíciles de resolver. A su vez, este trazado es muy importante para todo proyecto de construcción y puede afectar significativamente los costos del proyecto. En el artículo se describen los problemas y se proponen a los algoritmos genéticos como posible solución. Incluye un ejemplo teórico. Luego se extiende a un problema práctico en el cual el costo del movimiento es modelado usando un algoritmo genético aumentado. Se concluye con recomendaciones sobre el uso de algoritmos genéticos en problemas de trazados para construcción.

Introducción

El objetivo del trazado es determinar los trabajos temporales que son requeridos y emplazarlos en espacio y tiempo a través del proyecto. Tiene efectos en: (1) los costos del proyecto, (2) la calidad de los trabajos, (3) la seguridad de las operaciones del proyecto, y (4) los aspectos ambientales de los trabajos. De esta manera el trazado se inscribe en la planificación del proyecto.

Como criterios para que el trazado alcance sus objetivos, están: (i) minimizar los tiempos de viaje, y (ii) eliminar movimientos innecesarios de recursos y manipuleo de materiales. Se ahorra así cantidades importantes de tiempo no productivo. Pese a su importancia, en la práctica se dedica muy poca atención a la planeación del trazado, resultando por ejemplo, en retrasos en la localización de almacenes para materiales. Además, el trazado es dinámico debido a los cambios propios de cada proyecto, lo cual complica el tratamiento del problema. En el artículo, se le aborda con el uso de algoritmos genéticos.

Problemas con el trazado del sitio para construcción

Entrevistando a ingenieros, practicantes y otro personal dedicado a la construcción, se identifican varios factores importantes para el trazado, con significados distintos según el proyecto.

➤ *Rutas de acceso y tráfico*

Con direcciones: hacia, dentro y fuera del lugar de la construcción, en la movilización de trabajadores, equipos y materiales. Afecta los costos, la seguridad y el ambiente. La recomendación general es que las rutas de acceso (y salida) y tráfico no deben interrumpir las líneas de servicio, unir las pero no cruzar las áreas de trabajo.

➤ **Almacenamiento y manipuleo de material**

En relación con el mantenimiento se distinguen de tres tipos: (1) para materiales valiosos que deben ser protegidos, (2) para otros que son peligrosos y también deben ser protegidos, y (3) para materiales que no requieren de protección. A su vez, el manipuleo de materiales de construcción suele ser costoso y demanda de uso de equipo. La recomendación es que el almacenamiento de material debe estar localizado para evitar doble manipuleo y movimientos innecesarios.

➤ **Ambientes para gestión y facilidades de bienestar para los trabajadores**

Las edificaciones para gestión permitirán una buena visión de los trabajos y estar libre de ruidos. Las otras facilidades, como baños, estarán localizadas para causar muy poca interrupción al proyecto.

➤ **Equipos, talleres o salas de trabajo, y servicios**

En proyectos como de grandes carreteras por ejemplo, estas facilidades son muy importantes. Los talleres deben estar localizados con acceso fácil y rutas cortas al área de construcción.

Tareas relacionadas con el trazado

Dentro de los problemas que muestran la complejidad del trazado, están: (i) la dificultad para precisar el mejor plan de la construcción, de ahí el del trazado, (ii) la interrelación con otras tareas de gestión como variaciones en la programación, (iii) alta dinámica, y (iv) escasa investigación sobre el tema.

Un trazado completo debe incluir los siguientes aspectos: deben ser establecidas las necesidades de facilidades temporales, así como su emplazamiento, y los tiempos de localización, cambios y remoción.

Los intentos para abordar este tema han estado orientados a la investigación de operaciones y la inteligencia artificial, sobre la base de los siguientes propósitos que han resultado difíciles de conseguir.

- El soporte de la generación de conocimiento que permita elegir entre varios trazados geográficos.
- La integración de la programación con los aspectos geográficos.
- El posicionamiento de los equipos grandes debe ser considerado en forma separada en el problema del trazado general.
- La búsqueda del arreglo más eficiente dadas las necesidades del trazado y el espacio disponible. La solución embargo, resulta estática.

Respecto a las *restricciones*, hay tres tipos importantes: (i) los requerimientos de área, (ii) los espacios disponibles para la localización, y (iii) en caso de usar pisos múltiples, las limitaciones en altura, así como la distancia entre ellos.

Las soluciones empleadas en estudios previos para el trazado, se pueden agrupar en dos tipos:

- Las que usan algoritmos de optimización buscando *soluciones exactas*, y que resultan aplicables a pequeña escala.
- Los *métodos heurísticos* apropiados para grandes problemas. Se distinguen estas tendencias; (i) desarrollo de modelos ad hoc, (ii) se incorpora la variable tiempo para abordar problemas dinámicos, (iii) se agregan incertidumbres con tratamiento estocástico, y (iv) se añaden criterios múltiples de evaluación.

Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos son técnicas de modelaje basadas en el comportamiento biológico de la teoría de evolución de Darwin. Frente a un problema complejo, las soluciones (o *padres*) se combinan, o una solución *muta* para producir una tercera solución (o *hijo*), cual es evaluada. Si esta tercera solución es *mejor* que alguna de las otras, entonces *sobrevive* y la *peor* de las otras *muere* siguiendo una *aptitud o capacidad de sobrevivencia*. El proceso continúa a través de un número de *generaciones* o iteraciones, cada una de las cuales contribuye con un aporte de *mejora* a la nueva generación.

Debido a su base general y flexibilidad, los algoritmos genéticos tienen muchas aplicaciones. Los principales aspectos que deben ser considerados en su desarrollo son: codificación o iniciación, función de aptitud o capacidad, procedimiento de selección, cruzamiento o reproducción, operaciones de mutación, y culminación o término.

➤ *La codificación*

Es el mecanismo de inicio fundamental en la estructura de los algoritmos genéticos. Es la representación de una solución del problema a ser resuelto, la misma que es conocida como un *cromosoma*. La codificación depende de la naturaleza de las variables del problema. Para la solución se emplean usualmente secuencias binarias, aunque no son apropiadas para el problema de trazado.

➤ *Función de aptitud o capacidad*

Se asigna a cada problema a ser resuelto. Dado un cromosoma particular, la función de aptitud retorna un *valor numérico de aptitud o capacidad*, el cual debe ser proporcional a la *utilidad o capacidad* del individuo que es representado por el cromosoma.

➤ *Procedimiento de selección*

Se asocia al principio de sobrevivencia: las *soluciones aptas* sobreviven, las débiles perecen.

Hay varios procedimientos de selección: la proporcional (el más usado y que puede ser implementado con la técnica de la rueda de la ruleta), la selección por ranking, la selección por torneo, y la selección por truncamiento.

➤ *Proceso de cruzamiento o reproducción*

Un par de cromosomas son seleccionados al azar para ser *padres* y sometidos a cruzamiento. Este proceso implica un intercambio de información de los cromosomas de los padres para dar a un *hijo* con mezclas de genes.

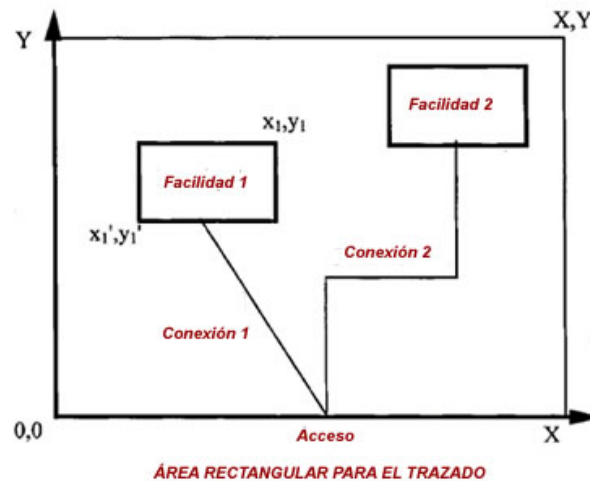
➤ *Operación de mutación*

Después de varias generaciones de cruces, se pierde alguna información genética. Su uso la mutación para restaurarla. En algunas aplicaciones, la mutación es una operación secundaria después del cruzamiento.

➤ *Criterio de terminación*

Es el conjunto de condiciones que deben cumplirse para dar por concluido el proceso iterativo de las generaciones. Aquí, algunos criterios de terminación: el máximo número absoluto de generaciones, el máximo número de generaciones sin mejorar, y la tasa de convergencia de la población.

Información para el trazado



Como ilustración se utiliza un área rectangular orientada según el sistema de coordenadas X,Y. La figura considera dos facilidades: talleres y oficinas, también orientadas según los ejes de coordenadas. La localización de las facilidades se identifica por las coordenadas de las esquinas; así, la facilidad 1 es representada por las esquinas (x_1, y_1) y (x_1', y_1') . La posición de los accesos se presenta también por las coordenadas respectivas.

Las conexiones o rutas para el transporte entre facilidades, o de estas con las edificaciones, pueden ser rectilíneas o reticulares.

Formulación del algoritmo genético

Se trata de M facilidades a ser posicionadas, tanto temporales (o flotantes con localización por determinar) y permanentes (con una posición que no cambia).

La facilidad i , tiene coordenadas (x_i, y_i) y (x_i', y_i') . El área requerida para esta facilidad es $a_i = |x_i - x_i'| (y_i - y_i')|$.

La distancia entre las facilidades i y j , es:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

La función de aptitud (o función objetivo) según ha sido consultada en entrevistas, es:

$$\text{Aptitud} = f(\text{costo de transporte de material} + \text{costo de emplazamiento de facilidades} + \text{costo de remoción de facilidades} + \text{costo de visitas de personal al sitio de trabajo} + \text{otros})$$

Lo cual puede ser expresado como:

$$\text{Aptitud: } \sum_i \sum_j [d_{ij} \sum_k (p_{ijk} q_{ijk})] + \sum_i s_i(x_i, y_i) + \sum_i r_i(x_i, y_i) + \sum_i \sum_j u_{ij} f_{ij} d_{ij}$$

Donde:

d_{ij} : distancia entre la facilidad i y la facilidad j .

p_{ijk} : precio unitario de transporte del material k desde la facilidad i a la facilidad j .

q_{ijk} : cantidad de material k requerida para el sitio de trabajo j desde la facilidad i (cantidad del material k transportado desde la facilidad i a la facilidad j).

$s_i(x, y_i)$ costo de emplazamiento de la facilidad i en la localización (x_i, y_i) . Este costo es una función de la localización (x_i, y_i) .

$r_i(x_i, y_i)$: costo de remoción de la facilidad i en la ubicación (x_i, y_i) . Este costo también es función de la localización (x_i, y_i) .

f_{ij} : frecuencia de visitas de personal de la facilidad i a la facilidad j .

u_{ij} : valor de utilidad de la visita de personal de la facilidad i a la facilidad j .

La formulación puede requerir de algunas restricciones relativas a la localización, superposición o distancia.

➤ **Restricciones de localización**

La ubicación de ciertas áreas pudiera ser inapropiada, por ejemplo por cuidado ambiental. Una forma de establecer la restricción es incrementando el costo de emplazamiento en esa área.

➤ **Restricciones de superposición**

En un área específica no puede haber más de una facilidad.

Considérese una facilidad representada por las coordenadas (x, y) de una de sus esquinas, con área A y ancho z .

La restricción de superposición de los bloques B_i y B_j puede representarse como:

$$\max\{[x_j - (x_i + z_i)][x_j + z_j] - x_i, [y_j - (y_i + \frac{A_i}{z_i})][y_j + \frac{A_j}{z_j}] - y_i\} \geq 0$$

➤ **Distancia entre facilidades**

Por ejemplo, es mejor posicionar un taller ruidoso alejado de una oficina. La restricción de este tipo se expresa con una distancia mínima: $d_{ij} \geq D_{min}$.

U otra, como una maquinaria, que requiere estar cerca del área de trabajo. Aquí, se establece una distancia máxima: $d_{ij} \leq D_{max}$.

Cromosomas y operaciones

Como *cromosoma* en este trabajo se entiende a un arreglo de los valores reales de las coordenadas de las facilidades. Se trata de N facilidades a ser posicionadas.

Considérese dos *cromosomas padres*, P_1 y P_2 :

$$P_1 = (X^{p1}, Y^{p1})$$

$$X^{p1} = (x^{p1_1}, x^{p1_2}, \dots, x^{p1_i}, \dots, x^{p1_N})$$

$$Y^{p1} = (y^{p1_1}, y^{p1_2}, \dots, y^{p1_i}, \dots, y^{p1_N})$$

$$P_2 = (X^{p2}, Y^{p2})$$

$$X^{p2} = (x^{p2_1}, x^{p2_2}, \dots, x^{p2_i}, \dots, x^{p2_N})$$

$$Y^{p2} = (y^{p2_1}, y^{p2_2}, \dots, y^{p2_i}, \dots, y^{p2_N})$$

(x^{p3}, y^{p3}) : son las coordenadas de la facilidad 3 en el cromosoma 1.

(X^{p_i}, Y^{p_i}) : es un arreglo de coordenadas (x, y) de todas las facilidades para el cromosoma i , y debido a que son dos padres, $i=1$ o 2.

◆ Operación de cruce

➤ Objetivo

Obtener un *cromosoma hijo* de P_1 y P_2 :

$$C_1 = (X^{c^1}, Y^{c^1})$$

➤ Algoritmo de combinación aritmética

En el cruce, los valores de las coordenadas de los cromosomas hijos son obtenidos por una combinación aritmética de las coordenadas de los cromosomas padres.

1. Generar aleatoriamente un número entero m , $1 < m < N$.
2. Generar aleatoriamente m números enteros i_k , $1 < i_k < N$ y $1 < k < m$.
3. Para $j=i_k$, $1 < i_k < N$ y $1 < k < m$. α y β son números reales generados aleatoriamente.

$$x_j^{c^1} = \alpha x_j^{p^1} + \beta x_j^{p^2}$$

$$y_j^{c^1} = \alpha y_j^{p^1} + \beta y_j^{p^2}$$

El resto de los valores de las coordenadas de C_1 son directamente copiados de P_1 .

Si la posición de P_1 y P_2 es intercambiada, al aplicar el algoritmo anterior se tendrá otro cromosoma hijo.

Si $\alpha + \beta = 1$, el operador de cruce conduce al promedio pesado los dos cromosomas padres, y las coordenadas del cromosoma hijo estarán entre las dos de los padres. Si se mantiene $\alpha + \beta = 1$, los hijos se localizarán en la línea que une a los padres.

Sin embargo, se tomará en cuenta que las restricciones de localización serán aplicadas a los cromosomas hijos.

Así por ejemplo, sean dos facilidades: $P^1 = [(1,2), (2,3)]$ y $P^2 = [(5,8), (4,2)]$. Sea el número aleatorio $m=1$, $i_k=1$. Se mantiene $\alpha + \beta = 1$ con $\alpha = 0.5$. Un hijo puede tener:

$$C^1 = [(0.5x1 + 0.5x5, 2), (2,3)] = [(3,2), (2,3)]$$

Sólo una posición de la primera facilidad se ha cambiado, y la segunda permanece como tal.

➤ Operador de cruce por intercambio de coordenadas

En esta operación, una o varias coordenadas de un cromosoma padre son intercambiadas con las correspondiente del otro cromosoma padre. Se hace una selección aleatoria.

Alternativamente, en vez de intercambiar coordenadas individuales, el cromosoma total puede ser dividido en sub-secciones, y se intercambian entre éstas.

Como ejemplo, la coordenada x de la primera facilidad se intercambia, obteniéndose el cromosoma hijo: $C^1 = [(5,2), (2,3)]$.

◆ Operaciones de mutación

Todos los cambios con estos métodos deben cumplir las restricciones de localización y frontera.

➤ Mutación por injerto aleatorio

En un cromosoma P aleatoriamente elegido, y en una coordenada también seleccionada aleatoriamente, se agrega un número aleatoria. Se pueden

seleccionar varias posiciones y facilidades para realizar estas operaciones de mutación.

➤ **Mutación por intercambio**

Se pueden intercambiar entre coordenadas x y y en una facilidad, o intercambiar coordenadas entre diferentes facilidades.

A partir de los principios de cruce y mutación pueden hacerse otras operaciones.

Costos por área

El lugar es dividido en cuadrículas reflejando las diferencias geográficas. Los costos de distribución varían según la cuadrícula. Pueden identificarse tres de estos tipos de costos: de emplazamiento, de remoción, y de viajes.

➤ **Costos de emplazamiento**

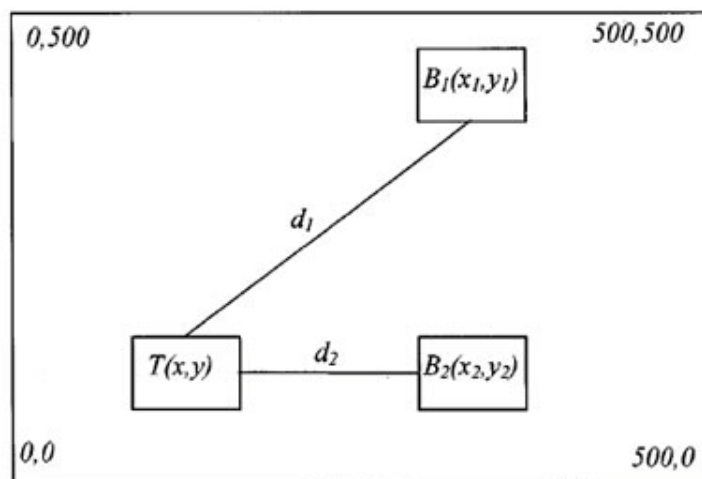
Se establecen estos costos tanto para facilidades temporales como permanentes y de cualquier área ocupada. Para áreas que no están disponibles, puede establecerse un costo suficientemente alto.

➤ **Costos de viaje**

Se refieren al transporte pasando a través de la malla. Estos costos reflejan también las dificultades del recorrido.

Los costos mínimos de viaje pueden ser establecidos usando la teoría de grafos para recorridos rectilíneos, o por geometría para las rutas reticulares.

Ejemplo de ilustración



EJEMPLO DE ILUSTRACIÓN

Se trata de dos edificaciones $B_1(x_1,y_1)$ y $B_2(x_2,y_2)$ que serán construidas en un área definida por $(0,0)(500,500)$. Se necesita establecer una facilidad de servicios $T(x,y)$.

Hay que encontrar la posición $T(x,y)$ que minimice el costo de transporte. Todas las facilidades tienen un tamaño unitario.

➤ **Representación del problema**

La localización de T está definida por sus coordenadas. Así, (x,y) ($0 \leq x \leq 500$) ($0 \leq y \leq 500$) puede ser usado como *gen* para el problema. Diferentes coordenadas (x,y) representan diferentes posiciones de T .

➤ **Evaluación y función de aptitud**

Considérese que el costo de proporcionar el servicio es proporcional a la distancia del mismo. Es necesario entonces minimizar el costo correspondiente:

$$\text{Mínimo Costo de: } p_1q_1d_1 + p_2q_2d_2$$

Donde:

p_i : precio de proporcionar una unidad de material al lugar i , por unidad de distancia.

q_i : cantidad del servicio requerido por el lugar i .

d_i : distancia entre la facilidad temporal y el lugar i .

Normalmente, se busca maximizar la aptitud del algoritmo genético. Así:

$$\text{Aptitud} = k/\text{Costo} \quad k: \text{constante mayor que } 0$$

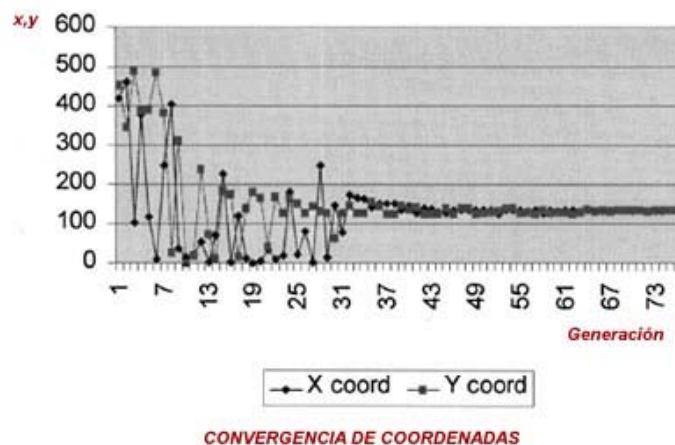
➤ **Trabajo de simulación**

Se ubican las edificaciones $B_1(0,400)$ y $B_2(400,0)$. Cada una requiere de 100 unidades de servicios a ser proporcionados por $T(x,)$. La simulación sigue el proceso típico de algoritmos genéticos. En este caso, a partir de los siguientes datos.

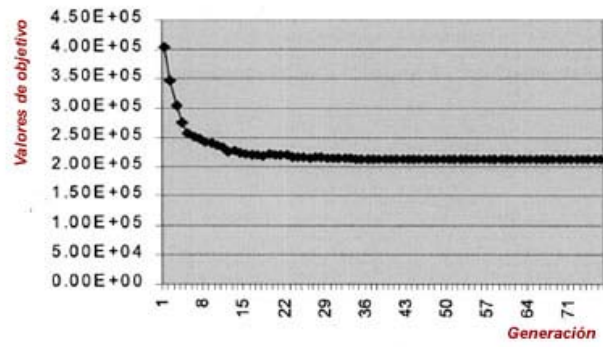
Rango de valores

	Mínimo	Máximo
Población	20	100
Tasa de cruce	0.3	0.8
Tasa de mutación	0.01	0.3

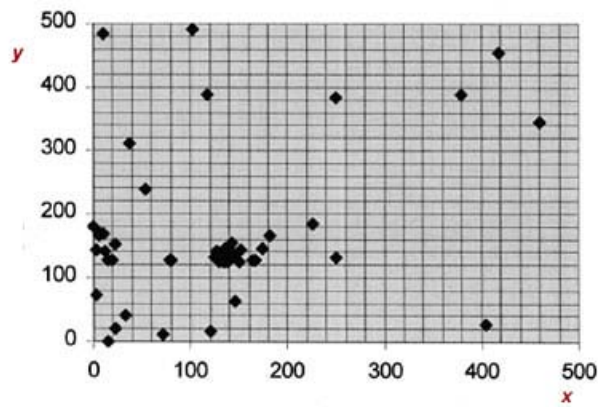
El esquema generacional requiere, para cada generación, producir una población intermedia por reproducción, cruzamiento y mutación. El criterio de terminación es el máximo número de generaciones.



El experimento se realizó según los valores de la tabla. De acuerdo a los resultados de las figuras, la convergencia se produce en menos de 100 generaciones. La posición de las coordenadas es estable. Los costos disminuyen progresivamente. El espacio que se cubre es bastante amplio. La localización óptima en este ejemplo es $(133.3, 133.3)$.

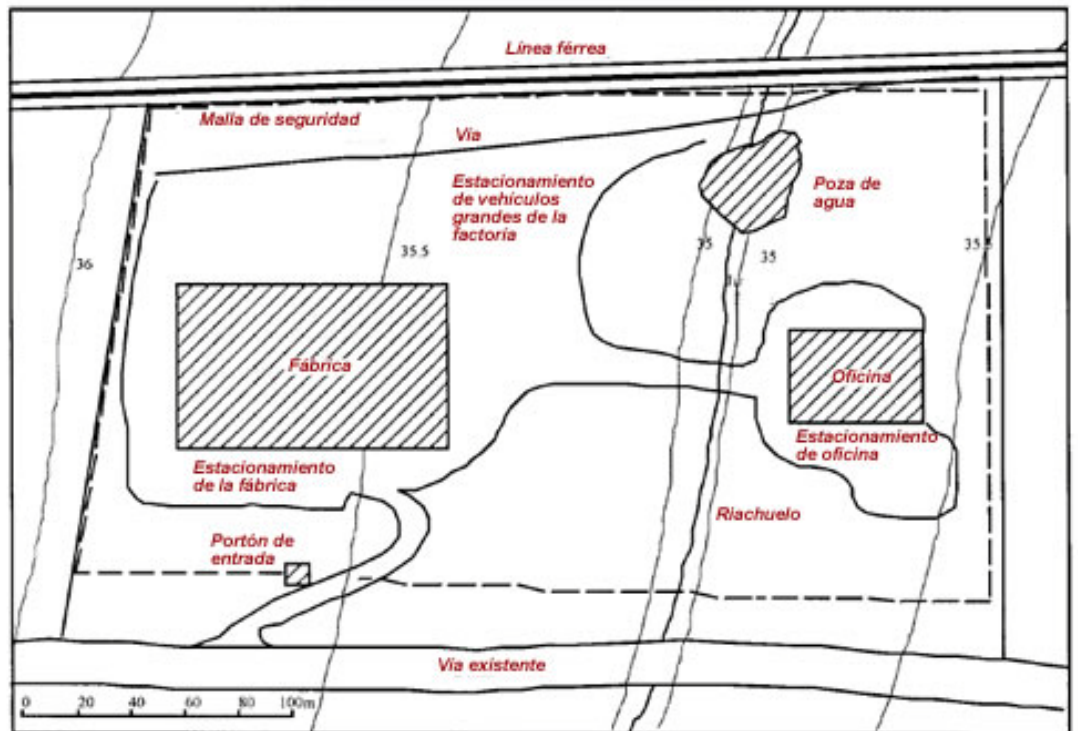


CONVERGENCIA DEL VALOR DEL OBJETIVO



COBERTURA x,y DE LA SIMULACIÓN

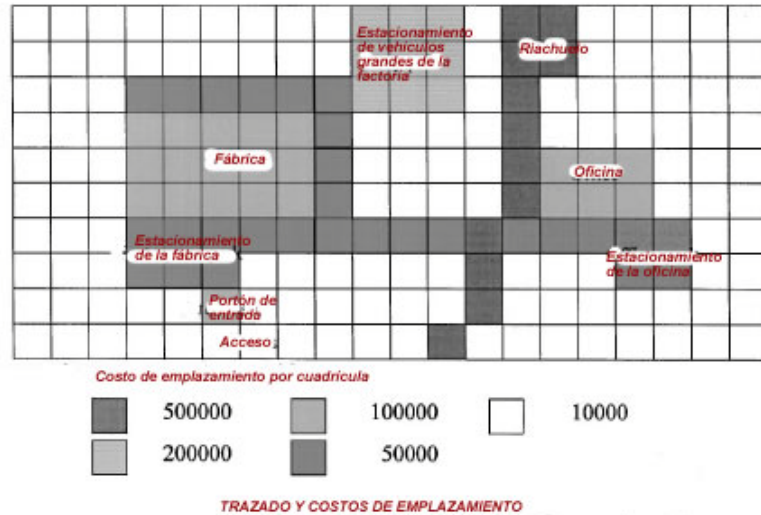
Ejemplo práctico



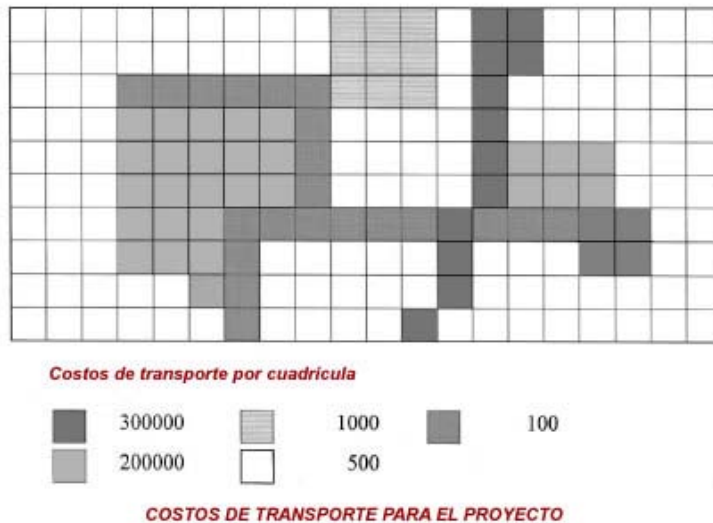
TRAZADO DEL LUGAR DEL PROYECTO

Se trata del trazado de un proyecto con las siguientes instalaciones permanentes: factoría, estacionamiento de autos de la factoría, estacionamiento de vehículos grandes de la factoría, oficinas, estacionamiento de autos de las oficinas.

Se ilustra el traslado de este trazado a una malla con cuadrículas de 20 m, con los correspondientes costos de emplazamiento.



Los costos de transporte por cuadrícula se indican en la siguiente figura.



Las facilidades temporales que deben ser localizadas son las siguientes: sitio para la oficina, un almacén para el refuerzo, un almacén para el concreto, y un almacén general.

Los requerimientos de las facilidades permanentes a ser suministrados por las temporales son los siguientes.

Facilidades permanentes

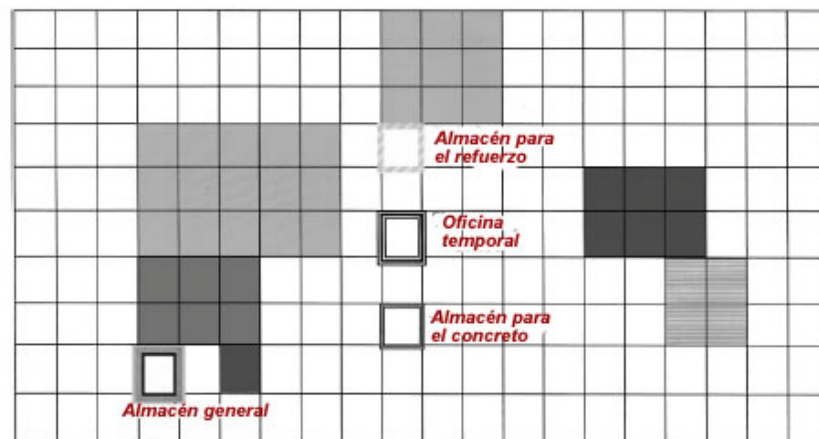
Facilidades temporales	Vehículos grandes	Vía	Oficina	Portón	Vehículos	Factoría
Oficina	60	20	800	100	20	1,200

Facilidades permanentes						
Facilidades temporales	Vehículos grandes	Vía	Oficina	Portón	Vehículos	Factoría
Almacén de refuerzo	200	0	200	10	0	700
Almacén para el concreto	100	0	50	10	0	150
Almacén general	0	10	500	50	0	200

Los requerimientos entre facilidades temporales se muestran en el siguiente cuadro.

Para facilidades temporales				
De facilidades temporales	Oficina	Almacén de refuerzo	Almacén para concreto	Almacén general
Oficina	0	100	100	150
Almacén de refuerzo	0	0	0	0
Almacén para concreto	0	0	0	0
Almacén general	50	50	100	0

El algoritmo genético produce la solución siguiente:



SOLUCIÓN DEL TRAZADO PARA EL PROYECTO DE LA FACTORÍA